

LINER SHIPPING NETWORK DESIGN PROBLEM IN MODERN TRANSPORTATION SYSTEM OF RUSSIA

A. V. Galin, P. S. Rudny

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The liner shipping network design problem is considered in the paper. This problem is particularly relevant in the current global political and economic conditions, where finding optimal solutions for business becomes crucial for survival. State-of-the-art formulations and methods for solving the problem in domestic and international scientific papers are discussed. Four types of liner services such as simple service, “butterfly”, “pendulum” and complex service are described. A simple service that can be reduced to the traveling salesman problem is primarily focused on. Our own formulation of the problem is proposed and an example of liner shipping network description, based on the proposed formulation, is provided. In the example, presented in the paper, a container line, based on a single domestic seaport (Vladivostok) and four seaports in China, is demonstrated. It should be noticed, that the problem includes several optimization sub-problems (such as multi-commodity flow problem), solving which is important for finding best solutions for the designed shipping line, but is outside the bounds of this research. The liner services as a sequence of vessel calls to ports are described; and some results of the foregoing generation process are discussed. The optimal solution is selected from the set of generated solutions. It represents a particular case that simultaneously has the lowest costs for implementing the container line and the highest number of serviced container flows. It is noted that this solution is optimal only within the generated solution space and may not be optimal for the considered example of the problem.

Keywords: container line, line shipping, liner shipping network design problem, shipping line optimization, container service, seaport.

For citation:

Galina, Aleksandr V., and Pavel S. Rudny. “Liner shipping network design problem in modern transportation system of Russia.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.1 (2024): 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.

УДК 656.6

ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛИНИИ В СОВРЕМЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ РОССИИ

А. В. Галин, П. С. Рудный

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрена задача проектирования контейнерной линии, являющаяся особенно актуальной в современных мировых политических и экономических условиях, когда поиск оптимальных решений для бизнеса жизненно необходим. Обсуждаются современные подходы к формулировке задачи проектирования контейнерной линии и методы ее решения, рассматриваемые в отечественной и иностранной литературе. Описываются четыре вида линейных сервисов, встречающихся в рамках проектирования контейнерной линии: простой сервис, «бабочка», «маятник» и сложный сервис. Основное внимание в работе уделено простому сервису, который может быть сведен к задаче коммивояжера. Предложена новая формулировка задачи и на ее основе рассмотрен пример описания проектируемой линии: контейнерная линия, базирующаяся на один отечественный морской порт (Владивосток) и четыре морских порта КНР. Отмечается, что задача может включать другие оптимизационные подзадачи, в том числе задачу распределения множества грузопотоков, решение которых является важным для нахождения рациональных вариантов проектируемой контейнерной линии, но в данной работе не рассматривается, поскольку выходит за пределы настоящего исследования. Описана генерация вариантов линейных сервисов в виде последовательности обхода портов, проанализированы некоторые ее результаты. Среди сгенерированных вариантов выбран оптимальный,

который в виде частного случая одновременно имеет как наименьшие затраты на введение контейнерной линии в эксплуатацию, так и наибольшее количество обслуживаемых контейнеропотоков. Отмечается, что этот вариант является оптимальным лишь в сгенерированной области решений и может не являться оптимальным для рассмотренного примера задачи.

Ключевые слова: контейнерная линия, линейное судоходство, задача проектирования, контейнерная линия, оптимизация судоходной линии, контейнерный сервис, морской порт.

Для цитирования:

Галин А. В. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России / А. В. Галин, П. С. Рудный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.

Введение (Introduction)

В условиях современной мировой экономической и политической ситуации вопрос создания новых и развития существующих транспортных систем Российской Федерации является особенно актуальным. Разработка и внедрение новых технологий перевозки, перегрузки грузов, а также новых подходов к оптимизации их доставки играет немаловажную роль в экономической стабильности страны. Это относится также и к такой сфере, как *линейное контейнерное судоходство*, где оптимизация кругового рейса линии является одной из важнейших задач, от решения которой может зависеть успех целых предприятий.

Задача проектирования контейнерной линии, называемая в зарубежной литературе *Liner Shipping Network Design Problem (LSNDP)*, может быть сформулирована следующим образом: *при наличии множества портов захода, флота судов-контейнеровозов и множества заявок на перевозки между портами необходимо найти такое множество контейнерных сервисов, чтобы суммарные операционные расходы были минимизированы*. При этом все заявки на перевозки должны быть выполнены, т. е. все контейнеры доставлены до их пунктов назначения. Далее данная задача называется LSNDP.

Рассматриваемая задача является NP-трудной, что доказано авторами статьи [1] путем сведения LSNDP к задаче коммивояжера. Сведение данной задачи к задаче коммивояжера отмечается также и в работе [2]. Авторы исследования [3] отмечают, что каждые 3–6 месяцев линейный перевозчик должен адаптировать свой линейный сервис (менять ротацию портов, расстановку флота) в соответствии с прогнозом грузопотоков между портами на следующие 3–6 месяцев.

В зарубежных исследованиях задачи проектирования судоходного сервиса (Shipping Network Design Problem) разделены на два типа: задачи по разработке сервиса трампового судоходства (Tramp Shipping Service Network Design Problem) и задачи по разработке линейного сервиса (Liner Shipping Service Network Problem) [4]. В первом случае разрабатываемый сервис не имеет фиксированной последовательности заходов в порты и расписания работы, во втором — имеются как расписание, так и фиксированная последовательность обхода портов судами.

Авторы обзорной статьи [5] отмечают, что проанализированные ими исследования отличаются друг от друга в основном следующими четырьмя аспектами:

1. *Ограничения времени транзита.* Для каждой потребности в перевозке контейнеров устанавливается связанный с ней временной лимит, который необходимо соблюдать. Если временные ограничения не соблюдаются, то скоропортящиеся грузы могут испортиться.

2. *Стоимость транспортировки.* Затраты на перегрузки являются значительной частью операционных затрат [6], поэтому важно правильно учитывать их в модели.

3. *Отклоненные потребности.* Несмотря на то, что согласно стандартной формулировке LSNDP все заявки на перевозку контейнеров должны проходить через сеть, многие модели позволяют отклонять заявки.

4. *Оптимизация скорости.* Существует три основных подхода к оптимизации скорости судов при моделировании: модели, в которых скорость движения судов постоянна для всех сервисов; модели, в которых скорость подбирается для каждого сервиса отдельно; модели, в которых скорость

подбирается для каждого плеча перевозки внутри каждого сервиса отдельно. Поскольку расход топлива нелинейно зависит от скорости, обычно производится выбор из нескольких дискретных альтернатив скорости, каждая из которых имеет соответствующую стоимость.

Выделяют следующие разновидности вариантов схем организации сервисов [5]:

- *простой сервис* — суда, работающие на линии, заходят во все порты ровно один раз и возвращаются в исходный порт;
- *сервис «бабочка»* — один из портов является хабом, в который суда заходят несколько раз за время одного кругового рейса, в остальные порты суда заходят по одному разу;
- *сервис «маятник»* — суда заходят в каждый порт по два раза: один раз продвигаясь «вперед» по маршруту, второй раз — «назад»;
- *сложный сервис* (в общем случае) — любой сервис, в котором хотя бы один порт захода посещается судами более одного раза.

Данные виды линейных сервисов представлены на рис. 1.

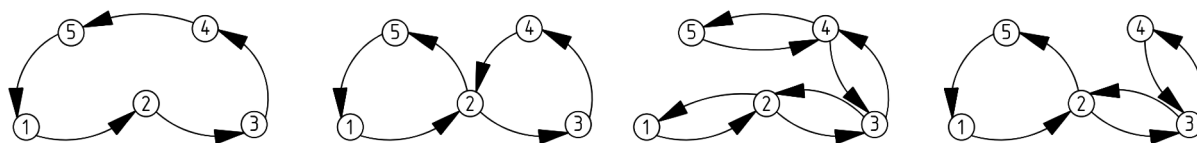


Рис. 1. Варианты схем организации сервисов контейнерных линий:
а — простой сервис; б — сложные сервисы (слева направо):
сервис «бабочка», сервис «маятник», сложный сервис в общем виде

Сервисы, представленные на рисунке, базируются на пять портов и могут быть записаны в виде приведенной последовательности:

- простой сервис: $s = \{1; 2; 3; 4; 5; 1\}$;
- сервис «бабочка»: $s = \{1; 2; 3; 4; 2; 5; 1\}$;
- сервис «маятник»: $s = \{1; 2; 3; 4; 5; 4; 3; 2; 1\}$;
- сложный сервис: $s = \{1; 2; 3; 4; 3; 2; 5; 1\}$.

Среди множества вариантов различных линейных сервисов, которые могут базироваться на заданное множество портов, нетрудно выделить такое подмножество S , в котором сервисы будут являться перспективными с точки зрения оптимальности. Однако при этом даже подмножество заранее выбранных сервисов может иметь значительные размеры — такие, что проверка всех вариантов решений методом полного перебора займет продолжительное время.

Выбор перспективных линейных сервисов может быть подкреплён аналитическими расчетами [7], [8]. Расчеты, представленные в исследовании [7], учитывают не только характеристики судов, размещаемых на линии и потребности в обслуживании контейнеропотоков, но и потребность в парке оборудования (в данном случае имеются ввиду сами контейнеры). В некоторых случаях (особенно при небольшом количестве портов базирования линии) применения таких аналитических методов будет достаточно для определения оптимального варианта организации сервиса.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для решения задачи проектирования контейнерной линии необходимо ввести следующие параметры:

- v — экономическая скорость передвижения судна между портами, уз;
- P_{STS} — производительность перегружателя STS, конт./ ч;
- N — множество портов захода;
- A — матрица переходов между портами;
- a — переход $a = (i, j)$ между портами i и j , $a \in A$;
- D — матрица расстояний между портами;

- d_{ij} — расстояние перехода между портами $i, j \in N$, морские мили;
 T — матрица времени переходов между портами;
 t_{ij} — время перехода между портами $i, j \in N$, ч;
 K — множество контейнеропотоков;
 o_k — порт зарождения контейнеропотока $k \in K$;
 d_k — порт доставки контейнеропотока $k \in K$;
 q_k — размер потребности в обслуживании контейнеропотока $k \in K$, TEU;
 V — множество расчетных типов судов;
 u_v — контейнеровместимость расчетного типа судна $v \in V$, TEU;
 m_v — количество доступных для фрахтования судов типа $v \in V$, ед.;
 c_v — стоимость заключения чартера на работу судна типа $v \in V$ на линии, у. е.;
 KN — матрица потребностей в обслуживании контейнеропотоков из множества K между портами из множества V ;
 η_{ki} — потребность в обслуживании контейнеропотока $k \in K$ относительно порта $i \in N$, TEU;
 $c_{\text{пер } a}$ — стоимость перехода судна $a = (i, j)$ из порта i в порт j , у. е.;
 $c_{\text{ПС}i}$ — стоимость обслуживания судна в порту i , у. е.;
 S — множество сгенерированных линейных сервисов. При этом генерация сервисов может быть ограничена правилами (например, при генерации простого сервиса судно должно посетить все порты только один раз);
 s — линейный сервис $s \in S$ (записывается в виде последовательности обхода портов);
 q_{bs} — размер контейнеропотока $b \in K$, обслуженного сервисом $s \in S$, выраженный в TEU.

В матрицу D вносятся данные о расстояниях морских переходов между портами, имеющиеся в открытом доступе либо взятые из таблиц расстояний между морскими портами. В матрицу времени переходов между морскими портами i и j вносятся значения $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v}$. В матрицу потребностей в обслуживании контейнеропотоков между портами (KN) вносятся значения следующим образом:

$$\eta_{ki} = \begin{cases} q_k, & \text{если } i = o_k; \\ -q_k, & \text{если } i = d_k; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где η_{ki} — потребность в обслуживании контейнеропотока $k \in K$ в порту $i \in N$, TEU.

В соответствии с формулой (1), если порт i оказался источником зарождения грузопотока k ($i = o_k$), то значение потребности η_{ki} должно быть равно значению размера контейнеропотока q_k , TEU. Если порт i оказался местом доставки грузопотока k ($i = d_k$), то значение потребности η_{ki} должно быть равно по модулю и противоположно по знаку размеру контейнеропотока: $-q_k$, TEU. Во всех остальных случаях порт i не является ни источником, ни местом доставки грузопотока k и $\eta_{ki} = 0$.

При генерации сервиса $s \in S$ происходит подсчет расходов на сгенерированный сервис. Данные расходы состоят из трех основных составляющих: стоимость чартера судна при его размещении на линии (вычисляется один раз для сервиса), c_v ; стоимость обслуживания судна (портовые сборы) при совершении судозахода в порт, $c_{\text{ПС}i}$ (вычисляется для каждого судна и каждого порта); стоимость перехода судна $a = (i, j)$ из порта i в порт j (вычисляется для каждого плеча перехода $a = (i, j)$, входящего в состав сервиса s), $c_{\text{пер } a}$:

$$c_s = c_v + \sum_{i=1}^{n_s} c_{\text{ПС}i} + \sum_{a=1}^{m_s} c_a, \quad (2)$$

где c_s — суммарные расходы на работу сервиса s , у. е.;

n_s — количество портов захода, входящих в сервис s , ед. (при этом если порт захода повторяется в сервисе несколько раз (сложный сервис), то порт учитывается тоже несколько раз (при подсчете n_s и при подсчете расходов));

m_s — количество переходов между портами, входящими в сервис (зависит от количества портов захода, входящих в сервис, ед.)

Необходимо отметить, что в состав задачи проектирования контейнерной линии входит задача распределения грузов по проектируемой сети, называемая в иностранной литературе *задачей распределения множества грузопотоков* (Multi-Commodity Flow Problem, MCFP) [9]. В случае дробных грузопотоков эта задача может быть решена за полиномиальное время. При большом количестве разновидностей грузопотоков данная задача может быть достаточно ресурсоемкой для вычисления. В связи с этим она не решается в рамках настоящего исследования, так как в сформулированной задаче отсутствует необходимость максимизировать использование судов для транспортировки контейнеров — вместо этого вместимость одного судна делится на три равные части. Каждая часть предназначена для обслуживания лишь одного из всех возможных контейнеропотоков $k \in K$. При этом контейнеропотоки, обслуживаемые одним и тем же сервисом, не могут повторяться, т. е. $b_1 \neq b_2 \neq b_3$, где $b_1, b_2, b_3 \in K$. Контейнеропотоки b_1, b_2, b_3 генерируются для каждого сервиса случайным образом.

Отсутствие оптимизации задачи MCFP отражается на формулируемой задаче проектирования контейнерной линии в виде появления *нерациональных судозаходов*. Это означает, что согласно модели, разработанной в настоящем исследовании, судно заходит в некоторый порт несмотря на то, что в нем нет ни погрузки, ни выгрузки контейнеров.

Для каждого порта, входящего в сервис s , определяется количество контейнеров, погружаемых на борт судна (q_k) или выгружаемых с борта судна ($-q_k$). Для этого применяется формула (1) для каждого из трех контейнеропотоков b_1, b_2, b_3 , обслуживаемых сервисом s . Однако для использования формулы (1) необходимо учитывать количество одновременно генерируемых сервисов.

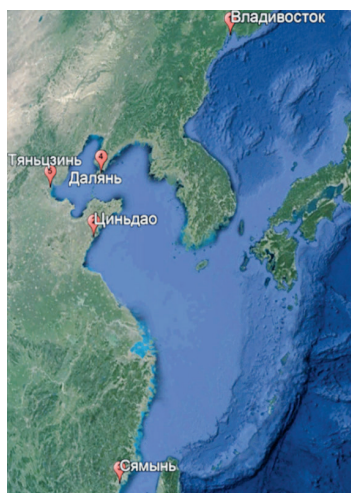
В объеме формулируемой задачи количество одновременно генерируемых сервисов равно общему количеству доступных судов всех типов — $\sum_{v \in V} m_v$, т. е. всегда используется весь доступный

флот. В этом случае, если контейнеропоток k имеет размер $q_k < \sum_{v \in V} u_v$, то одновременная генерация

сервисов может привести к некорректным решениям, поскольку несколько сервисов одновременно могут обслуживать один и тот же контейнеропоток, что может привести к тому, что суммарный обслуженный контейнеропоток по всем сервисам будет больше, чем потребность в его обслуживании, а это невозможно. Во избежание этого матрица потребностей в обслуживании контейнеропотоков между портами (KV) генерируется не один раз, а для каждого сервиса в отдельности. Один из сервисов (логично выбрать тот, на котором размещается самое крупное судно) имеет наиболее высокий приоритет. Для него матрица KV генерируется по формуле (1). Для каждого следующего сервиса z матрица KV генерируется пошагово с понижением приоритета, а также учетом того, какие контейнеропотоки и в каком размере были обслужены ранее.

Результаты (Results)

Предложенная формулировка задачи проектирования контейнерной линии продемонстрирована на следующем примере. Рассмотрим возможную контейнерную линию, базирующуюся на пяти морских портах. Выберем для этого порт Владивосток и четыре порта Китайской Народной Республики (КНР). Такой выбор обусловлен современными экономическими и политическими условиями, в которых товарооборот между РФ и КНР вырос на 30 % за 2022 г. [10], что способствует развитию транспортных коридоров именно на этом географическом направлении. Выбранные порты и информация о переходах между ними представлены на рис. 2.



		1	2	3	4	5
	<i>D</i> , мор. миль	Владивосток	Циньдао	Сямынь	Далянь	Тяньцзинь
1	Владивосток		1001	1390	1048	1193
2	Циньдао	1001		846	356	412
3	Сямынь	1390	846		1002	1147
4	Далянь	1048	356	1002		198
5	Тяньцзинь	1193	412	1147	198	
	<i>T</i> , ч	Владивосток	Циньдао	Сямынь	Далянь	Тяньцзинь
1	Владивосток		50,1	69,5	52,4	59,7
2	Циньдао	50,1		42,3	17,8	20,6
3	Сямынь	69,5	42,3		50,1	57,4
4	Далянь	52,4	17,8	50,1		9,9
5	Тяньцзинь	59,7	20,6	57,4	9,9	

Рис. 2. Пример базирования контейнерной линии в пяти портах

Предположим, что при проектировании линии доступно три типа судов с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики судов при проектировании контейнерной линии

Расчетный тип судна	Вместимость, TEU	Доступное кол-во судов, ед.	Стоимость чартера, у. е.	Регистровый тоннаж, рег. т
<i>V</i>	<i>u_v</i>	<i>m_v</i>	<i>c_v</i>	<i>GRT</i>
1	500	3	10000	7000
2	1000	2	20000	14000
3	2000	1	40000	28000

Информация о семи требующих обслуживания контейнеропотоках приведена в табл. 2.

Таблица 2

Данные о контейнеропотоках, требующих обслуживания

Контейнеропоток	Порт зарождения	Порт назначения	Размер контейнерного потока, TEU
<i>K</i>	<i>o_k</i>	<i>d_k</i>	<i>q_k</i>
1	1	5	150
2	2	4	400
3	1	3	550
4	3	1	1000
5	5	2	1500
6	4	2	500
7	2	5	350

Как видно из табл. 1, общее число доступных судов равно 6 ед. Это означает, что число одновременно генерируемых сервисов также равно шести. Экономическая скорость судна принята равной 20 уз для всех судов и переходов между портами. Стоимость топлива принята равной 80 у. е. за 1 т, стоимость портовых сборов за судозаход — около 0,33 у. е. за 1 рег. т для порта Владивосток. Для четырех портов КНР стоимость судозахода генерируется на основе стоимости судозахода во Владивосток, к которой добавляется случайное значение.

Пример генерируемого сервиса представлен в виде табл. 3. Данный сервис является простым, т. е. судно, размещенное в таком сервисе, должно совершить ровно по одному судозаходу в каждый порт. Генерировались только простые сервисы. В табл. 3 выделена последняя строка,

в которой генерируется последовательность судозаходов. Последний порт в последовательности совпадает с первым и, таким образом, сервис является *циклическим*. В столбце «Количество нерациональных судозаходов» указывается количество судозаходов, смысл которых, как отмечалось ранее, отсутствует из-за отказа от решения задачи МСФР. Для приведенного примера таким судозаходом является заход в порт 4 (Далянь), где судно не производит операций по погрузке / выгрузке контейнеров. Данный недостаток предложенной формулировки задачи требует дальнейшего решения.

Таблица 3

Пример генерируемого сервиса

Тип судна $v = 3$	Контейнеропотоки портов сервиса						Расходы всего, у. е.	Кол-во нерациональных судозаходов	Всего конт. обслужено, TEU
	1-й порт	2-й порт	3-й порт	4-й порт	5-й порт	1-й порт			
Контейнеропоток b1,	5								
TEU	0	-667	0	0	667				667
Контейнеропоток b2,	7								
TEU	0	350	0	0	350				350
Контейнеропоток b2,	4								
TEU	-667	0	667	0	0				667
Количество слотов для одного контейнеропотока, $uv / 3$	667								
Сумма контейнеропотоков	-667	-317	667	0	317				
Нерациональные судно-заходы	0	0	0	1	0			1	
Расходы на чартер судна							40000		
Расходы на переходы между портами	0	6265	6776	6677	5060	5928	30707		
Расходы на судозаходы	0	2836	2951	2555	2274	2259	12875		
Сервис 6	1	2	3	4	5	1	83582	1	1684

Генерации сервисов могут быть многократно повторены, например, благодаря средствам VBA для Excel. В рамках данного примера повтор генерации шести сервисов выполнен 100 раз. По результатам собраны данные о составе каждого сгенерированного простого сервиса (по шесть сервисов в одной генерации), о суммарных расходах на шесть сервисов, определенных по формуле (2), о суммарном количестве нерациональных судозаходов и о суммарном размере контейнеропотока, обслуженного шестью сервисами. Результаты генераций в графической форме представлены на рис. 3.

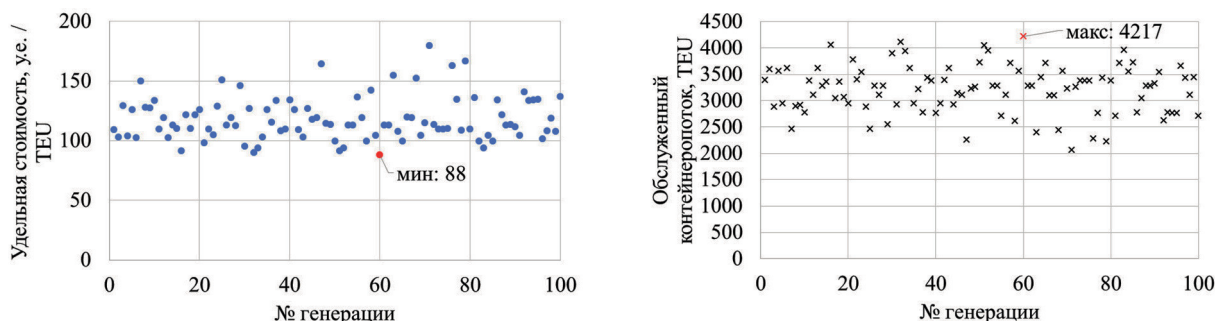


Рис. 3. Результаты ста повторных генераций шести сервисов, базирующихся на пять портов

Помимо указанных ранее показателей для каждой генерации выведен показатель удельных расходов на введение в работу шести сервисов, который определяется как отношение суммарных расходов для шести сервисов к суммарному обслуженному контейнеропотоку шести сервисов и выражается в у. е. / TEU.

Обсуждение (Discussion)

Наиболее успешной генерацией сервисов может считаться та, для которой удельные расходы (у. е. / TEU) являются минимальными. Такой генерацией в рассматриваемом случае является № 59, для которой удельные расходы составляют 88 у. е. / TEU. Поскольку суммарные расходы для генераций отличаются несущественно, так как генерируются только простые сервисы, в которые входят одни и те же порты заходов, № 59 также является генерацией с максимальным обслуженным контейнеро-поток, равным 4217 TEU. В нее входят следующие шесть сервисов:

- Далянь → Тяньцзинь → Циньдао → Владивосток → Сямынь → Далянь (судно 1);
- Циньдао → Тяньцзинь → Далянь → Владивосток → Сямынь → Циньдао (судно 1);
- Циньдао → Сямынь → Далянь → Тяньцзинь → Владивосток → Циньдао (судно 1);
- Сямынь → Далянь → Владивосток → Циньдао → Тяньцзинь → Сямынь (судно 2);
- Сямынь → Циньдао → Владивосток → Далянь → Тяньцзинь → Сямынь (судно 2);
- Тяньцзинь → Сямынь → Далянь → Владивосток → Циньдао → Тяньцзинь (судно 3).

Представленные варианты размещения судов являются наиболее рациональными для сгенерированных ста вариантов расстановок судов по шести сервисам. Однако необходимо отметить, что указанные варианты расстановки не исчерпывают область возможных решений. Оптимальное решение может находиться за пределами рассматриваемых случаев, предназначенных лишь для демонстрации разнообразия сервисов с точки зрения их показателей даже для небольшого числа портов. Кроме того, в генерациях не участвуют сложные сервисы, наличие которых многократно усложняет задачу оптимизации проектируемой контейнерной линии.

Заключение (Conclusion)

На основе результатов проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. В настоящей статье сформулирована задача проектирования контейнерной линии. Были обсуждены основные положения данной проблемы, отмеченные в отечественной и иностранной литературе. Сформулированная задача является лишь первым шагом на пути к построению оптимальной контейнерной линии.
2. В рамках данного исследования не рассматриваются алгоритмы оптимизации контейнерной линии. Задача оптимизации линии включает необходимость решения оптимизационных задач нескольких уровней, в том числе задачи распределения множества грузопотоков (MCFP).
3. Для рассмотренного примера построения контейнерной линии на основе введенной формулировки с пятью портами: портом Владивосток и четырьмя портами КНР, выполнено сто повторных генераций построения контейнерной линии со случайными комбинациями сервисов; предлагается оценивать эффективность варианта построения контейнерной линии на основе показателя удельных расходов на перемещение 1 TEU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brouer B. D. A base integer programming model and benchmark suite for liner-shipping network design / B. D. Brouer, J. F. Alvarez, C. E. Plum, D. Pisinger, M. M. Sigurd // *Transportation Science*. — 2014. — Vol. 48. — Is. 2. — Pp. 281–312. DOI: 10.1287/trsc.2013.0471.
2. Галин А. В. Модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма / А. В. Галин, А. С. Малыхин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.
3. Huang Y. F. Liner services network design and fleet deployment with empty container repositioning / Y. F. Huang, J. K. Hu, B. Yang // *Computers & Industrial Engineering*. — 2015. — Vol. 89. — Pp. 116–124. DOI: 10.1016/j.cie.2015.01.021.

4. *Ulhaq M. N. D.* A Liner Shipping Network Design Problem: A Systematic Literature Review / M. N. D. Ulhaq, A. Sudiarso // *Journal of Industrial Engineering and Education*. — 2023. — Vol. 1. — Is. 2. — Pp. 171–184.
5. *Christiansen M.* Liner shipping network design / M. Christiansen, E. Hellsten, D. Pisinger, D. Sacramento, C. Vilhelmsen // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 286. — Is. 1. — Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.
6. *Karsten C. V.* The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design / C. V. Karsten, D. Pisinger, S. Ropke, B. D. Brouer // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2015. — Vol. 76. — Pp. 122–138. DOI: 10.1016/j.tre.2015.01.005.
7. *Кузнецов А. Л.* Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.
8. *Чан Нгок Ту.* Обоснование состава контейнерного флота при линейной организации транспортно-го судоходства / Н. Т. Чан // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2012. — № 1. — С. 62–69.
9. *Salimifard K.* The multicommodity network flow problem: state of the art classification, applications and solution methods / K. Salimifard, S. Bigharaz // *Operational Research*. — 2022. — Vol. 22. — Pp. 1–47. DOI: 10.1007/s12351-020-00564-8.
10. *Цыганов В. В.* Модели и методы адаптации транспортной инфраструктуры России в условиях санкций / В. В. Цыганов // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022). Труды Пятнадцатой международной конференции / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна*. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2022. — С. 87–99. DOI: 10.25728/mlsd.2022.0087.

REFERENCES

1. Brouer, Berit D., J. Fernando Alvarez, Christian E. M. Plum, David Pisinger, and Mikkel M. Sigurd. “A base integer programming model and benchmark suite for liner-shipping network design.” *Transportation Science* 48.2 (2014): 281–312. DOI: 10.1287/trsc.2013.0471.
2. Galin, Aleksandr V., and Aleksandr S. Malykhin. “Genetic algorithm-based linear routes optimization model.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.
3. Huang, You-Fang, Jian-Kun Hu, and Bin Yang. “Liner services network design and fleet deployment with empty container repositioning.” *Computers & Industrial Engineering* 89 (2015): 116–124. DOI: 10.1016/j.cie.2015.01.021.
4. Ulhaq, Muhammad Naufal Daffa, and Andi Sudiarso. “A Liner Shipping Network Design Problem: A Systematic Literature Review.” *Journal of Industrial Engineering and Education* 1.2 (2023): 171–184.
5. Christiansen, Marielle, Erik Hellsten, David Pisinger, David Sacramento, and Charlotte Vilhelmsen. “Liner shipping network design.” *European Journal of Operational Research* 286.1 (2020): 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.
6. Karsten, Christian Vad, David Pisinger, Stefan Ropke, and Berit Dangaard Brouer. “The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 76 (2015): 122–138. DOI: 10.1016/j.tre.2015.01.005.
7. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. “Assessment of container ship and equipment fleet size.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.
8. Tran Ngoc Tu. “Substantiation of container fleet’s structure at the linear organization of transport navigation.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2012): 62–69.
9. Salimifard, Khodakaram, and Sara Bigharaz. “The multicommodity network flow problem: state of the art classification, applications, and solution methods.” *Operational Research* 22 (2022): 1–47. DOI: 10.1007/s12351-020-00564-8.
10. Tsyganov, V.V. “Modeli i metody adaptatsii transportnoi infrastruktury Rossii v usloviyakh sanktsii.” *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2022). Trudy Pyatnadsatoy mezhdunarodnoi konferentsii*. Edited by S. N. Vasil'ev, and A. D. Tsvirkun. M.: Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN, 2022. 87–99. DOI: 10.25728/mlsd.2022.0087.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

Рудный Павел Сергеевич — аспирант

Научный руководитель:

Галин Александр Валентинович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: pavelrudny@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

Rudny, Pavel S. — Postgraduate

Supervisor:

Galin, Aleksandr V.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: pavelrudny@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2023 г.

Received: December 4, 2023.