МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ КОНТЕЙНЕРНОЙ ПЛОЩАДКИ

Савушкин С.А.
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН,
Санкт–Петербург, Россия
ssavushkin@mail.ru

Аннотация. Формализованы представления контейнерной площадки и железнодорожного фронта терминально–логистического центра. Сформулированы задачи перестановки контейнеров и загрузки железнодорожных составов при наименьшем количестве передвижений крана. Отмечено, что эта задача является NP–сложной. Даны формальные определения понятий в терминах теории множеств и представлены алгоритмы планирования перемещений. Выделены возможные тупиковые ситуации при работе некоторых алгоритмов.

Ключевые слова: транспорт, управление, организация, структура, информация, сеть, логистика, терминал, контейнер.

Введение

Терминально–логистический центр (ТЛЦ) – опорный узел железных и автомобильных дорог, предназначенный для управления, перераспределения и стыковки грузопотоков, поступающих разными видами транспорта, осуществляет прием и обработку контейнерных, контрейлерных и комбинированных поездов, обработку, хранение, накопление ремонт и сервис контейнеров. Также ТЛЦ осуществляет складское хранение грузов, техническое обслуживание и сервис средств механизации, таможенные процедуры по досмотру, хранение и оформление грузов. Очевидны преимущества контейнерных, контрейлерных и комбинированных технологий по сравнению с традиционными технологиями сортировки вагонов. Проблемы организационного управления терминально–логистическим центром, как структурой управления транспортной сети рассмотрены в [1]. Методика проведения сценарного моделирования развития транспортного комплекса, порядок разработки сценариев и проведения экспериментов разработаны в [2]. Модель взаимодействия с социально–экономической системой – в [3]. Технологическая концепции создания ТЛЦ предполагает предварительную оценку параметров, таких как объемы прибытия и отправления грузов вагоно– и контейнеропотоки. В соответствии с ней рассчитываются параметры основных объектов терминала, формируются и систематизируются технологические операции по прибытию и отправлению контейнерных поездов [4].

Комплексные информационные технологии автоматизации грузовых терминалов в сегодняшних экономических реалиях способны существенно сократить затраты на логистику. В литературе рассматриваются алгоритмы информационных технологий. В [5] рассматривается технология, при которой контейнерный поезд формируется на станции отправления и следует по установленному маршруту с остановками на промежуточных станциях, где осуществляется снятие контейнеров, прибывших к станции назначения, и установка на их место контейнеров назначением в последующие пункты маршрута. Алгоритм позволяет сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах и, следовательно, повысить скорость грузовых операций при перестановке контейнеров. Для оптимизации расположения контейнеров могут быть применены математические методы – например, метод ветвей и границ [6]. Процесс взаимодействия контейнерного терминала с внешней средой может быть описан [7] в терминах переходов системы из одного состояния в другое, которые выражаются прибытием и отправлением различных видов транспорта. Предложен логический подход [8] к планированию действий для исполнения комплексных мультимодальных услуг грузовых перевозок, в том числе, услуг, по заявкам от разных заказчиков [9]. TOS — операционных систем терминалов – это цифровая система, которая может повысить эффективность работы, что должно привести к увеличению доходов и прибыли [10]. В [11] рассматривается попытка внедрения компьютерных TOS, задачи и их результаты. Лидирующая на российском рынке система Solvo.TOS (Terminal Operating system) позволяет снизить эксплуатационные расходы контейнерного терминала, благодаря: выстраиванию правил и стратегий, вероятностной оценке события, прогнозированию, использованию стратегий размещения контейнеров [12].

Контейнерная площадка является одним из основных функциональных элементов ТЛЦ, промежуточным звеном всех логистических операций с контейнерами. В данной работе проведена формализация представления контейнерной площадки и железнодорожного фронта в терминах теории множеств. Сформулированы задачи минимизации количества передвижений крана при перестановке контейнеров для загрузки железнодорожных составов.

1. Описание технологии

Одним из основных видов деятельности ТЛЦ является обработка контейнеров, поэтому следует учитывать объем контейнеропотоки по прибытию и отправлению, а именно:

- всего контейнеров;
- порожних контейнеров;
- груженых контейнеров;
- контейнеров, доставленных по железной дороге;
- контейнеров, доставленных автомобилями.

При этом необходимо иметь информацию по типам контейнеров. Наиболее распространенными являются следующие [13]:

- двадцатифутовый контейнер (TEU) до 40т;
- сорокафутовый контейнер (FEU);
- контейнер большого размера (45–футовый);
- высокий контейнер (выше 8 футов 6 дюймов);
- широкие контейнеры (шире 8 футов);
- рефрижераторные контейнеры;
- танк–контейнеры.

Для разработки технологической концепции необходимо первоначальное представление об элементах, задействованных в технологии. Можно предположить, что ТЛЦ включает в себя железнодорожный фронт, площадку для временного хранения контейнеров, складской комплекс для переформатирования грузопотоков.

В данной работе будем считать, что ТЛЦ не обрабатывает комбинированные поезда, а только контейнерные. Разгрузка контейнеров производится на площадку или напрямую в другой поезд или в автомобиль заказчика для отправки или в полуприцеп для перемещения по территории ТЛЦ (на другое место площадки, на склад). Соответственно производится погрузка контейнеров [13].

Операции с контейнерами могут производиться с применением козлового крана или специальных погрузчиков – ричстакеров [13]. Далее, приведен предполагаемый перечень операций передвижения контейнеров:

- состав – состав;
- состав – автомобиль заказчика или предоставленный заказчику (для отправки);
- состав – площадка;
- состав – автомобиль ТЛЦ (для перемещения на склад);
- автомобиль заказчика или предоставленный заказчику (доставивший контейнер) – состав;
- площадка – состав;
- автомобиль ТЛЦ (контейнер со склада) — состав;
- площадка–площадка;
- автомобиль заказчика или предоставленный заказчику (доставивший контейнер) – площадка;
- площадка – автомобиль заказчика или предоставленный заказчику (для отправки).

На практике, поступивший на ТЛЦ состав должен быть разгружен и загружен для отправки в обратном направлении, поэтому контейнеров и контрейлеров, оставляемых на месте, практически нет, хотя полностью исключать такую возможность нельзя [13].

Одна из задач оптимизации технологии обработки контейнеров может быть сформулирована следующим образом: имеется несколько контейнерных поездов и некоторое количество контейнеров на площадке, каждый контейнер имеет свою станцию назначения. Необходимо переставить контейнеры так, чтобы сформировать поезда для отправки. При этом минимизировать количество перестановок контейнеров и непродуктивных перемещений погрузочной техники [13].

2. Математические постановки задач

Имеется контейнерная площадка и несколько контейнерных поездов. Площадка состоит из нескольких рядов (M), в каждом из которых находится некоторое количество контейнеров (N). Место на площадке для размещения контейнера будем называть ячейкой. Соответствующий номер ряда и места в ряду – координатами ячейки. Будем считать, что железнодорожный фронт содержит один или несколько поездов. Количество платформ в поезде для размещения контейнеров равно количеству контейнеров в ряду (N). Поэтому можно условно считать, что железнодорожный фронт – это часть площадки с меньшими номерами рядов. Описываемые далее задачи имеют многоходовые решения. Оптимальное решение теоретически можно найти с помощью алгоритма полного перебора, применение которого возможно лишь при небольших размерностях, которые не представляют практического интереса, поэтому применяются эвристические алгоритмы, некоторые из них мы рассмотрим далее. При изложении в формулах используются символы теории множеств и математической логики.

2.1. Планирование перемещений

Будем различать планирование размещений и планирование перемещений. План размещений может быть составлен, например [5], исходя из необходимости сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах и повысить скорость перестановки контейнеров. Пусть планирование размещений контейнеров уже произведено, т.е. для каждого контейнера назначена ячейка. Требуется составить план перемещений такой, чтобы суммарное расстояние, пройденное краном и тележкой крана было минимальным.

Площадка и железнодорожный фронт представим матрицей размещений $A=\{a_{ij}\}$, $i=\overline{1,N}$, $j=\overline{1,M}$, где $a_{ij}=0$ – здесь и далее означает, что данная ячейка пуста; $a_{ij}=(i_1,j_1)\neq(i,j)$ – означает, что данная ячейка содержит контейнер, который должен быть переставлен в ячейку с координатами (i_1,j_1); $a_{ij}=(i,j)$ – означает, что данная ячейка занята, но содержит контейнер, который находится на своем месте и не должен быть переставлен. Обозначим $\tilde{A}=\{a_{ij}=(i_1,j_1)\neq(i,j)\}$ – множество ячеек, контейнеры которых должны быть переставлены, $\ddot{A}=\{a_{ij}=0\,\&\,\neg\exists a_{i_1j_1}=(i,j)\}$ – множество ячеек, для которых не назначены контейнеры.

Матрица A представляет собой план размещений контейнеров. План назовем выполнимым, если последовательно переставляя контейнеры можно преобразовать матрицу A так, что выполнится условие $\tilde{A}=\varnothing$, т.е. все контейнеры займут свои места.

План является выполнимым, если данную матрицу можно представить в виде набора упорядоченных множеств (цепочек), задающих последовательность перемещений. Цепочки имеют вид:

$\left\{A^k=a^k_{i_{n_k}j_{n_k}},a^k_{i_{n_k-1}j_{n_k-1}},\ldots,a^k_{i_1j_1}\right\}$, $a^k_{i_1j_1}=0$, $a^k_{i_lj_l}=(i_{l-1},j_{l-1})$, $l=\overline{2,n_k}$, $k=\overline{1,n}$, где n–число цепочек.

При этом должны выполняться условия:

- $A^i\cap A^j=\varnothing$ – невыполнение этого условия, т.е. $\exists(i,j)\neq(i_1,j_1):(a_{ij}\neq0)\,\&\,(a_{i_1j_1}\neq0)\,\&\,(a_{ij}=a_{i_1j_1})$, содержательно означает, что двум разным контейнерам назначено одно и то же место для перестановки;
- $\tilde{A}\subseteq\bigcup\limits_{k=\overline{1,n}}A^k$ – это условие означает, что все контейнеры будут переставлены.

Алгоритм 1. Проверка выполнимости плана. Исходные данные – матрица размещений A.
Знаком $\oplus$ обозначается конкатенация двух цепочек.
1. l=1, $X=\varnothing$. Элементы матрицы A не помечены.
2. Выбрать любой непомеченный элемент $a_{ij}:a_{ij}\neq0\,\&\,a_{ij}=(i_0,j_0)\neq(i,j)$.
Если выбор возможен, то пометить выбранный элемент, $A^l=[a_{ij}]$. k=0, перейти к 3.
Если выбор невозможен, то перейти к 5.
3. Выбрать непомеченный элемент по координатам $a_{i_kj_k}:a_{i_kj_k}\neq0\,\&\,a_{i_kj_k}=(i_{k+1},j_{k+1})\neq(i_k,j_k)$.
Если выбор возможен, то пометить выбранный элемент, $A^l=A^l\oplus\{a_{i_kj_k}\}$. k=k+1, перейти к 3..
Если $a_{i_kj_k}$ помечен, то перейти к 4.
Если $a_{i_kj_k}=0$, то $X=X\cup\{A^l\}$, l=l+1, перейти к 2.
Если $a_{i_kj_k}=(i_k,j_k)$, то Ячейка занята ($a_{i_{k-1}j_{k-1}}$), перейти к 2.

4. $\exists p: a_{i_{k1}j_{k1}} \in A^p, a_{i_{k1}j_{k1}} = a_{i_k j_k}$

Если $p=l$, то

Если $k1=0$, то Зацикливание (A^l) иначе Конфликт ($a_{i_{k1-1}j_{k1-1}}, a_{i_{k-1}j_{k-1}}$).

Если $p \neq l$, то

Если $k1=0$, то $A^p = A^l \oplus A^p$ иначе Конфликт($a_{i_{k1-1}j_{k1-1}}, a_{i_{k-1}j_{k-1}}$).

перейти к 2.

5. Окончание работы, результат – X.

Если после окончания работы алгоритма не возникло конфликтов, зацикливаний и занятых ячеек, то все контейнеры могут быть переставлены на запланированные места. В случае, если ячейка занята, то контейнер, находящийся в ячейке $a_{i_{k-1}j_{k-1}}$ необходимо удалить из данного процесса. Тогда остальные контейнеры в этой цепочке смогут занять свои места. Если имеется конфликт, то один из контейнеров, находящихся в ячейках $a_{i_{k1-1}j_{k1-1}}, a_{i_{k-1}j_{k-1}}$, соответственно, цепочек p и l необходимо удалить из данного процесса. Тогда остальные контейнеры в этих цепочках смогут занять свои места. В случае зацикливания в цепочке A^l необходимо разорвать цикл, временно удалив один из контейнеров. Тогда остальные контейнеры в этой цепочке могут быть переставлены на свои места. После этого временно удаленный контейнер можно будет вернуть на свое уже освободившееся место. Для временного или постоянного удаления контейнеров из процесса перемещения целесообразно использовать ячейки из множества $\ddot{A}$.

Пусть задан план, который представлен в виде множества цепочек $\{A^k\}$. Каждой цепочке $A^k = a^k_{i_{n_k} j_{n_k}}, a^k_{i_{n_k-1} j_{n_k-1}}, \ldots, a^k_{i_1 j_1}$ можно поставить в соответствие последовательность пар $\overline{A}^k =$ $(a^k_{i_2 j_2}, a^k_{i_1 j_1}), (a^k_{i_3 j_3}, a^k_{i_2 j_2}), \ldots, (a^k_{i_{n_k-1} j_{n_k-1}}, a^k_{i_{n_k-2} j_{n_k-2}}), (a^k_{i_{n_k} j_{n_k}}, a^k_{i_{n_k-1} j_{n_k-1}})$, явно показывающую последовательность перемещений крана (от первого элемента ко второму каждой пары – перемещение с грузом, от второго элемента предыдущей пары к первому элементу следующей – без груза). Построим объединенную последовательность пар $\overline{A}$ такую, что:

$$(\bigcup_{k=1}^{n} \overline{A}^k \subseteq \overline{A}) \,\&\, \forall k((\overline{A} = \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \ldots, \alpha_t, \beta_t, \alpha_{t+1}) \,\&\, (\overline{A}^k = \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_t). \quad (1)$$

Обозначим a_0 – начальное положение крана, $\rho(x, y)$– расстояние между ячейками x и y. Тогда расстояние, пройденное краном при перестановке цепочки контейнеров A^k, будет равно $\sum_{l=2}^{n_k} \rho((i_l, j_l), (i_{l-1}, j_{l-1})) + \sum_{l=1}^{n_k-2} \rho((i_l, j_l), (i_{l+2}, j_{l+2}))$, где первое слагаемое – это перемещение крана с контейнерами, а второе – порожнее перемещение крана.

Расстояние между ячейками может трактоваться обобщенно, например, как:

- собственно, расстояние, которое необходимо пойти крану и тележке крана;
- необходимая для этого энергия;
- время его преодоления передвижением крана и тележки крана.

Поскольку кран и тележки крана могут двигаться одновременно с разной скоростью и длина и ширина контейнера – это разные величины, то время передвижения вычисляется по формуле: $\rho((i_l, j_l), (i_2, j_2)) = \max(a|i_l - i_2|, b|j_l - j_2|)$, а расстояние или необходимая энергия – по формуле: $\rho((i_l, j_l), (i_2, j_2)) = a|i_l - i_2| + b|j_l - j_2|$. Коэффициенты a,b различны для этих двух случаев и зависят от скоростей движения и габаритов контейнера, а именно от таких параметров как. высота подъема, скорость подъема (с грузом), скорость передвижения крана, скорость передвижения тележки.

Более детально нужно учитывать элементы технологического процесса перемещения контейнеров, такие как: застропка, подъем контейнера, передвижение крана и тележки с контейнером, опускание контейнера, отстропка контейнера, сообщение приемосдатчикам координаты контейнера, подъем спредера, передвижение тележки и крана, опускание спредера для застропки. Далее, в примерах будем использовать упрощенную формулу расстояния, а именно: $\rho((i_l, j_l), (i_2, j_2)) = |i_l - i_2| + |j_l - j_2|$

Обозначим $\overline{\overline{A}} = \{\overline{A}\}$. Требуется найти последовательность перемещений крана $\overline{A} = (a_1, a_2), (a_3, a_4), ..., (a_{2v-1}, a_{2v}) \in \overline{\overline{A}}$, удовлетворяющее свойству (1) и обеспечивающую перестановку контейнеров при наименьшем суммарном расстоянии перемещения крана, т.е:

$$\rho(a_0, a_1) + \sum_{l=1}^{v} \rho(a_{2l-1}, a_{2l}) + \sum_{l=1}^{v} \rho(a_{2l}, a_{2l+1}) \xrightarrow[\overline{A} \in \overline{\overline{A}}]{} \min \qquad (2)$$

Эта задача является *NP*–сложной. Рассмотрим алгоритмы, обеспечивающие приемлемое решение.

Алгоритм 2. Последовательная обработка цепочек. Исходные данные – множество цепочек $\left\{ A^k = a^k_{i_{n_k} j_{n_k}}, a^k_{i_{n_k -1} j_{n_k -1}}, ..., a^k_{i_1 j_1},\ k = \overline{1,n} \right\}$, a_0 – начальное положение крана.

1. $b = a_0$, $k=1$, $X=[]$.
2. Выбрать $A^k = a^k_{i_{n_k} j_{n_k}}, a^k_{i_{n_k -1} j_{n_k -1}}, ..., a^k_{i_1 j_1}$.

   Если выбор невозможен, то перейти к 4 иначе перейти к 3.
3. $X = X \oplus [b, a^k_{i_2 j_2}, a^k_{i_1 j_1}, a^k_{i_3 j_3}, a^k_{i_2 j_2}, ..., a^k_{i_{n_k -1} j_{n_k -1}}, a^k_{i_{n_k -2} j_{n_k -2}}, a^k_{i_{n_k} j_{n_k}}, a^k_{i_{n_k -1} j_{n_k -1}}]$, $k = k+1$, $b = a^k_{i_{n_k -1} j_{n_k -1}}$.

   перейти к 2.
4. Окончание работы, результат – X.

Алгоритм не всегда обеспечивает наименьшее суммарное расстояние перемещения крана, что иллюстрирует пример. Пусть матрица A имеет вид (рис.1):

0	0	(2,3)	0	0	(2,6)
(1,6)	(1,3)	0	0	0	0

Рис. 1. Последовательная обработка цепочек

Матрица представлена двумя цепочками: $\{A^1 = [(1{,}3) \quad (2{,}3) \quad 0], A^2 = [(1{,}6) \quad (2{,}6) \quad 0]\}$. Начальное положение крана (1,6).

При последовательной обработке цепочек последовательность перемещений крана будет $\overline{A_1}$ = (1,6),(2,6),(2,1),(1,6),(1,3),(2,3),(2,2),(1,3) и суммарное расстояние перемещения крана будет 1+5+6+3+1+1+2=19. Можно найти другую последовательность перемещений: например, $\overline{A_2}$ = (1,6),(2,6),(1,3),(2,3),(2,2),(1,3),(2,1),(1,6) и суммарное расстояние перемещения крана будет 1+4+1+1+2+3+6=18.

Алгоритм 3. Выбор ближайшей ячейки. Исходные данные – множество цепочек $\left\{ A^k = a^k_{i_{n_k} j_{n_k}}, a^k_{i_{n_k -1} j_{n_k -1}}, ..., a^k_{i_1 j_1},\ k = \overline{1,n} \right\}$, a_0 – начальное положение крана. Символ $\perp$ означает отсутствие значения.

1. $b = a_0$, $X=[]$, $\{l_k = 2,\ k = \overline{1,n}\}$.
2. Построить множество: $\{c_k = \begin{cases} a^k_{i_{l_k} j_{l_k}}, & если\ l_k \le n_k \\ \perp, & если\ l_k > n_k \end{cases},\ k = \overline{1,n}\}$.
3. Если $\exists k : c_k \ne \perp$, то Выбрать $k_0 \in \underset{k=\overline{1,n}, c_{k_0} \ne \perp}{argmin}(\rho(b, c_k))$, $l_{k_0} = l_{k_0} + 1$, иначе перейти к 5.
4. $X = X \oplus [b, c_{k_0}, a^{k_0}_{i_{l_{k_0}-1} j_{l_{k_0}-1}}]$, $b = a^{k_0}_{i_{l_{k_0}-1} j_{l_{k_0}-1}}$, перейти к 2.
5. Окончание работы, результат – X.

Алгоритм не всегда обеспечивает наименьшее суммарное расстояние перемещения крана, что иллюстрирует пример. Пусть матрица A имеет вид (рис.2). Начальное положение крана (1,5).

0	(1,1)	0	0	0	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,10)	0

Рис. 2. Выбор ближайшего контейнера

При выборе ближайшего контейнера последовательность перемещений крана будет $\overline{A_1}$ = (1,5),(1,6),(1,5), (1,7),(1,6),(1,8),(1,7),(1,9),(1,10),(1,2),(1,1) и суммарное расстояние перемещения крана будет 1+1+2+1+2+1+2+1+8+1=20. Если применить другую последовательность $\overline{A_2}$ = (1,5),(1,2),(1,1),(1,6),(1,5),(1,7),(1,6),(1,8),(1,7),(1,9),(1,10), то суммарное расстояние перемещения крана будет 3+1+5+1+2+1+2+1+2+1=19

Пример перемещений в назначенные места (рис.3) для площадки размером 10х10 показывает, что стратегия выбора ближайшего контейнера имеет преимущество перед стратегией произвольного выбора. Координаты ячеек измеряются в интервалах [0,9]. Начальное положение крана (0,0).

	[2,0]	[3,6]	[9,0]		[9,9]	[1,7]	[5,6]		[0,7]
[8,4]	[8,7]	[3,5]	[3,0]	[0,4]		[5,9]	[5,1]	[1,4]	
	[4,7]	[7,8]	[8,0]		[9,1]	[8,5]	[0,8]	[4,1]	
[3,7]		[9,6]	[4,7]				[5,4]		
[0,9]	[5,5]	[9,2]		[3,2]	[8,5]			[9,6]	
		[4,2]		[2,5]			[9,8]		[5,8]
[8,8]	[3,5]	[8,6]		[4,0]	[6,0]	[2,7]	[0,5]		[2,6]
[8,5]		[6,4]	[3,5]	[3,7]	[4,1]	[2,4]	[0,9]	[4,4]	
[5,4]		[8,0]	[6,1]				[2,5]		[5,3]
[9,3]	[7,0]	[7,2]	[3,7]			[2,5]	[2,3]	[0,8]	

а)

[0,1][0,2][0,5][0,7][0,9][1,0][1,2][1,4][1,7][0,6][1,8] [2,1] [2,6] [2,7] [4,0] [4,1][2,8][5,9][1,6][6,0][6,2][6,4][6,5][6,6][6,7][6,9] [7,2][7,6][8,9][9,2][4,2][5,2]
398

[1,0] [7,3] [4,5] [7,6] [1,4] [0,5] [9,8] [1,8] [3,3] [5,7] [8,9] [6,2] [6,7] [0,7] [5,9] [1,7] [4,1] [7,5] [6,0] [6,5] [0,1] [0,2] [1,6] [0,9] [0,6] [7,7]
229

б)

Рис. 3. Перестановки в назначенные места

На рис.3а представлено начальное состояние площадки. На рис.3б последовательности перемещений и суммарные расстояния сверху – для стратегии произвольного выбора, внизу – для стратегии выбора ближайшего контейнера.

2.2. Планирование по направлениям

В данной постановке будем считать, что к контейнерному терминалу прибывают один или несколько железнодорожных составов, которые после перестановки контейнеров отбывают, каждый в своем направлении. Каждый контейнер имеет станцию назначения. Станции назначения сгруппированы по направлениям. В данной постановке задачи каждый контейнер, находящийся на железнодорожной платформе или контейнерной площадке, приписан к определенному направлению. Требуется составить план перемещений такой, чтобы загрузить составы контейнерами, предназначенными для соответствующего направления и при этом суммарное расстояние пройденное краном и тележкой крана в ходе перемещений было бы, по возможности, минимальным.

Введем множество $D=\{d\}$ направлений и отношение $R(i,d)$, где i–номер ряда, соответствующего одному из путей железнодорожного фронта, $d \in D$–направление, по которому в данное время готовится к отправке состав с этого пути. После отправки состава на данный путь может зайти другой состав, назначенный на другое направление. Тогда изменится отношение R. Контейнерная площадка и железнодорожный фронт описываются общей матрицей $A=\{a_{ij}\}$, $i=\overline{1,N}$, $j=\overline{1,M}$, где $a_{ij}=d:\neg R(i,d)$ – означает, что данная ячейка содержит контейнер, который должен быть переставлен в ряд, соответствующего пути железнодорожного фронта в направлении d, при этом в данный момент контейнер не находится на таком пути; $a_{ij}=d:R(i,d)$ – означает, что данная ячейка занята, но содержит контейнер, который находится на своем месте и не должен быть переставлен.

$\overline{A}=\{a_{ij}=d:\neg R(i,d)\,\&\,\exists i_1 R(i_1,d)\}$ – множество контейнеров, которые не находятся на своих местах, но для них существует путь и состав.

Аналогично предыдущей задаче, прежде, чем переставить контейнер в состав, иногда необходимо освободить место на платформе состава. Запишем условия перестановки контейнеров.

Переставить контейнер, не назначенный на направление, с состава на площадку:

$Q_1(i,j,k,l)=\exists d R(i,d)\,\&\,(A(i,j)\neq d)\,\&\,(A(i,j)=d_1)\,\&\,(A(k,l)=0)\,\&\,\forall k_1 \neg R(k_1,d_1)\,\&\,\forall d_2 \neg R(k,d_2)$.

Переставить контейнер с состава на состав:

$Q_2(i,j,k,l)=\exists d R(i,d)\,\&\,(A(i,j)\neq d)\,\&\,(A(i,j)=d_1)\,\&\,(A(k,l)=0)\,\&\,R(k,d_1)$.

Переставить контейнер с площадки на состав:

$Q_3(i,j,k,l)=\forall d \neg R(i,d)\,\&\,(A(i,j)=d_1)\,\&\,(A(k,l)=0)\,\&\,R(k,d_1)$.

Переставить контейнер, назначенный на другое направление, с состава на площадку:

$Q_4(i,j,k,l) = \exists d R(i,d) \,\&\, (A(i,j) \neq d) \,\&\, (A(i,j) = d_1) \,\&\, (A(k,l) = 0) \,\&\, \exists k_1 R(k_1,d_1) \,\&\, \forall d_2 \neg R(k,d_2)$.

Переставить контейнер, находящийся не на своем месте, с состава на свободное место:

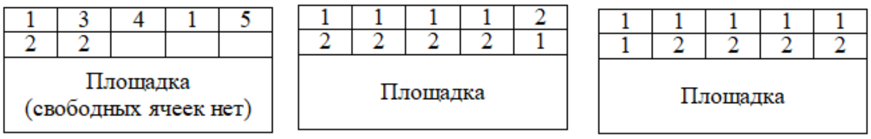
$Q_5(i,j,k,l) = \exists d R(i,d) \,\&\, (A(i,j) \neq d) \,\&\, (A(i,j) = d_1) \,\&\, (A(k,l) = 0)$.

Если контейнер не предназначен для состава, его можно переставить на любое свободное место на контейнерной площадке или на другом составе. План назовем выполнимым, если последовательно переставляя контейнеры можно преобразовать матрицу A так, что выполнено условие $Q = \forall i \forall d (R(i,d) \supset \forall j((A(i,j) = d) \vee ((A(i,j) = 0) \,\&\, \forall k(\forall d_1 \neg R(k,d_1) \supset \forall l(A(k,l) \neq d))))$, т.е. все составы железнодорожного фронта укомплектованы контейнерами. В случае нехватки контейнеров, на путях могут быть пустые ячейки.

Алгоритм 4. Эффективная перестановка. Исходные данные – A,R.

1. N=0
2. Пока $Q_1(i,j,k,l)$ выполнить Переставить (a_{ij},a_{kl}), N=1.
3. Пока $Q_2(i,j,k,l)$ выполнить Переставить (a_{ij},a_{kl}) , N=1.
4. Пока $Q_3(i,j,k,l)$ выполнить Переставить (a_{ij},a_{kl}) , N=1.
5. Если N>0, то перейти к 2
6. Окончание работы (должно выполняться условие Q).

Функция «Переставить(a_{ij},a_{kl})» моделирует перестановку контейнера из ячейки a_{ij}, в свободную ячейку a_{kl}. Алгоритм переставляет с железнодорожного фронта только те контейнеры, которые не должны отправляться этими составами. Алгоритм не совершает лишних перестановок, но в некоторых случаях может не сработать (рис.4).



а) б) в)

Рис. 4. Ситуации, не обрабатываемые алгоритмом

На рис.4а на площадке отсутствуют свободные ячейки и контейнеры, назначенные на направление 2. Алгоритм не позволяет переставить контейнеры с первого ряда железнодорожного фронта на второй контейнеры, назначенные на направления 3,4,5. Данная ситуация возможна при нехватке контейнеров некоторого направления (в данном случае – 2). Если контейнеров достаточно для заполнения составов, то алгоритм не приведет к такому состоянию.

На рис.4б на площадке есть свободные ячейки, но алгоритм не позволяет переставить контейнеры с железнодорожного фронта на площадку. Данная ситуация возможна при условии, что все контейнеры, предназначенные для отправки, прибыли с этими же составами. Если в какой–то момент одна платформа окажется пустой (для погрузки на нее контейнера с площадки), в соответствии с алгоритмом, сначала будет испробована возможность погрузить подходящий контейнер с другого состава.

Аналогично предыдущему примеру, ситуация возникла вследствие прибытия по железной дороге большего количества контейнеров, чем можно отправить на направление 1 (рис.4в).

Алгоритм 5. Гарантированная перестановка. Исходные данные – A,R.

1. N=0
2. Пока $Q_5(i,j,k,l)$ выполнить Переставить (a_{ij},a_{kl}), N=1.
3. Пока $Q_2(i,j,k,l)$ выполнить Переставить (a_{ij},a_{kl}) , N=1.
4. Пока $Q_3(i,j,k,l)$ выполнить Переставить (a_{ij},a_{kl}) , N=1.
5. Если N>0, то перейти к 2
6. Окончание работы (должно выполняться условие Q).

Алгоритм отличается от предыдущего только тем, что разрешает перестановку контейнеров, находящихся не на своем месте, на любое свободное место на контейнерной площадке или на другом составе. Можно показать, что при наличии свободных ячеек, данный алгоритм закончит работу в состоянии, в котором выполняется условие Q. Однако данный алгоритм производит много лишних перестановок, а именно: контейнеры переставляются сначала на площадку, затем с площадки в составы, хотя в ряде случаев возможны перестановки с состава в состав. В некоторых случаях, при невозможности сформировать состав, алгоритм может зациклиться, например, в состоянии, показанном на рис. 4а, на площадке отсутствуют контейнеры направления 1.

Алгоритм 6. Выбор ближайшей ячейки. Исходные данные – *A*.

1. $b = a_0$, $X=[]$, $\{l_k = 2,\ k = \overline{1,n}\}$, $\rho = 0$.
2. Построить множество: $C = \{c_s = (a_{ij}, a_{kl}) : Q_1(i, j, k, l) \vee Q_2(i, j, k, l) \vee Q_3(i, j, k, l)\}$.
3. Если $C \neq \varnothing$, то Выбрать $s_0 \in \underset{s:c_s=(a_{ij},a_{kl})\in C}{argmin(\rho(b,a_{ij}))}$, иначе перейти к 5.
4. $X = X \oplus [b, a_{ij}]$, $\rho = \rho + \rho(b, a_{ij}) + \rho(a_{ij}, a_{kl}), b = a_{kl}$, где $c_{s_0} = (a_{ij}, a_{kl}) \in C$,

Переставить (a_{ij},a_{kl}), перейти к 2.

5. Окончание работы, результат – *X*, *ρ*.

В примере перемещений по направлениям (рис.5) для площадки размером 10x10 железнодорожный фронт связан с рядами 0 и 1.

3			3	2		0	1	4	
	2	3	0	2			0		2
	0				1	3	4	2	1
	0	4	4	3	0	4	2		1
3	0			2	1	1	4	1	0
	4	4	3	3	1	0		0	0
	2		0	0	0	4			
0			3	0			4		3
4	0					4	0	3	
0	1	0				0	4		1

а)

[0, 7] [1, 0] 1 [1, 3] [0, 1] 0 [1, 7] [0, 2] 0 [2, 1] [0, 5] 0 [2, 5] [1, 5] 1 [2, 9] [1, 6] 1 [3, 1] [0, 9] 0 [3, 5] [0, 7] 0 [3, 9] [1, 8] 1 [4, 5] [1, 3] 1 [4, 6] [1, 7] 1 [0, 0] [2, 0] 3 [4, 1] [0, 0] 0 [0, 3] [2, 2] 3 [4, 9] [0, 3] 0 [0, 4] [2, 3] 2 [5, 6] [0, 4] 0 [0, 8] [2, 4] 4 [5, 8] [0, 8] 0 [1, 1] [3, 0] 2 [4, 8] [1, 1] 1 [1, 2] [3, 8] 3 [5, 5] [1, 2] 1 [1, 4] [4, 2] 2 [9, 1] [1, 4] 1 [1, 9] [4, 3] 2 [9, 9] [1, 9] 1
304
[0, 0] [2, 0] 3 [2, 1] [0, 1] 0 [1, 1] [2, 1] 2 [3, 1] [0, 0] 0 [1, 2] [2, 2] 3 [1, 3] [0, 2] 0 [0, 3] [2, 3] 3 [1, 4] [2, 4] 2 [2, 5] [1, 5] 1 [1, 7] [0, 9] 0 [1, 9] [3, 8] 2 [4, 8] [1, 8] 1 [0, 8] [4, 8] 4 [5, 8] [0, 8] 0 [0, 7] [1, 7] 1 [2, 9] [1, 9] 1 [3, 9] [1, 6] 1 [0, 4] [2, 5] 2 [3, 5] [0, 5] 0 [4, 5] [1, 4] 1 [6, 4] [0, 4] 0 [5, 5] [1, 3] 1 [6, 3] [0, 3] 0 [4, 1] [0, 7] 0 [4, 6] [1, 2] 1 [9, 1] [1, 1] 1 [9, 9] [1, 0] 1
195

б)

Рис. 5. Перестановки по направлениям

На рис.5а представлено начальное состояние площадки. На рис.5б последовательности перемещений и суммарные расстояния сверху – для стратегии произвольного выбора, внизу – для стратегии выбора ближайшего контейнера.

2.3. Планирование с ограничениями

При оптимизации контейнерной технологии могут, например, учитываться следующие критерии и ограничения:

- приоритетность погрузки контейнеров (например, по срокам доставки, скоропортящихся, опасных, ценных грузов и др.);
- минимизация пробега погрузочно–разгрузочных машин;
- критерий предпочтения погрузки комплекта, например, с одной датой принятия груза, на одну станцию назначения или от одного клиента;
- критерии погрузки в составе контейнерного поезда;
- доход от обработки контейнера;
- ограничения, определяемые местными условиями работы или прямыми приказами.

Приоритетность погрузки контейнеров может быть формализована в виде штрафа за задержку погрузки. Критерием погрузки в составе контейнерного поезда может быть минимизация пробега разгрузочных машин на промежуточной станции назначения. В этом случае критерием является компактность размещения контейнеров на платформах состава, т.к. от этого зависит время пробега ричстакера при разгрузке. Если контейнеры будут разгружаться на контейнерном терминале, критерием предпочтения погрузки комплекта, например, с одной датой принятия груза, на одну станцию назначения или от одного клиента, будет погрузка комплекта на один состав.

Ограничения, определяемые местными условиями работы или прямыми приказами, формализуются ручным вмешательством должностного лица при объединении контейнеров в комплект и определении срочности погрузки контейнера или комплекта.

Для обработки такого рода ограничений информационная база терминала должна содержать информацию о штрафах и комплектах. В данной постановке матрица *A* имеет вид: $A = \{a_{ij}\},\ i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,M}$, где $a_{ij} = [1, d, S]$ – означает, что данная ячейка содержит контейнер, не включенный в комплект; $a_{ij} = [2, d, S, r]$ – означает, что данная ячейка содержит контейнер, включенный в комплект; $a_{ij}=[3,d,S,r]$ – означает, что данная ячейка содержит контейнер, включенный в комплект для компактной погрузки.

Направление *d*, имеет тот же смысл, что и в предыдущей постановке; *S* – величина штрафа за неотправление контейнера или комплекта; *r* – ссылка на описание комплекта в списке комплектов.

Список комплектов $B=\{b_r=n_r,[i_1,j_1,i_2,j_2,...,i_{n_r},j_{n_r}]\}$, где n_r – количество контейнеров в комплекте; i_l, j_l – координаты контейнера в матрице *A*.

В данном случае необходимо сначала решить задачу размещения контейнеров и комплектов в железнодорожном составе, максимизируя доход и минимизируя издержки. Эта задача является одним из вариантов «задачи о ранце», которая является NP–сложной и решается с помощью эвристических алгоритмов, например, методом «затраты–эффект».

После того как будут определены места размещения контейнеров, можно решать задачу их перемещения, посредством алгоритмов, описанных в п.2.1.

2.4. Многоярусная площадка

В [14] исследуется влияние неравномерности распределения высоты штабеля на эффективность обработки. Практика работы современных контейнерных терминалов показывает [14], что большую часть времени объем хранения на складе составляет 50–70% от емкости контейнерного терминала, а приближение к 80% считается тревожной ситуацией [14]. Таким образом, возникает вопрос об оптимальной стратегии формирования штабелей, минимизирующей трудоемкость обработки контейнеропотока.

Контейнерная площадка и железнодорожный фронт описываются общей матрицей $A=\{a_{ij}\}$, $i=\overline{1,N}$, $j=\overline{1,M}$, где $a_{ij}=k_{ij},[a_{ij1},a_{ij2},...,a_{ijk_{ij}}],k_{ij}<K$, a_{ij1} – контейнер на нижнем ярусе; $a_{ijk_{ij}}$ – контейнер на верхнем ярусе; k_{ij} – число ярусов; K – максимальное число ярусов; $a_{ijk}=d:\neg R(i,d)$ – означает, что данная ячейка содержит контейнер, который должен быть переставлен в ряд, соответствующего пути железнодорожного фронта в направлении *d*, при этом в данный момент контейнер не находится на таком пути; $a_{ijk}=d:R(i,d)$ – означает, что данная ячейка занята, но содержит контейнер, который находится на своем месте и не должен быть переставлен.

$\overline{A}=\{a_{ijk}=d:\neg R(i,d)\wedge\exists i_1 R(i_1,d)\}$ – множество контейнеров, которые не находятся на своих местах, но для них существует путь и состав.

Из [14] следует, что равномерное заполнение штабеля обеспечивает минимальное количество перемещений при выборке. Однако, поддержание равномерного заполнения также требует дополнительных перемещений. Поэтому воспользуемся стратегией алгоритма с выбором ближайшей ячейки, скорректировав понятие расстояния, используя вместо него понятие «затраты».

Пусть требуется переместить контейнер из ячейки a_{ij}, находящийся в ярусе *l* в ячейку $a_{i_1j_1}$ в ярус l_1. Тогда затраты на перемещения без затрат на извлечение контейнера составят $\rho(a_{ijl},a_{i_1j_1l_1})=a|i_l-i|+b|j_l-j|+c(2K+2-l-l_l)$. Перспективы использования данной функции в стратегии выбора ближайшего контейнера, видимо, сомнительные, поскольку здесь предполагается и минимизация вертикальных перемещений, т.е. ячейка с большим количеством ярусов предпочтительнее ячейки с малым их количеством, что не согласуется с принципом равномерного заполнения площадки.

Будем использовать алгоритм выбора ближайшего контейнера, при этом под ближайшим будем понимать контейнер, доступный с минимальными затратами на перемещение к нему и на его извлечение. Пометим ячейки, содержащие контейнеры, предназначенные для текущего железнодорожного фронта (актуальные ячейки) и рассмотрим алгоритм оценки затрат на извлечение контейнера из штабеля.

Алгоритм 7. Затраты на извлечение контейнера. Исходные данные – *A*, актуальные ячейки помечены, $a_{i_1j_1}$, l_1.

1. $\rho=0$.
2. Если $k_{i_1j_1}=l_1$, то Окончание работы, результат – ρ.
3. Выбор непомеченной ячейки $a_{i_2j_2}$ такой, что $\rho(a_{i_1j_1},a_{i_2j_2})=\min\limits_{i=\overline{1,N},\ j=\overline{1,M},k_{ij}<K}(\rho(a_{i_1j_1},a_{ij}))$

4. Если выбор невозможен, то Окончание работы, неудача.
5. Переставить1($a_{i_1 j_1}, a_{i_2 j_2}$), $\rho = \rho + \rho(a_{i_1 j_1}, a_{i_2 j_2})$, перейти к 2.

Функция «Переставить1($a_{i_1 j_1}, a_{i_2 j_2}$)» корректирует информационную базу площадки, в том числе, убирает из $a_{i_1 j_1}$ информацию о верхнем контейнере, переносит ее в $a_{i_2 j_2}$, уменьшает число уровней в ячейки $a_{i_1 j_1}$ на 1, увеличивает число уровней в ячейки $a_{i_2 j_2}$ на 1.

3. Заключение

Формализованы представления контейнерной площадки и железнодорожного фронта терминально–логистического центра. Сформулированы задачи перестановки контейнеров и загрузки железнодорожного фронта при наименьшем количестве передвижений крана. Отмечено, что оптимальное решение таких многоходовых задач может быть найдено только методом полного перебора. Таким образом, эта задача является NP–сложной и при реальных размерах контейнерной площадки – практически не разрешимой. Представленные алгоритмы планирования перемещений описаны в теоретико–множественных терминах. Выполненные расчеты показали, что стратегии выбора ближайшего контейнера существенно сокращают затраты на перемещения, по сравнению со стратегиями произвольного выбора. Проведено сравнение алгоритма, дающего гарантированный результат, но не являющегося эффективным, и алгоритма эффективного, но при определенных ситуациях не достигающего цели. Описаны ситуации на площадке, заслуживающие особого внимания, т.к. являются тупиковыми для некоторых алгоритмов.

Литература

1. *Цыганов В.В., Савушкин С.А.* Терминально–логистический центр как структура управления транспортной сети // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. N 1. – С.13–18.
2. *Savushkin S.* Organization of modeling of the transport complex // Proc. of the 16th International Conference Management of large–scale system development (MLSD). – Moscow, Russian Federation, 2023. – P. 1–5.
3. *Tsyganov V. and Savushkin S.* Modeling the Transport Complex of a Socio–economic System // Proc. of the 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, Russian Federation, 2021. – P. 288–293.
4. *Цыганов В.В., Савушкин С.А., Горбунов В.Г.* Методы обоснования проекта приморского транспортно–логистического кластера // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. –2021. N 2 (18). – С. 37–42.
5. *Кочнева Д.И., Сизый С.В., Чан Х.* Методика оптимального размещения контейнеров в поездах при наличии грузовых операций в пути следования // Мир транспорта. – 2021; N 19(1): – С. 174–193.
6. *Маликов О.В, Гомбосэд Сумхуу*. Контейнеры на терминале: метод ветвей и границ // Мир транспорта. –2013. N 04: – С. 108–113.
7. *Абдувахитов, Ш., Исматуллаев, А., Шихназаров, Ж., & Умарова Д.* К вопросу о функционировании контейнерного терминала // Актуальные вопросы развития инновационно–информационных технологий на транспорте. –2022, N 1(1). – С. 249–252.
8. *Savushkin S.* Logical Aspects of the Transportation Services Catalog // Proc. of the 15th International Conference Management of large–scale system development (MLSD). – Moscow, Russian Federation, 2022, – P. 1–5.
9. *Savushkin S.* Models of Forming and Processing Packages of Transport Services // Proc. of the Twelfth International Conference Management of large–scale system development (MLSD). – Moscow, Russia, 2019. – P. 1–5.
10. *Breskin I. Pandey A.* Marine Terminal Operating Systems // The Digital Transformation of Logistics: Demystifying Impacts of the Fourth Industrial Revolution, IEEE. – 2021. – P. 197–208.
11. *Gekara, V.O., & Nguyen, X.T.* Challenges of Implementing Container Terminal Operating System: The Case of the Port of Mombasa from the Belt and Road Initiative (BRI) Perspective. Journal of International Logistics and Trade. – 2020.
12. Планирование, оценка, прогнозирование: умные алгоритмы TOS для контейнерного терминала // Логистика –2021. – N 11. – С. 26–28.
13. *Савушкин С.А., Горбунов В.Г., Цыганов В.В., Лемешкова А.В.* Технологический и ценовой аудит проекта терминально – логистического центра // Информационные технологии в науке, образовании и управлении, материалы XLIV международной конференции IT+S&E`16. под редакцией Е.Л. Глориозова.– 2016. – С. 47–56.
14. *Кузнецов А.Л., Боревич А.З., Радченко А.А.* Стратегия управления штабелем контейнерного терминала // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 853–860.