УДК 004.4:656.073

М. Б. ГУЗАИРОВ, В. А. ТАРАСОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ПОСТАВОК В СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

В строительной индустрии при транспортировке грузов (материалов) часто возникают ситуации, когда нужно найти оптимальные маршруты по одному или нескольким критериям. На разных этапах строительства могут возникать разные модели. Содержательному описанию таковых посвящена статья. Для каждой из задач намечены пути решения. Как правило, они основаны на методах решения оптимизационных задач на графах. Вместе с тем для некоторых видов поставок предложены новые подходы. *Интеллектуальная интеграция ; экспертная система ; аппаратная организация*

ВВЕДЕНИЕ

Оперативное управление логистикой строительных компаний призвано обеспечить закупку материалов, их распределение и доставку на объекты по транспортной сети. Обеспечение четкого выполнения основных и сопутствующих логистических модулей, управление в этой среде в итоге нацелены на создание добавленной стоимости. В логистической цепи поставок выделяются три основных составляющих: *снабжение, физическое распределение* и *обеспечение*.

Снабжение. Связано с приобретением материалов и строительного оборудования у поставщиков или непосредственно на заводах-изготовителях.

Важная роль при этом принадлежит *моделям прогнозирования*. Исходными данными для составления прогнозов служат результаты статистической обработки прежних проектов с учетом ценовой политики. Многие компании занимаются прогнозированием спроса. Существуют десятки различных подходов для прогнозов, тем не менее любую процедуру прогноза можно отнести к одному из следующих четырех [1].

Оценочный подход к прогнозированию заключается в предположении, что правильный ответ известен эксперту и он с некоторым отклонением от истины способен его оценить. Этот подход применим в хорошо отлаженных компаниях с богатой историей.

Экспериментальный подход к прогнозированию спроса хорошо работает в новых компаниях, когда еще нет информации, на основе которой можно строить прогноз. Подход заключается в том, чтобы провести эксперимент на одном, двух объектах, изучить и оценить спрос и экстраполировать результаты на большее количество объектов.

Причинно-следственный подход опирается на предположение, что потребители приобретают жилье по определенной причине, зависящей от их статуса и материальной возможности.

Подход с помощью временных рядов. Процедуры с использованием временных рядов применяются к данным, представляющим продольный срез. Его сущность состоит в предположении, что изменение спроса повторится со временем. При этом не требуется выявление причин изменения, факторов спроса и проведения эксперимента. Ситуация спроса соответствует различным шкалам его измерения: дихотомической, ординальной, счетной и интервальной.

Оптимизационные задачи выявить на этом этапе не удается, прогнозы строятся на достаточно большой плановый период.

Физическое распределение связано с обслуживанием потребителей (в данном случае строителей) и включает в себя обработку заказов каждого из них, формирование общественных заказов (о. заказов) с учетом возможностей транспортных средств (ТС) при условии направленности загрузки и выгрузки. Это возможно только при известных транспортных маршрутах. Что касается последних, то для их поиска применяются различные оптимизационные модели, отвечающие определенным ситуациям при расчете маршрутов. Этим моделям и методам решения соответствующих задач и посвящена настоящая статья.

Обеспечение — деятельность, поддерживающая процессы поставки и использования материальных ресурсов: загрузку, транспортировку, хранение и своевременную доставку запасов. Требуется гибкая координация между производителями, складированием и физическим распределением материалов.

Эти проблемы и другие вопросы логистической цепи поставок хорошо изучены ([1]), известны методы решения возникающих задач. Вместе с тем, модули логических систем часто разрабатываются на интуитивном уровне, без применения строгих расчетов и методов оптимизации. С другой стороны, включение неадаптированных математических моделей и методов также не приносит желаемых результатов.

Таким образом, требуется разработка логистико-ориентированных методов решения оптимизационных задач. В этой связи мы рассмотрим комплекс задач физического распределения, непосредственно связанных с маршрутизацией в условиях ограничений, обеспечивающих максимальное приближение к реальности.

1. СЕТЕВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ МОДЕЛЬ

В качестве основной приведем модель организации поставок материалов, осуществляемых отделом снабжения некоторой строительной компании.

Задана транспортная сеть, состоящая из m узлов (перекрестков, значимых объектов, тупиков и т. д.) и n звеньев, связывающих пары узлов. Для каждого звена s заданы два вещественных числа: d_s и t_s, имеющие смысл протяженности звена и (или) времени его прохождения. Некоторые из узлов помечены. Для них заданы числа b_{ik}, $i = \overline{1,m}$, $k = \overline{1,q}$. Если $b_{ik} > 0$, то в i-м узле расположен завод или склад, располагающий материалом k-го вида в количестве b_{ik}.

Если же $b_{ik} < 0$, то в i-м узле расположен строительный объект и его заказ на материал k-го вида составит $|b_{ik}|$. Таким образом, для каждого узла i задан q-мерный вектор. Требуется на сети решить две задачи: составить план перевозки материалов по сети, минимизирующий суммарный пробег транспортного средства и составить расписание доставки грузов каждому потребителю. Это так называемая многопродуктовая сетевая транспортная модель.

Приведенная ситуация моделируется на графах $\Gamma(V;\overline{S})$. Каждому узлу $i = \overline{1,m}$ сопоставим вершину графа $v_i \in V$; звену $s = \overline{1,n}$ — ориентированную дугу $s = (i_s, j_s)$. Тогда транспортной сети отвечает ориентированный граф $\Gamma(V;\overline{S})$, некоторые из узлов которого помечены, а дугам приписаны веса d_s. Обозначим $D = (d_1, d_2, \dots d_n)$. Можно сказать, что задан взвешенный граф $\Gamma(V;\overline{S}, D)$ и подмножество $\widetilde{\Gamma} \subset \Gamma$ с помеченными вершинами. Причем для каждой вершины $v_i \in \widetilde{V}$ задан вектор $\beta_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots b_{ik}, \dots , b_{iq})$.

Будем считать, что $\sum\limits_{i=1}^{m} b_{ik} = 0, k = 1, q$. Вершины, помеченные положительными числами называют *начальными* (*источниками*), отрицательными — *конечными* (*стоками*).

Требуется найти множество маршрутов, каждый из которых предназначен для движения одной или нескольких машин с целью выполнения заказов клиентов с минимальными транспортными расходами и найти расписание движения ТС по маршрутам, минимизирующее время исполнения поставок. Что касается маршрутов, то они могут быть индивидуальными (материал не может сочетаться с другими грузами) или *консолидированными*, когда одним ТС перевозят несколько видов груза. Особенности этих двух моделей и сопутствующие им задачи рассмотрим ниже.

2. ОДНОПРОДУКТОВАЯ СЕТЕВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ЗАДАЧА

Если в приведенной многопродуктовой модели речь идет о транспортировке только одного продукта, а веса дуг пропорциональны их длинам, то тогда мы имеем классическую транспортную задачу в сетевой постановке. Она хорошо известна, и для ее решения Л. В. *Канторович* предложил в 1938 г. метод потенциалов [2]. Последний является модификацией линейного программирования. Базисному решению задачи, а следовательно, и допустимому отвечает *остовное* дерево D, покрывающее граф Г. Вершины графов Г и D совпадают, а любая дуга s из D принадлежит также графу Г. Для поиска *покрывающего* дерева известен простой метод Прима [3], с помощью его модификаций можно найти и *минимальное покрывающее дерево*; распределить по нему грузы, решая систему линейных уравнений

$$\sum_{s \in N_i^+} x_s - \sum_{s \in N_i^-} x_s + \beta = 0\,, \qquad (1)$$

где N_i^+ и N_i^- — множество дуг, входящих в вершину i и выходящих из нее, а $\beta = (b_1, b_2, \dots , b_m)$ — ассортиментный вектор, и вычислить суммарную длину дуг остовного дерева. Однако с учетом количества перевозимого груза по каждой дуге найденное значение целевой функции, равное $\sum_{s\in D} x_s d_s$ не является оптимальным. Оптимальному решению соответствует другое покрывающее дерево, которое можно найти методом потенциалов.

Если нет особых трудностей в поиске оптимального решения, то они возникают на этапе его реализации. Оказывается необходимым составить совокупность маршрутов, по которым будут передвигаться транспортные средства (ТС). Так возникает в сети поставок задача *декомпозиции дерева* на *маршруты* [4].

3. ТРАНСПОРТИРОВКА КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ГРУЗОВ

Другим примером рассматриваемой модели служит следующая ситуация реальной перевозки совмещенных грузов. Для оснащения вспомогательных помещений в строящихся объектах санитарной техникой и кухонным оборудованием оформляется заказ на поставку грузов средних и мелких габаритов (плиты, ванны, унитазы, смесители, краны и т. д.). При этом приносит экономию формирование *консолидированных* заказов для каждого используемого ТС. Такие заказы состоят из крупногабаритных изделий и дополняются мелкими, упакованными в отдельные коробки. Для каждого ТС оформляется общественный заказ (о.заказ) консолидированных партий грузов. Склады могут быть расположенными за пределами одного района города и даже страны. Очередной рейс заключается в последовательном прохождении ТС помеченных складов для загрузки товаров и строящихся объектов для разгрузки.Если на некоторых складах требуется загрузить оборудование различных видов и (или) их комплектующие, то задача выбора оптимального маршрута становится многопродуктовой.

Приведенная ситуация перевозки консолидированных грузов является наиболее запутанной и сложной в схеме физического распределения товаров. Она интерпретируется взвешенным ориентированным графом, см. рис. 1, вершины которого отвечают узлам транспортной сети, а звенья — дугам. При этом наряду с дугой s имеется симметричная ей дуга s'. Весу d_s дуги S отвечает стоимость перевозки загруженного автомобиля по этой дуге.

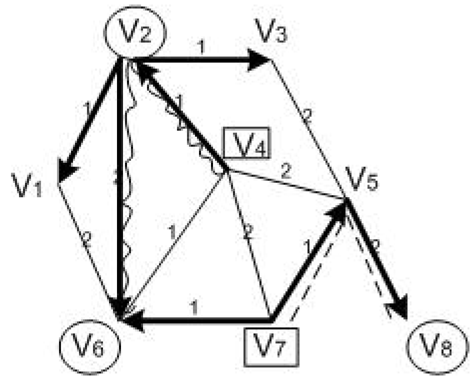

Рис. 1. Интерпретация на графах транспортных маршрутов

На рис. 1 вершины V_4 и V_7 отвечают пунктам распределения заказов (складам, производственным объектам). Эти пункты помечены знаком □. Вершины V_2, V_6, V_8 — строительные площадки (клиенты), они помечены ◯. Пункты V_1, V_3 и V_5 — промежуточные, они никак не помечены.

Таким образом мы имеем два истока, трех клиентов (потенциальных стоков) и три промежуточных пункта. Дуги остовного дерева изображены сплошными стрелками. На этом же рисунке показаны два маршрута, один из V_4, другой — из V_7: V_4 V_2 V_6; длины 3; V_7—V_5—V_8, длины 3, изображенные соответственно волнистой и пунктирной линиями. В этом случае протяженность маршрутов менее суммарной длины дуг остовного дерева, которая равна 10 км.

Относительно многопродуктовой модели известно, что отвечающая ей оптимизационная задача поиска минимальных маршрутов при условии реализации поставок оборудования всех видов является NP-полной. Следовательно, переборного алгоритма полиномиальной сложности для ее решения не известно [3]. Поэтому многие авторы применяют для ее решения метаэвристики. В рассматриваемом случае таковой может служить любой эволюционный алгоритм. Что касается конструирования маршрутов, то оно осуществляется по схеме: построение для каждого вида товара случайного остовного дерева; расчет объемов перевозок по его дугам; декомпозиция дерева на маршруты; синтез маршрутов и вычисление их длины для всех товаров.

4. ЗАДАЧА О КРАТЧАЙШЕМ ПУТИ

Рассматривается транспортная сеть, которая интерпретируется связным орграфом. Каждой дуге сети приписано вещественное число, имеющее смысл длины дуги (стоимости пробега ТС по дуге). Узлы (вершины графа) могут быть также помечены вещественными числами, несущими смысл объемов поставки (вывоза) в i-й пункт (из i-го пункта) сети. Задача о кратчайшем пути является фундаментальной проблемой теории сетей. Рассматриваются следующие типы задач о кратчайшем пути: кратчайший путь между двумя произвольными узлами сети; кратчайшие пути от фиксированной вершины, например, истока до всех других вершин. Для нахождения кратчайшего пути известны различные методы, в том числе хорошо зарекомендовал себя алгоритм Дейкстры с локальным индексированием [3]. В нашем случае задача о кратчайшем пути применяется в следующем формате.

В приведенной транспортной модели исходный граф Г имеет большое количество вершин, подавляющее большинство из которых интерпретируется промежуточными пунктами. Желательно исключить их из общей сети и ограничиться пунктами производства и потребления перевозимых материалов. Это можно сделать с помощью алгоритма нахождения кратчайшего пути от заданной помеченной вершины до всех других помеченных вершин графа. В результате в преобразованном графе Г' останутся только помеченные вершины, а для связывающих их виртуальных дуг путь достигает минимума. Заметим, что при этом преобразованный Г' оказывается полным. Это можно избежать, находя оптимальные пути между близкими друг к другу вершинами, определяя некую окрестность помеченной вершины.

Трансформированная сеть имеет существенно меньшую размерность и на ней легко решаются приведенные выше задачи.

В качестве примера, уберем из сети, изображенной на рис. 1, промежуточные пункты. Преобразованный граф приведен на рис. 2.

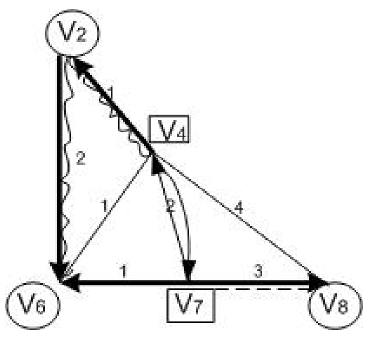

Рис. 2. Преобразованные граф, дерево и маршруты

Жирной линией изображены дуги остовного дерева, волнистой и пунктиром указаны маршруты: $V_4 \to V_2 \to V_6$ длина 3 км; $V_7 \to V_8$; длина 3 км. Общая протяженность маршрутов – 6 км., она совпадает с той, что получена на сети рис. 1. Результат решения не зависит от преобразования графа. Трудоемкость решения на преобразованном графе становится существенно меньше.

5. ЗАДАЧА КОММИВОЯЖЕРА

Эта задача представляет поиск дешевого способа обхода множества пунктов с возвращением в исходную вершину. Стоимость проезда от каждого пункта до любого другого считается симметричной. Требуется найти порядок, в котором надо посетить все строительные площадки (клиенты) и склады производителей-поставщиков. Эта задача является NP-трудной и для ее решения не существует точного алгоритма полиноминальной сложности. Решение задачи отвечает ситуации единственного маршрута, по которому, как правило, следует одно ТС. Объемы перевозок определяются следующим способом: ТС загружается материалом на складе производителя, затем по собственному графику посещает строительные площадки и оставляет в них заказанное количество материалов. После полного обхода клиентов ТС возвращается на базу. Часто рассматривается более простая задача определения искомой последовательности клиентов, когда ТС не обязано вернуться на склад после выполнения заказов клиентов.

В сложных сетях предлагается разделение множества строительных объектов на зоны. Деление на зоны можно осуществить с помощью алгоритма, сходного с кластеризацией. Тогда задача коммивояжера решается для каждой из зон. Одним из важных условий применения задачи коммивояжера является *единовременность доставки заказа*, означающее «заказ на одну строительную площадку должен быть доставлен одним ТС». Если это невозможно, то составляется два или более различных заказов.

6. МАКСИМАЛЬНЫЕ ПОТОКИ В СЕТИ

Задана некоторая сеть. Каждой дуге сети соответствует число, имеющее смысл пропускной способности дуги или продолжительности выполнения некоторой работы. Среди вершин имеются две специальные: источник и сток сети. Сеть представлена ориентированным графом без контуров. Задача о максимальном потоке состоит в определении наибольшей величины потока (критический поток), который проходит из источника в сток. Алгоритм нахождения максимального потока принадлежит Форду и Фалкерсону [5].

Если сеть — ориентированный взвешенный граф без контуров, то она описывает некий сетевой график выполнения комплекса работ (проекта). На такой сети становятся и решаются двойственные задачи линейного программирования: *задача* о *критическом пути*, и *кратчайшем сроке выполнения проекта*. Одновременно определяется интервальное расписание исполнения событий (вершин графа), т. е. оказывается решенной задача о расписании выполнения заказов. Эти задачи могут быть решены как с помощью аппарата линейного программирования, так и с помощью модификации алгоритма Форда-Фулкерсона. При этом находит ранний и поздний сроки наступления событий.

7. ПРИМЕР РАСЧЕТА МАРШРУТОВ

Пусть транспортная сеть представляет симметричный граф Г. Вначале сеть имеет 45 узлов, из которых 1 и 7 являются пунктами производства кирпича; 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 — строительными площадками. Остальные пункты — транзитные. На этапе 0 рассчитаны кратчайшие пути между помеченными узлами сети с помощью алгоритма Дейкстры. В результате построен полный симметричный ориентированный граф Г с $m = 11$ вершинами. Фрагмент списка дуг графа приведен в табл. 1. На рис. 3 изображен соответствующий этой таблице граф.

Данные об объемах поставок кирпича на каждую из строительных площадок представлены в табл. 2.

На полученном графе Г (рис. 3) построим, используя алгоритм Прима, минимальное остовное дерево. Дерево изображено на рис. 3 жирными линиями. Информация о дереве размещена в табл. 3. Длина дуг дерева 18 км.

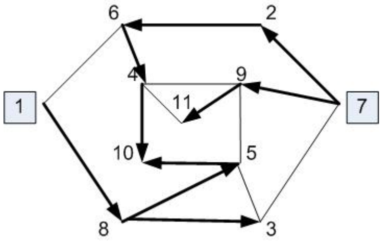

Рис. 3. Фрагмент сети и дерево поставок

Таблица 1

Фрагмент списка дуг графа

N дуги s	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i_s, j_s	1,6	2,7	3,8	1,8	2,6	3,7	1,4	5,9	4,10
длина дуги d_s	5	2	3	2	1	3	5	3	2
s	10	11	12	13	14	15	16	17	18
i_s, j_s	4,6	2,9	9,11	4,9	4,11	5,10	7,9	3,5	5,8
d_s	2	3	1	5	7	2	1	3	2

Таблица 2

Количество единиц заказанного / производимого кирпича

N пункта i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Количество кирпича b_i	180	-30	-70	-50	-40	-60	220	-50	-40	-30	-30

Таблица 3

Построение допустимого дерева

Алгоритм Прима Остовное дерево			Решение системы уровней	Допустимое решение	
s	$i_s; j_s$	d_s	x_s	$i'_s; j'_s$	x'_s
5	2,6	1	120	2,6	120
2	2,7	2	-150	7,2	150
16	7,9	1	70	7,9	70
12	9,11	1	30	9,11	30
10	4,6	2	-60	6,4	60
9	4,10	2	10	4,10	10
15	5,10	2	20	5,10	20
18	5,8	2	-60	8,5	60
4	1,8	2	180	1,8	180
3	3,8	3	-70	8,3	70

Уравнение (1), записанные по остовному дереву, и имеют вид:

$$i = 1 : -x_4 + 180 = 0\,;$$
$$i = 2 : -x_5 - x_2 - 30 = 0\,;$$
$$i = 3 : -x_3 - 70 = 0\,;$$
$$i = 4 : -x_{10} - x_9 - 50 = 0\,;$$
$$i = 5 : -x_{15} - x_{18} - 40 = 0\,;$$
$$i = 6 : x_5 + x_{10} - 60 = 0\,;$$
$$i = 7 : x_2 - x_{16} + 220 = 0\,;$$
$$i = 8 : x_3 + x_4 + x_{18} - 50 = 0\,;$$
$$i = 9 : x_{16} - x_{12} - 40 = 0\,;$$
$$i = 10 : x_9 + x_{15} - 30 = 0\,;$$
$$i = 11 : x_{12} - 30 = 0\,;$$

Решения x_s этой системы размещены в 4-м столбце табл. 3. Некоторые из них отрицательные. Изменим направления соответствующих им дуг и разместим их в 6-м столбце табл. 3. В последнем столбце записаны положительные компоненты x'_s, представляющие допустимое решение задачи.

Остается построить маршруты движения транспорта. Каждый маршрут начинается в пункте производства. Совокупность маршрутов, представленная на графах движения на рис. 4, получена в результате декомпозиции остовного допустимого дерева

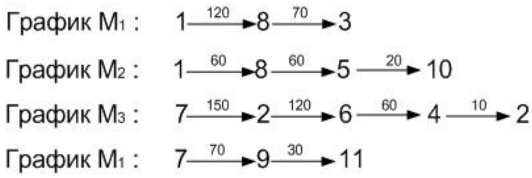

Рис. 4. Маршруты поставок

Общая протяженность маршрутов — 22. При решении задачи эволюционным алгоритмом было построено дерево протяженностью 18. В этом случае маршруты M_1 и M_2 заменяются на один $M'_1 : 1 \to 8 \to 3 \to 5 \to 10$, в дополнении с M_3 и M_4 общая протяженность 19. Это решение оптимальное.

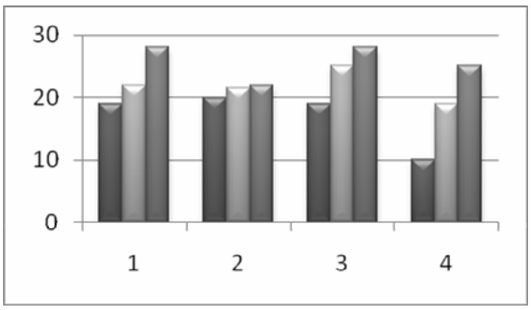

Рис. 5. Гистограмма эффективности маршрутов

Экономия по сравнению с первым допустимым решением составляет 13,6%, а с произвольными маршрутами доходит и до 25%, что показано на гистограммой на рис. 5.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны содержательные постановки транспортных моделей на сетях. Они часто встречаются в логистических системах. В качестве основной рассматривается многопродуктовая транспортная модель, которая представляет NP-трудную проблему. Приведены ее частые случаи, допускающие быстрое получение оптимального решения. Описаны подходы к решению многопродуктовой задачи. Статья раскрывает подходы к созданию подсистемы поставок в общей схеме транспортной логистики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Джонсон, Д. С.** Современная логистика / Д. С. Джонсон, Д. Ф. Вуд // М. : Вильямс. 2005. 624 с.
2. **Канторович, Л. В.** Математические методы организации и планирования производства / Л. В. Канторович. Л. : ЛГУ, 1939. 68 с.
3. **Ху, Т. Ч.** Комбинаторные алгоритмы / Т. Ч. Ху, М. Т. Шинг. Н.-Новгород : Изд-во Нижегор. гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского, 2004. 330 с.
4. **Гузаиров, М. Б.** Оптимизация транспортных потоков в сети поставок строительных материалов / М. Б. Гузаиров, В. А. Тарасова // Информационные технологии и автоматика. 2008. (в печати).
5. **Форд, Л.** Потоки в сетях / Л. Форд, Д. Фулкерсон. М. : Мир, 1966. 276 с.

ОБ АВТОРАХ

Гузаиров Мурат Бакеевич, ректор, проф. каф. выч. техн. и защ. инф. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по упр. в соц. и экон. системах. Иссл. в обл. сист. анализа, упр. в соц. и экон. системах.

Тарасова Виктория Андреевна, асп. УГАТУ. Дипл. инф.-экон. по инф. системам в экономике (УГАТУ, 2006). Готовит дис. в обл. инф. систем и логистики.