

Моделирование процессов размещения и управления портовой инфраструктурой в условиях Крайнего Севера



О. А. Изотов,
канд. техн. наук, доцент
кафедры портов
и грузовых терминалов
Государственного
университета морского
и речного флота (ГУМРФ)
им. адм. С. О. Макарова



А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой
портов и грузовых
терминалов ГУМРФ
им. адм. С. О. Макарова



Д. Л. Головцов,
заведующий лабораторией
кафедры Системного
анализа и логистики
Санкт-Петербургского
Государственного
университета
аэрокосмического
приборостроения

Вопросы развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) принимают сегодня стратегический характер и состоят в поисках эффективного подхода к экономическому освоению, формированию на основе северной портовой инфраструктуры доступной и устойчивой транспортной системы. Для решения этой задачи авторы предлагают использовать схему транспортной инфраструктуры «ступица и спица» (hub and spoke), которая может быть описана средствами математического моделирования.

Главной задачей государства в сфере развития транспорта является создание условий для экономического роста и повышения конкурентоспособности национальной экономики, что достигается обеспечением доступа к безопасным и качественным транспортным услугам, а также использованием географических особенностей России в качестве ее конкурентного преимущества.

В связи с этим особое внимание со стороны государства и Минтранса России уделяется развитию АЗРФ.

Современная Арктика с ее колоссальными природными богатствами, включающими минерально-сырьевые, топливно-энергетические, лесные и биологические ресурсы, является стратегическим регионом северного полушария. В нем тесно переплетаются экономические и политические интересы России и других Арктических государств – США, Канады, Дании, Норвегии, а также целого ряда стран Европейского Союза и Тихоокеанского региона.

Классификация и функционирование арктических портов

Развитие региона, не имеющего наземной транспортной инфраструктуры, с необходимостью обусловлено наличием, состоянием и последующим развитием инфраструктуры портов (рис. 1). В настоящее время возможна их следующая классификация:

- базовые коммерческие порты, осуществляющие обычную коммерческую грузоперевалку каботажных, экспортно-импортных грузов, а также обеспечивающие перевалку грузов, необходимых для жизнедеятельности районов Арктики и Крайнего Севера (например, Архангельск и Мурманск);
- порты для осуществления северного завоза, расположенные в местностях, где отсутствуют сухопутные коммуникации, в основном обеспечивающие только перевалку грузов, необходимых для жизнедеятельности обслуживаемых территорий (например, Анадырский морской порт, единственный на Чукотке выполняет речные перевозки генеральных, навалочных и наливных грузов в пункты верховья рек Анадырского бассейна);
- односторонние сырьевые порты для вывоза леса и полезных ископаемых Севера России (например, терминал «РН-Архангельскнефтепродукт», порт Харасавей, обслуживающий Харасавейское газоконденсатное месторождение);
- двусторонние сырьевые порты, снабжающие сырьем промышленные предприятия и осуществляющие вывоз



Рис. 1. Портовая инфраструктура западной части российской Арктики

продукции (порт Дудинка обслуживает Норильский горно-металлургический комбинат им. А. П. Завенягина, промышленное предприятие в отраслях добычи полезных ископаемых и металлургии цветных металлов, на данный момент полностью входит в состав ОАО ГМК «Норильский никель»);

- точечные рейдовые причалы, такие как танкер-накопитель «Белокаменка» (Мурманск, принадлежит «Роснефти»); танкер-накопитель нефтепродуктов «Натали» (ОАО «Мурманское морское пароходство»); стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал Варандей («ЛУКОЙЛ»);

- строящиеся порты, через которые производится адресный завоз стройматериалов, к примеру, порт Сабетта, строящийся в рамках проекта добычи и сжижения газа «Ямал-СПГ» для перевалки газа со Штокмановского месторождения «Газпром добыча шельф». В «Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» предусмотрен ряд аналогичных проектов: строительство порта Индига, реконструкция комплекса по перевалке апатитового концентрата, минеральных удобрений, а также угольного терминала порта Мурманск [1–3].

Эффективное функционирование будущих портовых комплексов во многом будет зависеть от решения следующих задач:

- формирования доступной и устойчивой транспортной системы как инфраструктурного базиса для обеспечения транспортной целостности, независимости, безопасности, социально-экономического роста;
- создания условий для углубления экономической интеграции и повышения мобильности трудовых ресурсов;
- снижения совокупных транспортных издержек, в том числе за счет повышения эффективности функционирования различных видов транспорта;
- приведения уровня качества и безопасности перевозок в соответствие с требованиями экономики и лучшими мировыми стандартами на основе технологического и технического развития транспортной системы;
- повышения инвестиционной привлекательности.

Исходя из поставленных задач, наиболее актуальным представляется обеспечение современной инфраструктурой нефтегазовых проектов, замкнутых на

морские порты, по всей протяжённости береговой линии. Речь идет о создании и размещении на прибрежной территории шельфовых месторождений промышленных и технологических объектов, образующих взаимосвязанную технико-технологическую и транспортную систему и обеспечивающих снабжение строительными материалами, техникой, оборудованием, металлоконструкциями, ГСМ, химреагентами, трубами и кабелями месторождений побережья, а также шельфовых нефтегазовых проектов.

Известно, что концентрированная система с одним мощным терминалом, обслуживающим транспортные потоки, требует меньших капиталовложений и последующих затрат на содержание, чем система децентрализованная с двумя и более терминалами. Кооперирование даёт экономию за счёт ликвидации дублирования устройств, не зависящих от размеров грузооборота, более интенсивного использования техники и сооружений.

Следовательно, основными инфраструктурными подразделениями эффективной транспортной сети являются портовые перегрузочные комплексы и логистические терминалы. Соответственно, решающее значение при сокращении транспортных расходов приобретает задача правильной конфигурации транспортной инфраструктуры и оптимальное размещение портовых перегрузочных комплексов и терминалов, связывающих в единое целое всю транспортную систему и являющихся пунктами перевалки грузов между наземными транспортными средствами и морскими судами, а также морскими линейными судами и фидерными судами [4].

Схема такой транспортной инфраструктуры, которая из-за схожести с колесом получила название «ступица и спица» (hub and spoke), показана на рис. 2, где индексами i и j обозначены пункты отправления и назначения, а

индексами k и m — взаимосвязанные перегрузочные комплексы и логистические терминалы.

Таким образом, возникает необходимость построить математическую модель задачи размещения перегрузочных комплексов и логистических терминалов применительно к рассматриваемым условиям Крайнего Севера.

Построение математической модели

Транспортная система, представленная на рис. 2, может быть описана с помощью моделей размещения терминалов и p -хаб медианы, которые развились из хорошо известных и изученных моделей размещения предприятий и p -медианы.

Данная транспортная система состоит из трёх основных компонентов: функциональных узлов, терминалов и дуг. Функциональные узлы — это все узлы сети, которые могут быть точками и отправления, и получения, а также могут быть выбраны как места для размещения терминалов.

Дуги, соединяющие функциональные узлы и терминалы, должны обладать следующими свойствами:

- каждый функциональный узел должен соединяться, как минимум, с одним терминалом;
- действительный путь должен существовать между всеми терминалами.

Эти два свойства обеспечивают существование пути между всеми узлами отправления и получения грузопотока.

Также для функциональных узлов в распределительных системах «многие ко многим» при организации и управлении транспортными потоками применяют три основные стратегии [5]:

- каждый пункт отправления/получения может быть прикреплен только к одному терминалу;

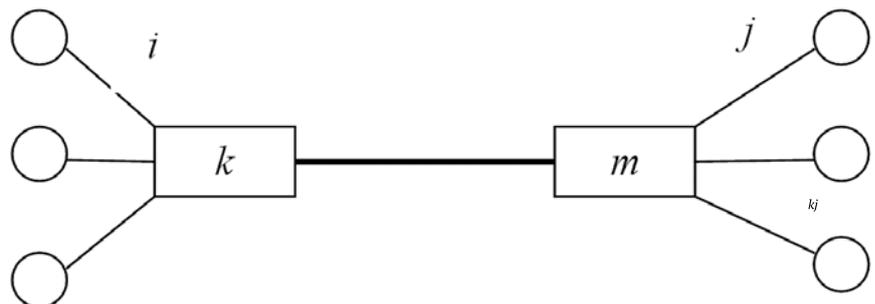


Рис. 2. Схема перевозок по системе «ступица и спица» (hub and spoke)

- каждый пункт отправления/получения может взаимодействовать сразу с несколькими терминалами;
- каждый пункт отправления/получения может взаимодействовать с другими пунктами напрямую.

В современных условиях имеются два способа прямой доставки грузов в районы Крайнего Севера: только воздушным транспортом, а для большого количества строительных материалов, оборудования и генеральных грузов — только морскими судами или судами смешанного плавания «река-море» через промежуточные узлы. Для расчетов необходимо использовать модель без прямых связей и с возможностью доставки грузов от грузоотправителя к грузополучателю через разные терминалы.

Модель, удовлетворяющая данным условиям, может быть представлена в виде целочисленной модели линейного программирования с двумя типами переменных и четырьмя ограничениями [6]. Первый тип переменных — это четырёхиндексные бинарные переменные, означающие, через какие терминалы будет проложен маршрут от одного узла к другому. Второй тип — это одноиндексные бинарные переменные, указывающие на то, что данный узел выбран в качестве терминала.

В данной модели целевая функция минимизирует суммарные транспортные расходы при известном количестве терминалов, где постоянная величина C_{ijkm} определяет стоимость транспорти-

ровки единицы груза между пунктами отправления/получения и терминалом (c_{ik}, c_{mj}) , а также между терминалами (c_{km}) , т. е. представляется в виде суммы $c_{ik} + c_{mj} + \alpha c_{km}$, где α — показатель эффекта масштаба (экономия за счёт масштабов операций).

Ограничения гарантируют, что все маршруты между узлами отправления/получения проходят, как минимум, через один терминал (сумма размещённых терминалов должна быть равна заданному количеству), также маршрут не может пройти через терминал до тех пор, пока тот не открыт.

Однако в данной модели необходимо учесть, что в реальной транспортной системе Крайнего Севера пригодные для перевалки и временного хранения транзитные узлы определены заранее, а не выбираются из всех возможных функциональных узлов. Данная модель будет отличаться от предыдущей тем, что месторасположение терминалов в транспортной инфраструктуре определено заранее, а не выбирается в процессе вычислений.

Тогда для данной модели нахождение оптимального расположения терминалов будет сводиться к нахождению маршрута наименьшей стоимости между каждой парой узлов через данные терминалы. Существует множество постановок данной задачи. Применим достаточно апробированный алгоритм Флойда, который находит кратчайшие пути между всеми

вершинами взвешенного ориентированного графа [7].

Пусть $H = \{h_1, h_2, \dots, h_p\}$ — множество узлов, являющихся терминалами. Рассмотрим граф транспортной сети с рёбрами длиной l_{ij} для каждой пары узлов (i, j) , где $l_{ij} = \infty$, если $i, j \notin H$; $l_{ij} = c_{ij}$, если $i \notin H, j \in H$ или $i \in H, j \notin H$; $l_{ij} = \alpha c_{ij}$, если $i, j \in H$. Определим матрицу D^k размером $n \times n$, где элементы матрицы d_{ij}^k являются кратчайшими расстояниями (путями с наименьшей стоимостью) от узла i к j через первые k терминалов. На начальном этапе элементы матрицы определяются следующим образом: $d_{ij}^0 = l_{ij}$ и $d_{ii}^0 = 0$ для любого i , затем для $k = 1, \dots, p$ последовательно находятся элементы матрицы D^k из элементов матрицы D^{k-1} по следующей рекурсивной формуле:

$$d_{ij}^k = \min \{ d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}, d_{ij}^{k-1} \}.$$

На каждой итерации запоминаются соответствующие маршруты. После перебора всех возможных терминалов получается конечная матрица D^p , содержащая кратчайшие расстояния (пути с наименьшей стоимостью) между всеми узлами сети, а также восстанавливаются соответствующие кратчайшие маршруты при помощи данных, сохранённых на предшествующих итерациях, и стоимость доставки груза из пункта i в пункт j рассчитывается как $w_{ij} d_{ij}^p$, где w_{ij} — количество груза, которое необходимо доставить из пункта i в пункт j . Структура данных, соответствующих начальной матрице D^0 , представлена в таблице, где $n = m + p$.

Первый квадрант таблицы представляет собой матрицу расстояний (равных ∞ , кроме главной диагонали) между пунктами отправки и получения груза размером $m \times m$, второй квадрант — матрицу расстояний между пунктами отправки и получения и терминалами размером $m \times p$, третий квадрант — собой матрицу, транспонированную к предыдущей, четвёртый квадрант — матрицу $p \times p$ расстояний между терминалами.

Из таблицы видно, что данную модель можно использовать для задач более общего вида, когда коэффициент α — показатель эффекта масштаба — не одинаков, и для каждой пары терминалов может применяться свой коэффициент α_{ij} , т. е. $l_{ij} = \alpha_{ij} c_{ij}$, если $i, j \in H$.

Если необходимо предусмотреть прямые воздушные перевозки, то в модель целочисленного линейного программирования добавляется двухин-



Рис. 3. Сроки доставки грузов снабжения из базовых портов

Структура данных модели

	1	2	...	m	1	2	...	p
1	0	∞	...	∞	l_{11}	l_{12}	...	l_{1p}
2	∞	0	...	∞	l_{21}	l_{22}	...	l_{2p}
...
m	∞	∞	...	0	l_{m1}	l_{m2}	...	l_{mp}
1	l_{11}^H	l_{21}^H	...	l_{m1}^H	0	l_{12}^H	...	l_{1p}^H
2	l_{12}^H	l_{22}^H	...	l_{m2}^H	l_{21}^H	0	...	l_{2p}^H
...
p	l_{1p}^H	l_{2p}^H	...	l_{mp}^H	l_{p1}^H	l_{p2}^H	...	0

дексная переменная, означающая прямую доставку из одного пункта в другой, что усложняет процесс вычислений. Так как в реальных условиях Крайнего Севера прямые доставки возможны только в отдельные, специально оборудованные пункты, для моделирования данной ситуации необходимо использовать ещё одну дополнительную двухиндексную переменную, а целевая функция будет представлять собой не линейную, а квадратичную целевую функцию, что ещё более усложняет задачу [8].

Однако в предложенной модели, использующей алгоритм Флойда, данное

требование достаточно легко реализуется подстановкой в первом квадранте матрицы D^0 (см. таблицу), соответствующей стоимости прямой доставки.

Крайне важно для рассматриваемого географического региона учесть тот факт, что отдельные терминалы в транспортной сети не могут быть связаны между собой. Реализация этого условия для предложенной модели с использованием алгоритма Флойда в отличие от квадратичной модели также достаточно тривиально реализуется подстановкой бесконечно большого числа в соответствующей ячейке четвёртого квадранта матрицы стоимостей D^0 . ■

Литература

- Новикова А. А. Анализ и перспективы развития арктических портов России // Системный анализ и логистика на транспорте: Материалы 2-й Межвуз. науч.-практич. конф. СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014.
- Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2010 г. № 2205-р «О Стратегии развития морской дея-

тельности Российской Федерации до 2030 года».

- Проект «Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» одобрен Морской коллегией при Правительстве Российской Федерации 31 окт. 2012 г.
- Персианов В. А., Скалов К. Ю., Усков Н. С. Моделирование транспортных систем. М.: Транспорт, 1972. 208 с.
- O'Kelly M. E., Miller H. J. The hub network design problem: a review and synthesis // J. Transp. Geography. 1994. № 2. P. 1–40.
- Campbell J. F. Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems // European J. Opnl. Res. 1994. N 72/ P. 387–405.
- Sohn J., Park S. Efficient solution procedure and reduced size formulations for p-hub location problems // European J. Operational Esearch. 1998. № 108. P. 118–126.
- Aykin T. Networking Policies for Hub-and-Spoke Systems with Application to the Air Transportation System // Transp. Sci. 1995. P. 201–221.

IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

АРКТИКА: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

10-11
декабря 2014

Crowne Plaza St. Petersburg Airport
Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Стартовая, 6 А

ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ ГОДА

ФОРМИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ПОВЕСТКИ

РАЗВИТИЕ / ИНФРАСТРУКТУРА / ТЕХНОЛОГИИ / ИННОВАЦИИ / ИНВЕСТИЦИИ / КАДРЫ
ТРАНСПОРТНО-ТРАНЗИТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ / РЕСУРСЫ / ЭКОЛОГИЯ / КОРЕННЫЕ НАРОДЫ