

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи

Чан Хао

Чан Хао

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ
КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ СБОРНЫХ МАРШРУТНЫХ
КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОЕЗДОВ**

2.9.1. – Транспортные и транспортно-технологические системы
страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург–2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Научный руководитель: **Кочнева Дарья Ивановна,**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Куренков Пётр Владимирович,**
доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта»
Фридрихсон Олег Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится « 20 » мая 2022 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.02 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) в ауд. Б2-15 (зал диссертационных советов) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 6б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «26» марта 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по почте в адрес диссертационного совета Д 218.013.02.

Тел./факс: +7 (343) 221-24-44. E-mail: NSirina@usurt.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор



Сирина Нина Фридриховна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Основной тенденцией в развитии мирового транспорта является быстрый рост контейнерных перевозок. На сегодня уровень контейнеризации сухих грузов в мире по некоторым оценкам составляет 60–70 %. В России этот показатель составляет всего 9,8 %.

В международном сообщении конкуренцию железнодорожным контейнерным перевозкам составляет морской транспорт, который обеспечивает наиболее низкую стоимость доставки, а во внутреннем сообщении – автомобильный, его ключевые преимущества: быстрая доставка грузов и более низкие тарифы на расстояния до 2000 км, высокая частота отправок и сервис «от двери до двери». Одним из основных направлений повышения конкурентоспособности контейнерных перевозок по железной дороге является организация маршрутных контейнерных поездов с установленным расписанием. Их преимущества: увеличение скорости перевозки за счет исключения операций переформирования и сортировки в пути следования, более низкие транспортные тарифы, повышение надежности срока доставки. Вместе с тем, объемы отправок прямыми маршрутными поездами остается сравнительно невысокой, что обусловлено необходимостью накопления контейнеропотока на терминалах или подъездных путях предприятий-грузовладельцев для формирования полносоставного маршрута, кроме того техническая оснащенность контейнерной инфраструктуры в регионах зачастую не позволяет работать с контейнерными поездами, осуществлять их формирование и расформирование.

В связи с этим в настоящем исследовании разрабатывается новая технология сборного маршрутного контейнерного поезда, который сочетает элементы сборных и прямых маршрутов и построен на принципах организации пассажирского движения.

Степень разработанности темы исследования. Задачам организации контейнерных поездов по расписанию посвящено большое число современных исследований. Организационным аспектам организации контейнерных перевозок посвящены труды российских ученых: И.М. Басырова, А. С. Балаева, П.В. Баскакова, Д.В. Боцвина, С. Ю. Елисеева, А.Г. Кирилловой, П. А. Козлова, С.Н. Корнилова, П. В. Куренкова, Р. Г. Леонтьева, В. С. Лукинско, С. В. Милославской, О.В. Москвичева, Л. Б. Миротина, В. М. Николашина, Р.М. Паршиной, М.Н. Прокофьева, М.Б. Петрова, С. М. Резера, В.М. Сая, Н.А. Тушина, О.В. Фридрихсона и др.

В работе учтены результаты исследований по организации контейнерных поездов ученых Китая: Чжоу Ц, Ванг Л., Чжу Х., Ян Х., Ху Г., Сунь В., Ван Х. и других; Европы: Бойзен Н., Сири С., Кабаллини К., Ларсен Р.Б., Руп Дж., Пеш Э. и других; США: Баркан К.П.Л, Гибсон Р., Ланг М-Х. и другие.

Данные исследования построены в соответствии с традиционными системами организации движения: сборные поезда с переформированием состава, либо маршрутные поезда без грузовых операций в пути. Перспективы концепции контейнерных поездов на принципах пассажирского движения в

настоящее время рассматриваются в ОАО «РЖД», однако на сегодняшний день научные исследования на данную тему отсутствуют. В связи с этим, проблема научного обоснования маршрутных контейнерных поездов в условиях реализации движения по расписанию с попутными погрузочно-выгрузочными операциями обладает научной актуальностью.

Целью диссертационной работы является разработка технологии организации сборных маршрутных контейнерных поездов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить **следующие задачи:**

1) сформировать понятие сборного маршрутного контейнерного поезда, требования к инфраструктуре и технико-технологические условия его реализации;

2) разработать графоаналитическую модель формирования альтернативных маршрутов сборных маршрутных контейнерных поездов и экономико-математическую модель поиска оптимального маршрута;

3) разработать алгоритм планирования сборных маршрутных контейнерных поездов на заданной транспортной сети;

4) разработать методику оптимального размещения контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде.

Объект исследования: железнодорожные контейнерные перевозки

Предмет исследования: технология организации сборных маршрутных контейнерных поездов

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) сформулировано понятие сборного маршрутного контейнерного поезда и дано графоаналитическое представление технологии;

2) разработана экономико-математическая модель поиска оптимальных маршрутов движения сборного маршрутного контейнерного поезда;

3) разработан алгоритм планирования сборных маршрутных контейнерных поездов на заданной транспортной сети при известном спросе на контейнерные перевозки;

4) разработана методика оптимального размещения контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде с целью минимизации непроизводительного пробега погрузчика при погрузке/выгрузке контейнеров на промежуточных станциях маршрута.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы направлены на повышение конкурентоспособности железнодорожных контейнерных перевозок за счет ускорения доставки и совершенствования транспортного сервиса.

Методологической основой исследования являются современные представления об организации производства на транспорте. В работе использованы методы теории графов, оптимизационные алгоритмы, методы теории логистики, методы теории вероятностей и математической статистики, методы теории расписаний.

На защиту выносятся:

1) авторское представление технологии сборного маршрутного контейнерного поезда, требования к инфраструктуре и технико-технологические условия его реализации;

2) графоаналитическая модель формирования альтернативных маршрутов сборных маршрутных контейнерных поездов и экономико-математическая модель поиска оптимальных маршрутов;

3) алгоритм планирования сборных маршрутных контейнерных поездов на заданной транспортной сети при известном спросе на контейнерные перевозки;

4) методика оптимального размещения контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде с целью минимизации непроизводительного пробега погрузчика при погрузке/выгрузке контейнеров на промежуточных станциях маршрута.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается результатами апробации разработанных моделей и алгоритмов на примере конкретной транспортной сети доставки грузов из Китая по железной дороге при известном уровне транспортного спроса.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях и семинарах: Всероссийская научно-техническая конференция «Цифровизация логистических процессов в цепях поставок»; Всероссийская научно-техническая конференция «Транспорт Урала-2020»; Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте. Управление. Экономика. Безопасность»; Международная научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и технологии (РТТ-2021)»; Конкурс профессионального мастерства «Славим человека труда!» Уральского федерального округа в номинации «Лучший специалист транспортно-логистической отрасли»; 5-я Международная конференция по организации дорожного движения и транспортным системам – ICTETS2021 (Китай, г. Чунцин); Международная конференция «Транспорт, логистика, принятие решений в рамках новой двухцикловой модели развития» (Китай, г. Нанкин); 17-й Академический симпозиум по системной инженерии «Проектирование систем двойной циркуляции и логистики» (Китай, г. Харбин).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в пяти печатных работах, в том числе в трех, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов научных исследований».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи исследования, научную новизну, а также теоретическую и практическую значимость работы.

В первой главе выполнен ретроспективный анализ развития контейнерной транспортной системы, проведено исследование мирового опыта совершенствования железнодорожных контейнерных перевозок, а также современных научных разработок, посвященных организации контейнерных поездов.

Анализ мирового опыта показал, что наиболее перспективным направлением повышения эффективности железнодорожных контейнерных перевозок является организация ускоренных маршрутных контейнерных поездов по расписанию. Различные аспекты формирования ускоренных контейнерных поездов достаточно широко освещены в научной литературе. Вместе с тем, в настоящее время не решена проблема эффективной организации накопления и консолидации отправительских маршрутов, что усугубляется технической неразвитостью контейнерной инфраструктуры в регионах.

В последние годы существенно вырос товароборот между Китаем и Россией, Китаем и Европой, однако в перевозках сохраняется высокая доля морского транспорта. Для увеличения доли железнодорожного транспорта в структуре международных перевозок Китай-Россия-Европа необходимо обеспечивать повышение скорости доставки грузов в контейнерных поездах, совершенствовать логистический сервис, предлагаемый грузовладельцам, разрабатывать гибкую тарифную политику.

Названные обстоятельства подтвердили научную и практическую актуальность совершенствования технологии организации контейнерных поездов на принципах пассажирского движения.

Во второй главе предложена технология сборного маршрутного контейнерного поезда (СМКП), сформированы требования к инфраструктуре и технико-технологические условия реализации, проведено моделирование времени выполнения грузовых операций и разработана методика оптимальной расстановки контейнеров в поезде.

Под **сборным маршрутным контейнерным поездом (СМКП)** в настоящем исследовании понимается контейнерный поезд с установленным маршрутом движения и расписанием, следующий от начальной до конечной станции маршрута без переформирования состава, но с выполнением грузовых операций по погрузке/выгрузке контейнеров на промежуточных остановках маршрута (рис. 1).

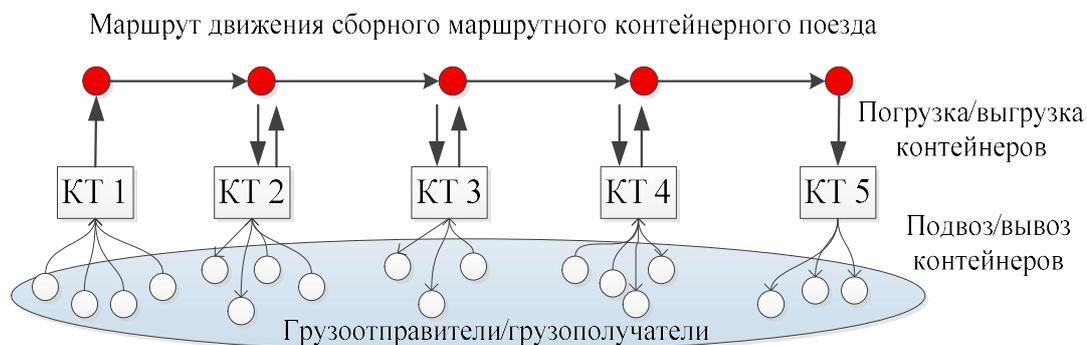


Рисунок 1 – Схема организации сборного маршрутного контейнерного поезда

Технология СМКП предполагает формирование поездов постоянной составности из фитинговых платформ с контейнерами или грузовыми местами назначением на определенные станции по маршруту следования. Остановки предусматриваются на промежуточных контейнерных терминалах или станциях, оборудованных для погрузки и выгрузки контейнеров. Во время стоянки выполняются необходимые технологические операции по смене локомотива или локомотивной бригады, а также снятие контейнера назначением на данную станцию погрузчиком с платформы и установка на освободившееся место контейнера назначением на одну из станций далее по маршруту.

Реализация данной технологии позволит сократить время доставки контейнеров за счет 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.

Для реализации СМКП требуется создание следующих технико-технологических условий:

- наличие на терминале отдельного погрузочно-выгрузочного пути длиной не менее установленного отправительского маршрута, предназначенного для приема/отправления СМКП;

- наличие на терминале специальной отдельной погрузочно-выгрузочной контейнерной площадки вдоль пути, предназначенного для приема/отправления СМКП;

- модификация программного обеспечения формирования графика движения поездов для встраивания СМКП в существующий график;

- разработка и внедрение цифрового сервиса взаимодействия с грузоотправителями с возможностью отслеживания расписаний отправления поездов и приобретения места в СМКП (как аналог цифровых сервисов, реализованных в пассажирском сообщении);

- комплексное внедрение цифровых технологий отслеживания дислокации контейнеров для повышения прозрачности сервиса для клиентов и исключения ошибок и сбоев в транспортном процессе.

Реализация предлагаемого подхода не требует масштабного развития контейнерной инфраструктуры и существенного расширения контейнерных площадок, так как в рамках технологии СМКП не предусмотрено длительное накопление контейнеропотока на терминалах, а подача контейнеров точно ко времени загрузки поезда.

Одно из основных условий эффективного функционирования системы сборных маршрутных контейнерных поездов (СМКП) – соблюдение расписания движения, поэтому все технологические операции в пути следования поезда должны быть четко регламентированы во времени и увязаны с графиком движения поездов.

Вместе с тем, время выполнения грузовых операций на промежуточных станциях маршрута может существенно варьироваться и зависит от объемов

погрузки/выгрузки контейнеров в каждом пункте (что определяется спросом региона на перевозки), порядком размещения контейнеров в СМКП, видом используемого погрузчика и его производительностью, используемой технологией грузовой работы.

В общем виде выражение для расчета продолжительности выполнения комплекса грузовых операций $T_{грj}$ в j -х промежуточных пунктах движения СМКП запишем следующим образом:

$$T_{грj} = q_j \cdot t_r + \sum_0^{(q_j-1)} t_n \cdot r, \quad (1)$$

где q_j – число контейнеров, подлежащих погрузке/выгрузке в j -м промежуточном пункте, ДФЭ; t_r – продолжительность цикла выполнения грузовой операции по снятию контейнера с платформы и установке на освободившееся место контейнера назначением далее по маршруту, мин.; t_n – продолжительность перемещения погрузчика вдоль поезда на расстояние равное ДФЭ; r – условное расстояние между ближайшими контейнерами в поезде, подлежащими выгрузке, ДФЭ.

Порядок размещения контейнеров в СМКП определяет траекторию движения погрузчика и общую продолжительность операций по его перемещению от одного контейнера к другому. В случаях если размещение контейнеров в поезде осуществляется произвольно, время перемещения погрузчика будет подвержено существенным случайным отклонениям. Зададим r – условное расстояние между ближайшими контейнерами в поезде, подлежащими выгрузке (ДФЭ), как случайную величину. Примем, что при произвольном порядке размещения каждый контейнер может с равной степенью вероятности занять любое грузовое место в поезде. Тогда r следует задать случайной величиной, распределенной в соответствии с равномерным законом распределения.

На основе метода статистических испытаний Монте-Карло было проведено моделирование времени выполнения грузовых операций, как случайной величины и получены следующие выводы: до 23 % времени на погрузку/выгрузку контейнеров приходится на непроизводительный пробег погрузчика вдоль поезда от одного контейнероместа, подлежащего смене к другому. Высокая вариация этой величины затрудняет четкое планирование операций и создает риски для надежной отправки состава по расписанию. В связи с этим возникает необходимость разработки методики обоснованного размещения контейнеров в СМКП с целью минимизации времени непроизводительного пробега погрузчика и снижения неопределенности.

Задача о размещении относится к классу задач комбинаторной оптимизации. Методы решения сводятся к перебору вариантов для получения оптимального или близкого к оптимальному значения. Осуществление метода полного перебора зачастую невозможно, в связи с этим разработаны различные математические алгоритмы частичного перебора, позволяющие найти решение близкое к оптимальному. В виду специфики поставленной задачи для

ее 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.

Пункты (терминалы) погрузки/выгрузки контейнеров по маршруту следования СМКП занумерованы натуральными числами от 1 до N . Исходная матрица расстановки ($\chi=0$) формируется на основе заданной матрицы корреспонденций поезда $[q(i,j)]$ размера $N \times N$, где $q(i,j)$ означает количество контейнеров, направляемых из пункта i в пункт j . Матрица корреспонденций удовлетворяет следующим ограничениям:

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

2) в каждом промежуточном пункте $p = 2, 3, \dots, N-1$ в поезд загружается столько контейнеров, сколько в этом пункте было выгружено, то есть:

$$\sum_{i=1}^p q(i, p) = \sum_{j=p}^N q(p, j). \quad (2)$$

Считаем, что в каждом пункте погрузки контейнеры, направляемые в конкретный пункт, 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 . Общее количество групп грузовых мест K зададим следующей формулой:

$$K = 1 + \sum_{i=2}^{N-1} S_i. \quad (3)$$

где S_i – число стоков (назначений) контейнеропотока, отправлением из пункта i .

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

Элементы α_{lk} первой строки матрицы расстановки вычисляются по матрице корреспонденций $[q(i,j)]$ следующим образом. Просматривая слева направо строки матрицы корреспонденций начиная со второй, выберем из них все ненулевые элементы и расположим их в последовательность.

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

Если $\tilde{\alpha}_{1k} = q(i, j) \leq q(1, i)$, то $\alpha_{1k} = \tilde{\alpha}_{1k}$. Это означает, что если k -й элемент $\tilde{\alpha}_{1k}$ последовательности, равный 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 $\tilde{\alpha}_{1k} = q(i, j) > q(1, i)$, то $\alpha_{1k} = q(i, j) - \sum_{s=2}^j q(s, i)$. 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 $\alpha_{1N} = q(1, N)$ 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 соответствие 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 $[lk_{\min}; lk_{\max}]$, то есть:

$$r(l) = \sum_{k_{\min}(l)}^{k_{\max}(l)} \alpha_{lk}(p, j), \text{ при } p < l, \quad (4)$$

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:

$$R(\chi) = \sum_{l=1}^{N-1} r(l). \quad (5)$$

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

На втором этапе исходная матрица подлежит последовательной транспозиции (перестановке местами некоторой пары столбцов) до получения ненулевого значения критерия оптимальности. Критерием оптимальности выступает условное расстояние между контейнерами, подлежащими выгрузке в каждом промежуточном пункте $R(\chi)$. Идея такого подхода основана на принципе генетического алгоритма.

Блок-схема алгоритма оптимизации размещения контейнеров в поезде представлена на рис. 2.

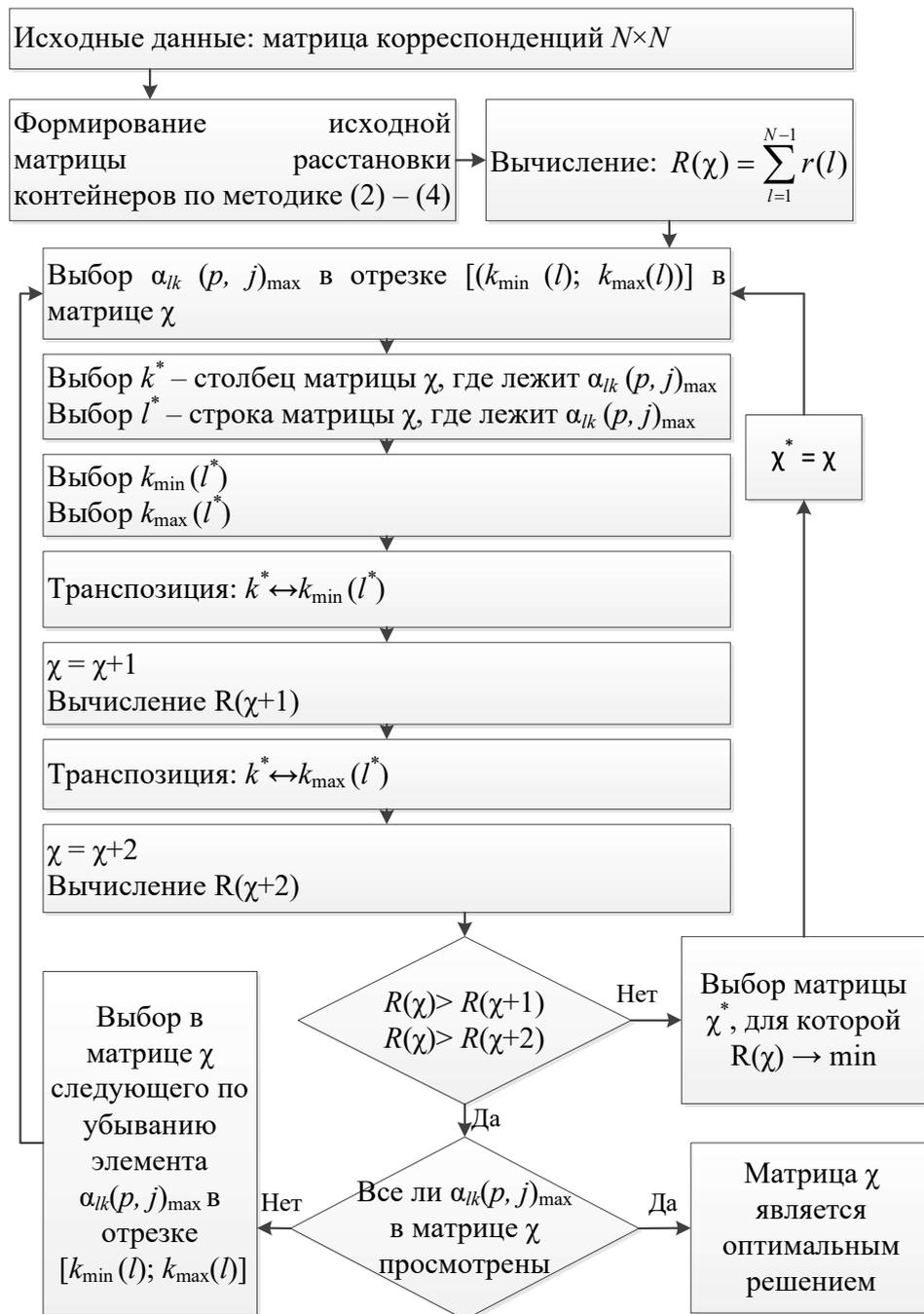


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма поиска оптимального размещения контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде

Представленная методика позволяет сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах движения СМКП, что обеспечит ускорение грузовых операций при перестановке контейнеров.

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

Третья глава посвящена моделированию оптимальной маршрутной сети сборных маршрутных контейнерных поездов.

Множество альтернативных маршрутов движения СМКП опишем с помощью графа $G = (V, E)$, где вершины графа v_i – станции (терминалы) погрузки/выгрузки контейнеров, ребра e_{i-j} – железнодорожные пути сообщения. В рамках решения задачи формирования оптимальных маршрутов определим следующие требования к графоаналитической модели СМКП:

1) граф сети СМКП является ориентированным, то есть каждое ребро графа e_{i-j} имеет направление, определяющее возможный путь движения потока от начальной вершины ребра v_i до конечной вершины ребра v_j ;

2) граф не содержит кратных ребер, то есть не существует двух альтернативных способов движения контейнеропоток между одними и теми же станциями (терминалами);

3) граф не содержит петель и циклов;

4) вершины графа обозначены натуральными числами от 1 до n , при этом нумерация вершин должна соответствовать последовательности движения потока по маршруту, то есть для любого ориентированного ребра e_{i-j} , инцидентного вершинам i и j выполняется условие $i < j$.

Каждому ребру и вершине графа присвоим числовые метки, характеризующие параметры помечаемого объекта:

– $\{Q_{ij}\}$ – вектор, характеризующий спроса i -го пункта в отправке контейнеров в пункт j ;

– $\{q_{ij}^{(k)}\}$ – число контейнеров, погруженных в k -й поезд в направлении $i-j$, $q_{ij}^{(k)} \leq Q_{ij}$;

– $T_{гри}$ – время выполнения грузовых операций в i -м пункте, $T_{гри} = f(q_{ij}^{(k)})$;

– $x_{i-j}^{(k)}$ – булева переменная, характеризующая включение ребра e_{i-j} в маршрут k -го поезда, где $x_{i-j}^{(k)} = 1$ означает, что ребро включено в маршрут, $x_{i-j}^{(k)} = 0$ – в противном случае;

– T_{i-j} – время движения контейнерного поезда на участке $i-j$.

Для каждого альтернативного маршрута графа СМКП определим поток. Обозначим $Z_l^{(k)}$ величину потока, проходящего по дуге l . Эта величина характеризует загрузку k -го контейнерного поезда и включает транзитный поток, проходящий через i -й пункт и поток, погруженный в i -м пункте, таким обра-

зом, число дуг l равно числу станций погрузки контейнеропотока, то есть: $l = 1, 2, \dots, n-1$.

При известных объемах погрузки в каждом пункте $q_{ij}^{(k)}$ и структуре маршрута $x_{i-j}^{(k)}$ величина потока определяется выражением:

$$Z_l^{(k)} = Z_{l-1}^{(k)} + \sum_{j>l}^n (q_{lj}^{(k)} \cdot \sum_{i=l}^{j-1} x_{i-j}^{(k)}) - \sum_{i<l}^{n-1} (q_{il}^{(k)} \cdot \sum_{i=l}^{j-1} x_{i-j}^{(k)}). \quad (6)$$

В выражении величина $\sum_{i=l}^{j-1} x_{i-j}^{(k)}$ идентифицирует наличие грузовых операций по смене контейнеров в i -ом пункте маршрута, $\sum_{i=l}^{j-1} x_{i-j}^{(k)} = 0$ будет означать, что в i -м пункте грузовые операции не осуществляются, поезд проследовал этот пункт транзитом.

Далее в рамках исследования разрабатывается модель поиска оптимального маршрута движения СМКП на заданном графе при установленной величине спроса на контейнерные перевозки каждого пункта.

Варьируемыми переменными выступают два массива: $\{q_{ij}^{(k)}\}$ и $\{x_{i-j}^{(k)}\}$.

Целевая функция оптимизационной модели представлена выражением:

$$F(x, q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i-j} \cdot T_{i-j} + \sum_{i=2}^{n-1} T_{\text{Гри}} \cdot \sum_{j=2}^{n-1} q_{ij}. \quad (7)$$

То есть маршрут движения СМКМ предлагается оптимизировать по критерию времени его движения от начального до конечного пункта с учетом времени выполнения грузовых операций в промежуточных пунктах.

Время доставки выбрано в качестве целевого критерия, так как именно этот показатель в настоящее время является ключевым для обеспечения конкурентоспособности контейнерных перевозок по железной дороге. Вместе с тем, модель позволяет задавать и иные критерии оптимальности, например, стоимость перевозки контейнеров в СМКП по заданным маршрутам или многокритериальные оценки.

Введем ограничения, отражающие структуру искомого маршрута на заданном графе.

Так как искомый маршрут по условию начинается в вершине $i=1$, он должен включать в себя одну из дуг, идущих от начальной вершины. Таким образом:

$$\sum_{j=2}^n x_{1-j} = 1. \quad (8)$$

Аналогично искомый путь заканчивается в вершине n , он должен включать в себя одну из дуг, идущих от предшествующих вершин. Таким образом:

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_{i-n} = 1. \quad (9)$$

Для промежуточных вершин ограничения сформируем так, чтобы искомым путем мог пройти через любую вершину. При этом если искомым путем входит в вершину, то должен выйти из нее: число входящих в вершину ребер равно числу выходящих из нее, а разность этих чисел равна нулю. Число таких ограничений равно числу промежуточных вершин графа за исключением начальной и конечной вершины. Обозначим числом r – номер промежуточной вершины графа и запишем ограничения для промежуточных вершин следующим образом:

$$\sum_{i < r}^r x_{i-r} - \sum_{j > r}^n x_{r-j} = 0. \quad (10)$$

Введем ограничения, отражающие сохранение потока.

Поток, заходящий в любую вершину сети (кроме начальной и конечной вершины) равен суммарному потоку, выходящему из этой вершины, а разность этих чисел равна нулю.

Следовательно, ограничение для начальной и конечной вершины:

$$\sum_{j=2}^n q_{1j} - \sum_{i=1}^{n-1} q_{in} = 0. \quad (11)$$

Ограничения для промежуточных вершин:

$$\sum_{i < r}^r q_{ir} - \sum_{j > r}^n q_{rj} = 0, \quad (12)$$

где r – номер промежуточной вершины графа.

Зададим ограничение величины потока Z_l : на каждом участке маршрута величина потока Z_l должна соответствовать нормативной загрузке контейнерного поезда Z_n , то есть:

$$Z_l = Z_n, \quad l = 1, 2, \dots, n-1. \quad (13)$$

Вместе с тем, для получения наиболее эффективных управленческих решений и увеличения числа формируемых контейнерных поездов величина потока Z_l может быть задана интервальным ограничением, то есть:

$$Z_{\min} \leq Z_l \leq Z_{\max}. \quad (14)$$

Также модель позволяет учитывать пропускную способность железнодорожной инфраструктуры. При наличии ограничений по весу или длине по-

езда на отдельных участках заданной транспортной сети (P_l) в модель вводится дополнительное ограничение величины потока:

$$Z_l \leq P_l . \quad (15)$$

Разработанная экономико-математическая модель относится к классу задач нелинейного программирования. Поиск оптимального решения может быть выполнен с использованием различных математических алгоритмов. В настоящем исследовании для решения оптимизационной задачи используется наиболее доступный вариант – встроенные алгоритмы «Поиск решения» в программной среде MS Excel.

На заданной матрице спроса и транспортной сети, как правило, можно сформировать не один, а несколько маршрутных контейнерных поездов нормативной загрузки и различной маршрутизации. В связи с этим предлагается следующий пошаговый алгоритм планирования контейнерных поездов на заданной транспортной сети (рис. 3).

Этапы работы алгоритма следующие.

Этап 1. Назначаются маршруты поездов, которые могут быть сформированы от одной станции отправления до другой станции назначения без остановок для погрузки/выгрузки контейнеров. Для этого последовательно просматривается матрица $\{Q_{ij}\}$ и выбираются такие элементы Q_{ij} , для которых $Q_{ij} \geq Z_n$. Назначенные прямые маршруты пошагово (u – номер шага) исключаются из матрицы спроса: для выбранных элементов выполняется действие: $Q_{ij} - Z_n$. Число шагов u , выполненных на первом этапе соответствуют числу назначенных прямых маршрутов. После исключения всех прямых маршрутов из матрицы $\{Q_{ij}\}$ переходим к следующему этапу.

Этап 2. Выполняется расчет оптимального маршрута по критерию времени доставки контейнера в соответствие с моделью поиска оптимального маршрута движения СМКП. В случае если решение найдено из матрицы спроса исключается сформированный маршрут $\{Q_{ij}(u)\} - q_{ij}(u)$, в противном случае из сети исключаются ребра, для которых не выполняется условие нормативной загрузки поезда, в модель вводится ограничение $Z_k = 0$. Этап 2 повторяется до тех пор, пока не будут рассмотрены все возможные варианты маршрутов при заданных условиях.

Этап 3. Контейнеры, не включенные ни в один маршрут на 1–2 этапе алгоритма могут быть отправлены в составе сборных грузовых поездов, либо накапливаться на терминале до момента появления целесообразности отправки следующего СМКП. Решение о накоплении контейнеропотока принимается если время накопления (T_n) не превышает разницы между временем движения в сборном грузовом поезде и СМКП.

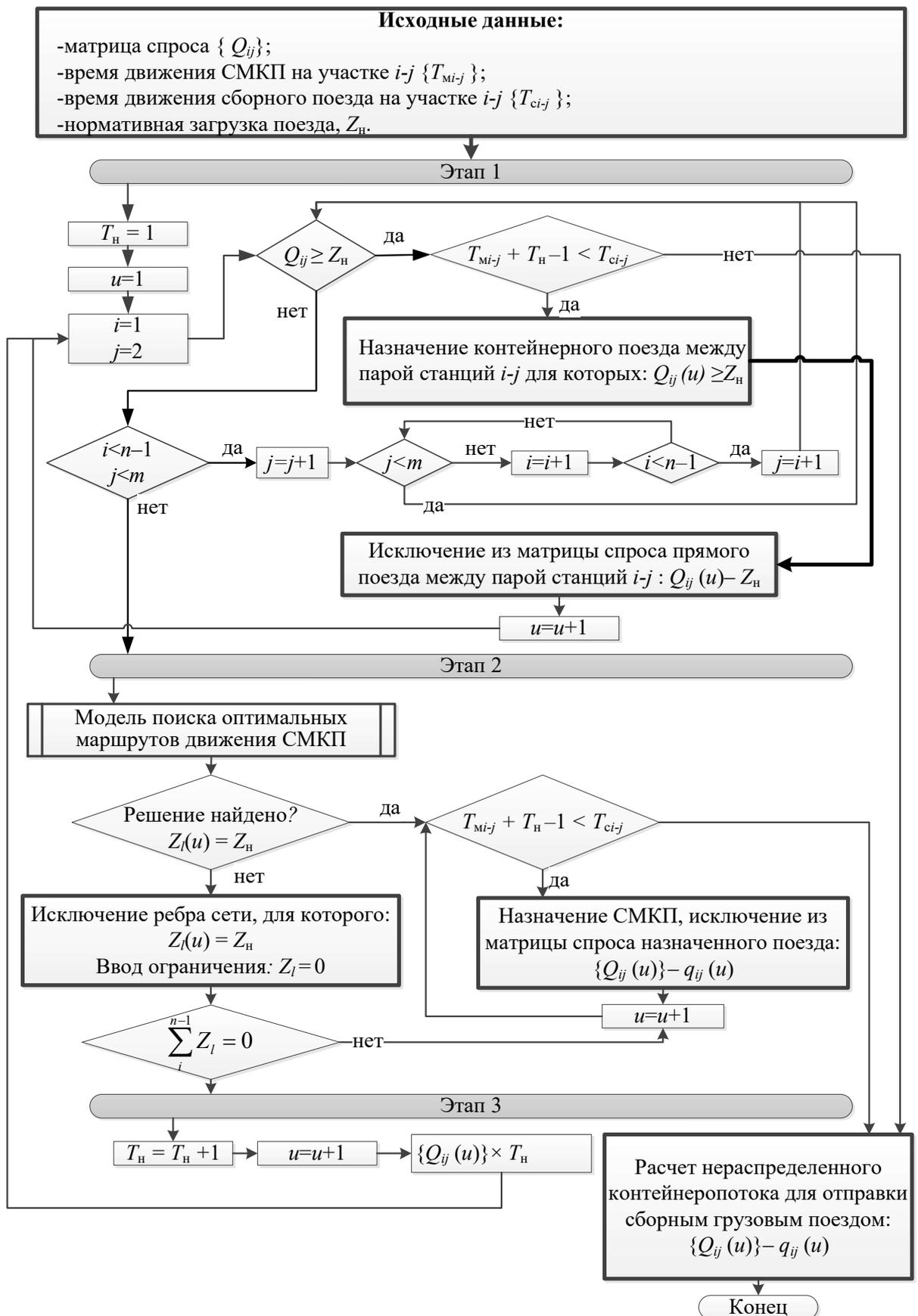


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма планирования сборных маршрутных контейнерных поездов на заданной транспортной сети

Алгоритм работает таким образом, что на каждом шаге i назначается прямой маршрутный или сборный маршрутный контейнерный поезд, при этом часть контейнеропотока, распределенная в маршрут, исключается из матрицы спроса $\{Q_{ij}\}$. Результатом работы алгоритма является перечень прямых и сборных маршрутных контейнерных поездов, отправляемых ежедневно и с установленным интервалом при накоплении, а также остаточный контейнеропоток, не включаемый в маршруты для отправки в составе обычных сборных контейнерных поездов.

В четвертной главе проведена апробация разработанных моделей и алгоритмов на примере транспортной сети доставки грузов в контейнерах из Китая в Россию и Европу транзитом через Российскую Федерацию. Основные пункты пропуска контейнеропотока из Китая на территорию РФ – порты Приморского края (Владивосток, Восточный (Находка)) (обозначим как вершину графа 1) и сухопутный пограничный переход Забайкальск – Маньчжурия (вершина 2). Они пропускают соответственно 50 % и 19 % от всего импортного и транзитного контейнеропотока из Китая в Россию.

Основными пунктами экспорта и транзита в Европу служат морской порт Санкт-Петербург (вершина 13) и сухопутные пограничные переходы станций Красное-экспорт (Смоленская обл.) и Злынка-экспорт (Брянская обл.) (объединим пункты в вершине 14).

Также включим в рассматриваемую транспортную сеть регионы России с большими объемами контейнерооборота: Иркутская область (3), Красноярский край (4), Новосибирская область (5), Челябинская область (6), Свердловская область (7), Пермский край (8), Республика Башкортостан (9), Республика Татарстан (10), Нижегородская область (11), Москва и Московская область (12).

Задача состоит в объединении импортного и транзитного контейнеропотоков из Китая с внутренними и экспортными потоками, формируемыми в России на основе разработанных методик.

Для формирования оптимальной маршрутной сети СМКП на обозначенном направлении сформирована матрица среднесуточного спроса на контейнерные перевозки на основе статистических данных о погрузке и выгрузке контейнеров на сети ОАО «РЖД» за 2019-2021 г.г.

Ограничение по загрузке контейнерного поезда на каждом участке маршрута задано величиной 126 ДФЭ, что соответствует полной загрузке 63-х сорокафутовых фитинговых платформ и нормативной длине поезда в 71 условный вагон. Время доставки контейнеров по каждому участку маршрута задано матрицей $\{T_{i-j}\}$ на основе среднесетевой скорости движения для контейнерных поездов – 866 км/сут.

Расчет по разработанному алгоритму планирования сборных маршрутных контейнерных поездов позволил сформировать следующие регулярные маршруты на заданной транспортной сети (таблица 1). Для наглядности сформируем эшюру контейнеропотока для одного из представленных в таблице 1 маршрутов (рис. 4).

Таблица 1 – Оптимальные маршруты контейнерных поездов на заданной транспортной сети при заданном спросе на перевозки

Маршрут	Погрузка/выгрузка, ДФЭ													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1–5	$\frac{126}{0}$				$\frac{0}{126}$									
1–7	$\frac{126}{0}$						$\frac{0}{126}$							
1–12 (4 поезда)	$\frac{126}{0}$											$\frac{0}{126}$		
1–7–10– 11–12–14	$\frac{126}{0}$						$\frac{33}{33}$			$\frac{7}{7}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{76}{76}$		$\frac{0}{126}$
1–3–4–7– 8–13	$\frac{126}{0}$		$\frac{23}{23}$	$\frac{36}{36}$			$\frac{70}{70}$	$\frac{14}{14}$					$\frac{0}{126}$	
2–12–14		$\frac{126}{0}$										$\frac{43}{43}$		$\frac{0}{126}$

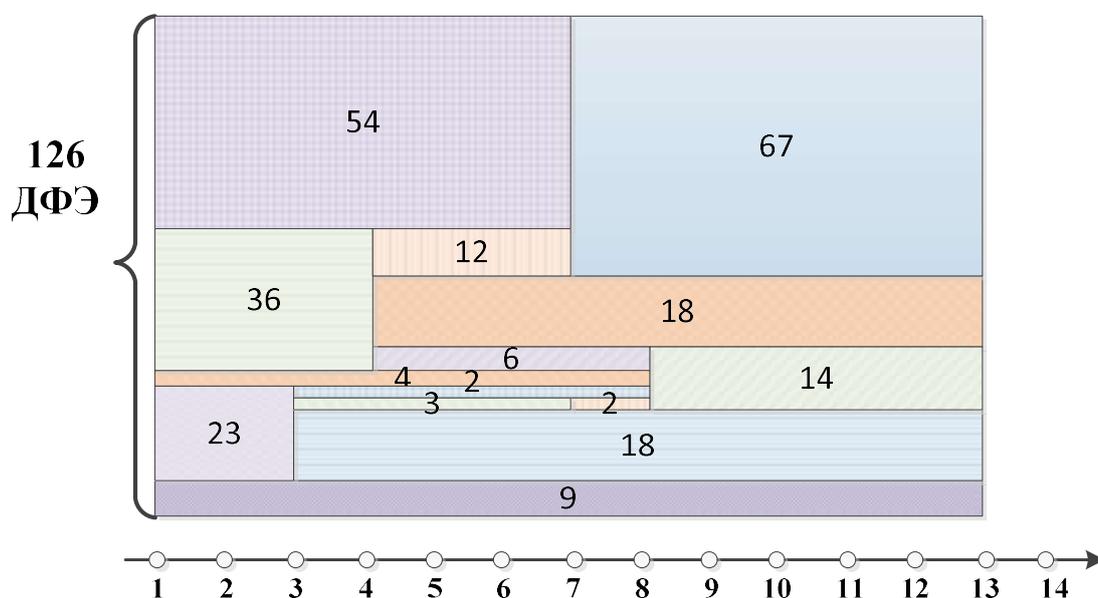


Рисунок 4 – Эпюра контейнеропотока для сборного маршрутного контейнерного поезда Приморский край – Санкт-Петербург с остановками для перегрузки контейнеров в Иркутской области, Красноярском крае, Свердловской области, Пермском крае

Далее проведем апробацию алгоритма оптимальной расстановки контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде. Возьмем ранее сформированный в работе сборный маршрут Приморский край – Санкт-Петербург (см. рис. 4).

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 $\alpha_{ik}(p, j)$ – 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). Цветом в матрице (табл. 2) выделены ячейки, где указан контейнеропоток, подлежащий выгрузке в пункте, соответствующем номеру строки.

Таблица 2 – Исходная матрица расстановки контейнеров в СМКП, (ДФЭ)

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

Вычислим значение критерия оптимальности $R(\chi)$ для исходной матрицы: $R(0) = 44 + 100 = 144$ 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.

Выполним многократные транспозиции столбцов матрицы расстановки. Фрагмент работы алгоритма приведен на рис. 5.

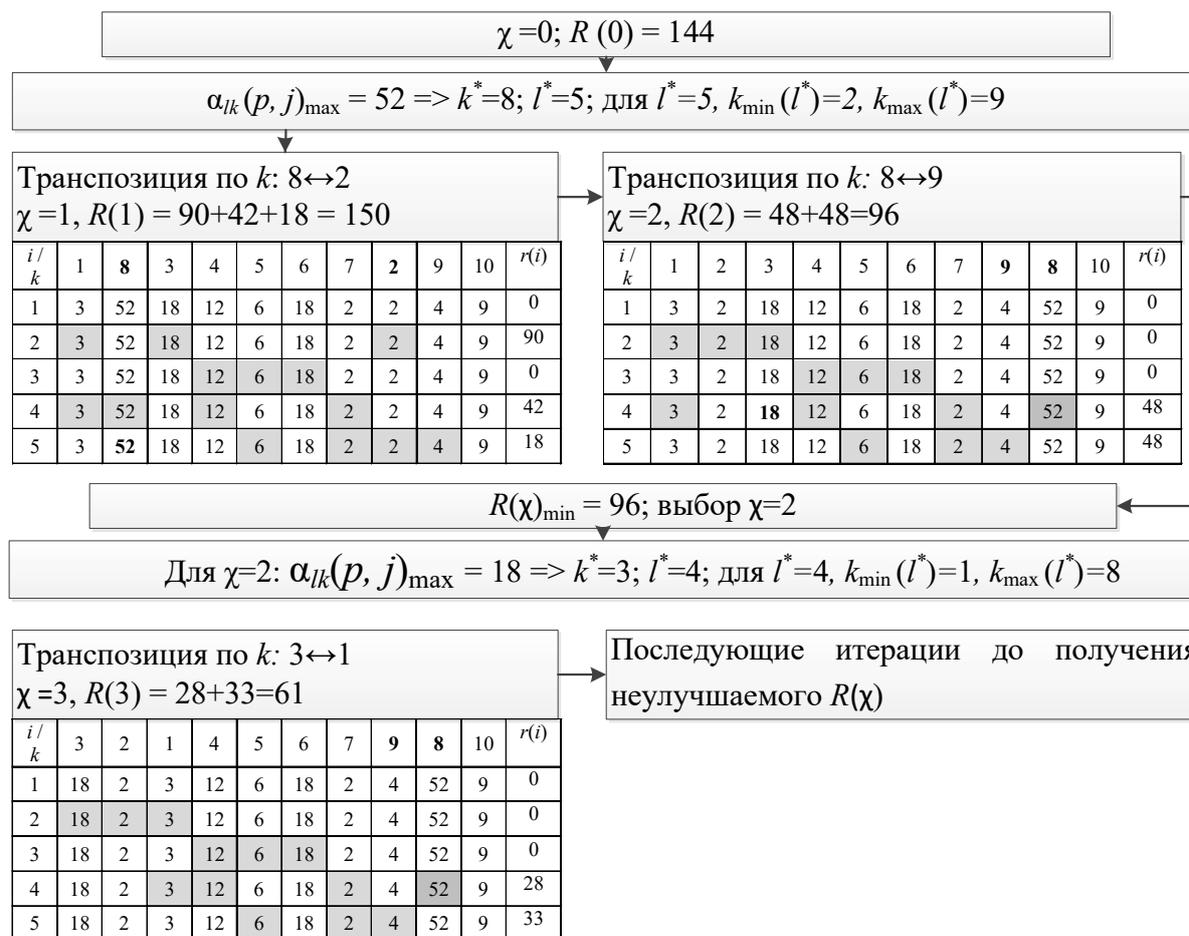


Рисунок 5 – Апробация алгоритма поиска оптимального размещения контейнеров в СМКП (фрагмент)

В результате 17 итераций получена матрица расстановки контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде (табл. 3), дальнейшие итерации не приводят к уменьшению значения целевой функции $R(17)_{\min} = 30$ ДФЭ.

Таблица 3 – Оптимальная матрица размещения контейнеров в СМКП

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

Таким образом, при заданных условиях оптимизация размещения контейнеров в поезде позволяет сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах с $144 \times 6,1 = 878,4$ метров 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.

По сравнению с традиционной технологией организации движения новая технология предполагает сортировку контейнеров, а не вагонов в пути следования сборного поезда. В связи с этим, экономический эффект организации сборного маршрутного контейнерного поезда предлагается оценивать с точки зрения сокращения эксплуатационных расходов, вызванных переработкой состава:

$$\Delta E = N_1 \times E_{\text{сорт}} - N_2 \times E_{\text{пер}}, \quad (16)$$

Затраты переработки поезда на сортировочной станции ($E_{\text{сорт}}$) в основном определяются эксплуатационными расходами выполнения маневровых работ и зависят от времени выполнения маневров (T_M) и расходной ставки, приходящейся на один локомотиво-час (e_M):

$$E_{\text{сорт}} = e_M \times T_M, \quad (17)$$

В случае технологии сборного маршрутного контейнерного поезда вместо затрат на сортировку вагонов в пути возникают дополнительные эксплуатационные затраты, связанные с перегрузкой контейнеров на промежуточных терминалах, которые зависят от удельной часовой ставки работы контейнерного погрузчика (e_K) и времени выполнения работ по перегрузке ($T_{ГР}$):

$$E_{\text{пер}} = e_K \times T_{ГР}. \quad (18)$$

Проведено моделирование величин T_M и $T_{ГР}$ как случайных чисел на основе ранее установленных параметров распределения и установлена зависи-

мость величины экономического эффекта от объемов переработки контейнеропотока: $\Delta E = -246,79q + 47328$ рублей в расчете на одну переработку. В частности для сформированного СМКП Приморский край – Санкт-Петербург с четырьмя остановками и перегрузкой 143ДФЭ на промежуточных терминалах (см. рис. 4) экономия эксплуатационных затрат составит 154021 руб.

Даны рекомендации по практической реализации технологии сборных маршрутных контейнерных поездов на основе современных цифровых технологий обмена данными. Предложено формирование единой цифровой платформы, которая бы абсорбировала всю имеющуюся информацию о транспортном спросе и предложении и формировала конкурентоспособные и экономически привлекательные варианты организации сборных маршрутных контейнерных поездов, а также обеспечивала взаимодействие с грузовладельцами по принципу «одного окна». Это позволит повысить прозрачность транспортного сервиса для клиентов, что сделает железнодорожные перевозки грузов в контейнерах более конкурентоспособными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы поставленные цели достигнуты, задачи решены. Основными результатами работы являются следующие положения:

1. Обоснована практическая и научная актуальность задачи формирования эффективной системы железнодорожных контейнерных перевозок и поиска новых технологий организации контейнерных поездов.

2. Предложена технология сборного маршрутного контейнерного поезда (СМКП), то есть контейнерного поезда с установленным маршрутом движения и расписанием, следующего от начальной до конечной станции маршрута без переформирования состава, но с выполнением грузовых операций по погрузке/выгрузке контейнеров на промежуточных остановках маршрута.

3. Сформированы требования к инфраструктуре и технико-технологические условия реализации сборных маршрутных контейнерных поездов. Установлено, что реализация предлагаемого подхода не требует масштабного развития контейнерной инфраструктуры и существенного расширения контейнерных площадок, так как в рамках технологии СМКП не предусмотрено длительное накопление контейнеропотока на терминалах, а подача контейнеров точно ко времени загрузки поезда.

4. Проведено моделирование времени выполнения грузовых операций на промежуточных станциях маршрута движения СМКП на основе метода Монте-Карло. Результаты моделирования показали, что до 23 % времени на погрузку/выгрузку контейнеров приходится на непроизводительный пробег погрузчика вдоль поезда от одного контейнероместа, подлежащего смене, к другому. Это затрудняет четкое планирование операций и создает риски для надежной отправки состава.

5. Разработан авторский алгоритм оптимизации размещения контейнеров в сборном маршрутном контейнерном поезде, который позволяет сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах движения СМКП, что обеспечивает ускорение грузовых операций при перестановке контейнеров и сокращение эксплуатационных затрат 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.

6. Разработана графоаналитическая модель формирования альтернативных маршрутов движения сборных маршрутных контейнерных поездов (СМКП), сформированы основные требования к модели и формализованы ее параметры.

7. Разработана экономико-математическая модель поиска оптимального маршрута движения сборного маршрутного контейнерного поезда (СМКП) по критерию времени доставки с учетом ограничений спроса на контейнерные перевозки и обеспечения заданной загрузки контейнерного поезда на каждом участке его движения.

8. Предложен пошаговый алгоритм планирования контейнерных поездов на заданной транспортной сети. Алгоритм работает таким образом, что на каждом шаге назначается прямой маршрутный или сборный маршрутный контейнерный поезд, при этом часть контейнеропотока, распределенная в маршрут, исключается из матрицы спроса.

9. Для решения оптимизационной задачи поиска маршрутов движения СМКП разработана модель в среде MS Excel, которая позволяет с помощью алгоритма обобщенного приведенного градиента находить наилучший с точки зрения времени доставки маршрут, удовлетворяющий всем ограничениям задачи.

10. Проведена апробация разработанных моделей и алгоритмов для транспортной сети доставки грузов в контейнерах от восточных до западных границ России и для реальных среднестатистических данных о контейнерном спросе пунктов входящих в заданную сеть. Алгоритм позволил сформировать 9 регулярных маршрутов движения СМКП, которые обеспечивают доставку транзитного контейнеропотока из Китая через территорию РФ в интеграции с экспортно-импортными и внутренними потоками. Методика оптимального размещения контейнеров в поезде позволила найти такой план загрузки СМКП в каждом пункте его движения, который позволяет сократить излишний пробег погрузчика.

11. Проведена оценка экономического эффекта использования технологии сборных маршрутных контейнерных поездов с позиции сокращения эксплуатационных расходов, вызванных переработкой состава. На основе моделирования установлено, что величина экономического эффекта зависит от объема перерабатываемого контейнеропотока и числа переработок. Так для сформированного СМКП Приморский край – Санкт-Петербург с четырьмя

остановками и перегрузкой 143ДФЭ на промежуточных терминалах экономия эксплуатационных затрат составит 154 021 руб.

12. Даны рекомендации по практической реализации технологии сборных маршрутных контейнерных поездов на основе современных цифровых технологий обмена данными. Это позволит повысить прозрачность транспортного сервиса для клиентов, что сделает железнодорожные перевозки грузов в контейнерах более конкурентоспособными.

Для повышения эффективности предложенной транспортной технологии дальнейшие исследования целесообразно проводить в следующих направлениях: разработка технологии и методик организации перегрузки контейнеров с одного СМКП на другой в крупных транспортных узлах; формирование маршрутов с учетом стохастических параметров (неравномерность спроса на контейнерные перевозки, случайные отклонения продолжительности движенических и грузовых операций); разработка моделей объединения географически близких регионов в интегрированные контейнерные системы для консолидации контейнеропотока региона в одной точке и сокращения маршрута контейнерного поезда; разработка методик совместного планирования транспортного спроса грузоотправителями и субъектами контейнерного рынка.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Чан, Х. Модель планирования маршрутных контейнерных поездов с грузовыми операциями в пути следования / Х. Чан, Д. И. Кочнева // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №. 4 (48). – С. 46-55.

2. Чан, Х. Методика оптимального размещения контейнеров в поездах при наличии грузовых операций в пути следования/ Х. Чан, Д. И. Кочнева, С.В. Сизый //Мир транспорта. – 2021. – Т. 19. – №. 1 (92). – С. 174-193.

3. Чан, Х. Моделирование продолжительности грузовых операций на станциях маршрута движения сборного маршрутного контейнерного поезда / Х. Чан // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №. 4 (52). – С. 111-117.

В других рецензируемых изданиях:

4. Чан, Х. Модель поиска оптимальных маршрутов сборного маршрутного контейнерного поезда / Х. Чан, Д. И. Кочнева // Инновационный транспорт. – 2021. – №. 3 (41). – С. 15-21.

5. Чан, Х. Технология сборного маршрутного контейнерного поезда поезда / Х. Чан // Современная школа России. Вопросы модернизации. – 2021. – № 6 (37) – С. 143-145.

Основные положения и результаты исследований автором получены самостоятельно. Статьи [3], [5] подготовлены единолично. Личный вклад автора в научных работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: автор лично выдвинул проблему исследования, разработал математический аппарат и апробировал методики на реальных статистических данных об объемах контейнерных перевозок на направлении Китай–Россия.

Чан Хао

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРНЫХ МАРШРУТНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОЕЗДОВ

2.9.1. – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Подписано в печать 18.03.22 Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1,4 Заказ ____ Тираж 100 экз.
Издательство УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.