УДК 658.7

А.Ю. Тюрин, профессор, д-р экон. наук
(КузГТУ, г. Кемерово)
Tyurin A.Yu., professor, D.Sc. (Economy)
(KuzSTU, Kemerovo)

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕЛИ МНОГОЭШЕЛОННОЙ ДОСТАВКИ ПРОДУКЦИИ КОНЕЧНЫМ ПОТРЕБИТЕЛЯМ

AREAS OF APPLICATION AND PROBLEMS OF IMPLEMENTING A MULTI-TIER PRODUCT DELIVERY MODEL TO END USERS

В статье рассматриваются направления применения и проблемы внедрения модели многоэшелонной доставки товаров конечным потребителям. Указываются сложность их решения, возможные причины возникновения проблемы, описываются метрики для повышения эффективности управления системой. Проводится краткий анализ статей в данной области исследования, отражаются направления улучшения процессов взаимодействия поставщиков, потребителей и посредников в системе многоэшелонной доставки товаров.

The article discusses the areas of application and the problems of implementing a model of multi-stage delivery of goods to end users. The complexity of their solution, possible causes of the problem are indicated, and metrics for improving the efficiency of system management are described. A brief analysis of articles in this field of research is carried out, and the directions for improving the processes of interaction between suppliers, consumers and intermediaries in the multi-echelon delivery system are reflected.

Современные транспортные системы широко развиты и позволяют перемещать значительные потоки грузов на большие расстояния. При этом может быть задействована технология использования различных видов транспорта или одного вида транспорта, но при различных способах доставки грузов. В связи с этим в последние десятилетия широко внедряется технология многоэшелонной доставки товаров потребителям [1], которая использует основные и вспомогательные склады (см. рис. 1).

Дополнительные склады могут быть стационарными и подвижными (автомобили). Их роль заключается в подпитке транспорта грузами на развозочно-сборном маршруте следования [2], т.е. автомобиль может дозагрузиться на маршруте на таком складе и продолжить маршрут, не возвращаясь на основной склад, либо, наоборот, выгрузить часть товаров на допол-

нительный склад в случае сбора грузов по маршруту при ограниченной грузоподъемности автомобиля.

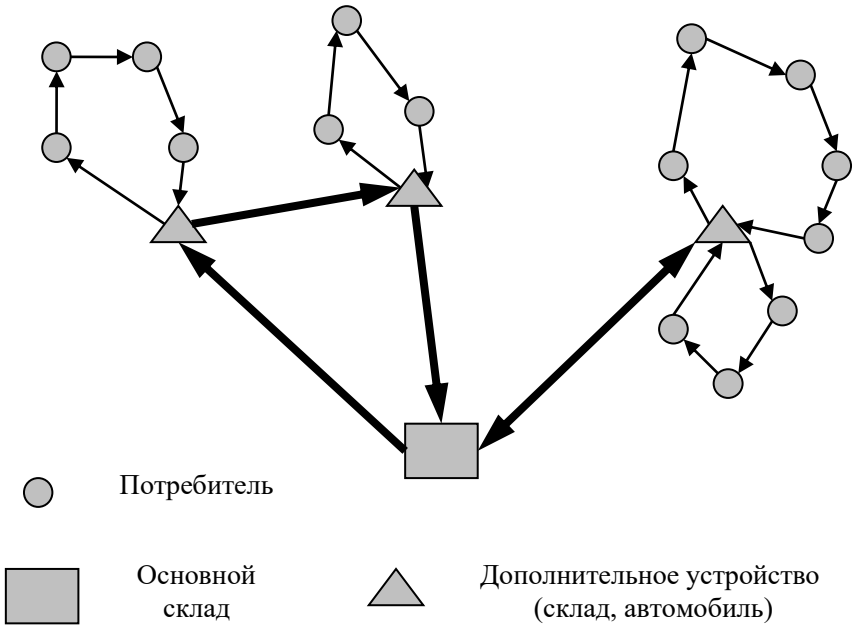

Рисунок 1 – Схема многоэшелонной доставки товаров потребителям

Среди прикладных аспектов этой задачи можно выделить доставку топлива частным домам, фермам или небольшим предприятиям [3]. Водитель выезжает из центрального склада с частью груза. По пути он заезжает на промежуточную базу, забирает дополнительную партию, чтобы закрыть заказы в отдалённых точках, и продолжает маршрут. Без такой возможности машине пришлось бы раз за разом возвращаться на главный склад, что сильно увеличило бы пробег, время и затраты.

Другим направлением применения многоэшелонной доставки товаров является розничная торговля и дистрибуция [4]. В сетях, где нужно снабжать множество точек (магазины, пункты выдачи), тоже применяют похожий принцип. Товар может храниться не только в главном распределительном центре, но и в локальных узлах. Маршрут строится так, чтобы водитель в процессе поездки мог заехать в такой узел, взять товар под конкретные заказы и доставить его дальше. Это помогает эффективнее использовать грузоподъёмность машины и сокращать порожние пробеги.

Среди показателей (метрик), которые оценивают эффективность принимаемого решения в многоэшелонной доставке товаров, можно выделить следующие:

- Экономические и операционные: общая стоимость маршрута, фиксированные затраты на использование транспорта, затраты на топливо или энергию, затраты на работу водителей.
- Пространственные и временные: общее пройденное расстояние, среднее время в пути, использование временных окон.

- Связанные с дополнительными складами: количество посещений этих складов, распределение нагрузки между складами, время, проведённое на складах (например, для перевалки грузов).
- Эффективность использования ресурсов: загрузка транспортных средств, соотношение использованной грузоподъёмности к общей.

При этом наблюдаются проблемы учета и точного выполнения этих метрик для достижения общего эффекта.

Например, метрика время на дополнительных складах. В математической модели это часто фиксированное число (например, «перегрузка занимает 15 минут»), а на практике это переменная с высокой дисперсией: очередь на рампе, отсутствие персонала, нет свободных ворот, техника занята. В двухэшелонных схемах это ещё хуже: машина второго эшелона приезжает к клиенту раньше, чем груз успевает доехать до сателлита первым эшелоном. Поэтому данный факт сильно меняет всю оптимизацию: маршруты, рассчитанные на 15 минут, реально занимают 45–90 минут.

Другая метрика соблюдение временных окон также вносит свои изменения в математическую модель. В этом случае дополнительный склад добавляет промежуточную операцию, которая «сдвигает» все последующие доставки. В модели легко получить формально «оптимальный» маршрут, который массово опаздывает к клиентам. При этом для клиента опоздание критично, а штрафные санкции бьют по экономике сильнее, чем экономия на пробеге.

Еще одна часто используемая метрика загрузка транспорта и дробление поставок. Модель часто предполагает, что одну заявку можно разделить между несколькими машинами или рейсами. В реальности это усложняет документооборот, приёмку у клиента и контроль остатков. Поэтому даже если математика говорит «экономия 12%», на складе и у клиента возникает хаос: частичная отгрузка, пересортица, ошибки при приёмке.

Следующая метрика общее расстояние/пробег. Модель считает по матрице расстояний, а в городе есть пробки, перекрытия, односторонние улицы, запреты на поворот. Поэтому план, построенный по «чистым» расстояниям, на дороге оказывается нереализуемым или сильно дороже.

Метрика использование дополнительных складов и их пропускная способность. Если в модели склад «безлимитный», а на деле у него фиксированное число ворот и часов работы, то при масштабировании система быстро упирается в «бутылочное горлышко». В этом случае склад становится узким местом: машины стоят в очереди, растёт простой, падает оборачиваемость.

Какие практические способы можно предложить с решения проблем учета и выполнения этих метрик? Можно предложить ограничения на дробление поставок, что приведет к резкому снижению операционной сложности выполнения заказов потребителей. Для проектирования маршрутов использовать временные матрицы вместо расстояний с возможность

их обновления в режиме реального времени. Дополнительно необходимо вести отдельный отчёт: сколько раз машина ждала на дополнительном складе, сколько доставок попало в окно, сколько заказов пришлось дробить. Это все помогает подстроить модель под реальные условия эксплуатации и учесть многие случайные факторы.

Рассмотрим практический пример применения модели многоэшелонной доставки товаров. В данной модели будем использовать 1 основной склад, 2 дополнительных склада и 40 пунктов доставки продукции. Исходные данные по сети распределения товаров представлены в таблице 1. В данной таблице указаны запас продукции на основном складе для доставки товаров, а также запас продукции на дополнительных складах для возможной дозагрузки автомобиля в пути. Для доставки товаров будем использовать автомобиль с максимальной загрузкой 10 т.

В модели для расчета расстояний используется формула гаверсинуса. Это приближенный расчет расстояний между пунктами по широте и долготе для показа возможности применения метода. Также для построения маршрутов используется жадный эвристический алгоритм, который объединяет пункты в маршруты по принципу ближайшего соседа. В реальной постановке задачи надо учитывать топологию сети, используя API карт Яндекса, 2GIS, Google, OpenStreetMap и др.

Результаты маршрутизации представлены в таблице 2. Рассмотрим конфигурацию 1 маршрута. Автомобиль начинает движение с основного склада (DC1), посещает потребителей 12 (C012 – спрос по таблице 2 составляет 1,65 т), 39 (C039 – спрос по таблице 2 составляет 2,71 т) и 18 (C018 – спрос по таблице 2 составляет 2,40 т), суммарно доставляя им продукцию в размере 6,76 т (первое значение в таблице 2 в графе Объем перевозок, т). В дальнейшем он совершает дозагрузку на дополнительном складе 1 (SF01), после чего посещает потребителей 35 (C035 – спрос по таблице 2 составляет 3,80 т), 21 (C021 – спрос по таблице 2 составляет 1,64 т) и 20 (C020 – спрос по таблице 2 составляет 3,94 т), суммарно доставляя им продукцию в размере 9,38 т (второе значение в таблице 2 в графе Объем перевозок, т). Затем совершает дозагрузку на дополнительном складе 1 (SF01), после чего посещает потребителей 7 (C007 – спрос по таблице 2 составляет 2,85 т), 8 (C008 – спрос по таблице 2 составляет 3,94 т), 38 (C038 – спрос по таблице 2 составляет 1,57 т) и 22 (C022 – спрос по таблице 2 составляет 1,64 т), суммарно доставляя им продукцию в размере 10 т (третье значение в таблице 2 в графе Объем перевозок, т). После этого автомобиль возвращается на основной склад (DC1) и маршрут 1 на этом заканчивается.

Таким образом, вместо совершения трех маршрутов с постоянным возвращением на основной склад автомобиль совершает один длинный маршрут с двумя дозагрузками на дополнительном складе 1. Такой подход позволит сократить общий пробег автомобиля, но может увеличить время на маршруте из-за дозагрузок на дополнительных складах.

Таблица 1 – Исходные данные по пунктам сети обслуживания

№ п/п	Усл. обозн.	Тип объекта	Широта	Долгота	Спрос, т	Запас, т
1	DC1	Основной склад	55,32582	86,130847		200
2	SF01	Дополн. склад 1	55,339688	86,096935		50
3	SF02	Дополн. склад 2	55,387806	86,102469		30
4	C001	Потребитель 1	55,352557	86,090971	2,82	0
5	C002	Потребитель 2	55,351564	86,070363	3,33	0
6	C003	Потребитель 3	55,33489	86,063087	3,62	0
7	C004	Потребитель 4	55,358898	86,067336	1,36	0
8	C005	Потребитель 5	55,34684	86,156287	1,35	0
9	C006	Потребитель 6	55,349962	86,167049	3,01	0
10	C007	Потребитель 7	55,345155	86,117624	2,85	0
11	C008	Потребитель 8	55,34449	86,123022	3,94	0
12	C009	Потребитель 9	55,355229	86,168693	3,09	0
13	C010	Потребитель 10	55,392091	86,016338	3,44	0
14	C011	Потребитель 11	55,401002	86,04247	2,04	0
15	C012	Потребитель 12	55,326496	86,118145	1,65	0
16	C013	Потребитель 13	55,346829	86,004795	3,20	0
17	C014	Потребитель 14	55,421486	86,230982	2,83	0
18	C015	Потребитель 15	55,317886	86,080496	3,40	0
19	C016	Потребитель 16	55,394658	86,022833	2,96	0
20	C017	Потребитель 17	55,341823	86,066932	3,76	0
21	C018	Потребитель 18	55,327367	86,105254	2,40	0
22	C019	Потребитель 19	55,400563	86,128017	2,19	0
23	C020	Потребитель 20	55,338172	86,063563	3,94	0
24	C021	Потребитель 21	55,337906	86,068189	1,64	0
25	C022	Потребитель 22	55,340338	86,153008	1,64	0
26	C023	Потребитель 23	55,3581	86,075412	1,50	0
27	C024	Потребитель 24	55,356749	86,081035	3,53	0
28	C025	Потребитель 25	55,345258	86,163851	2,13	0
29	C026	Потребитель 26	55,390521	86,009359	2,72	0
30	C027	Потребитель 27	55,410136	86,053933	2,47	0
31	C028	Потребитель 28	55,387249	86,03444	2,68	0
32	C029	Потребитель 29	55,39225	86,111174	2,58	0
33	C030	Потребитель 30	55,404852	86,123031	1,68	0
34	C031	Потребитель 31	55,407918	86,12622	3,64	0
35	C032	Потребитель 32	55,398835	86,114884	1,45	0
36	C033	Потребитель 33	55,311062	86,089389	1,86	0
37	C034	Потребитель 34	55,351815	86,19981	2,55	0
38	C035	Потребитель 35	55,340338	86,075214	3,80	0
39	C036	Потребитель 36	55,356646	86,145606	2,35	0
40	C037	Потребитель 37	55,343973	86,063293	2,17	0
41	C038	Потребитель 38	55,344567	86,139282	1,57	0
42	C039	Потребитель 39	55,325687	86,115665	2,71	0
43	C040	Потребитель 40	55,665837	86,279096	3,22	0

Аналогичный сложный порядок объезда пунктов совершается на маршруте 3 с двумя дозагрузками на дополнительном складе 1 (SF01) и на маршруте 5 с тремя дозагрузками на дополнительном складе 2 (SF02).

Таблица 2 – Результаты маршрутизации

№ п/п	Порядок объезда пунктов	Объем перевозок, т
1	DC1 - C012 - C039 - C018 - SF01 - C035 - C021 - C020 - SF01 - C007 - C008 - C038 - C022 - DC1	6,76 + 9,38 + 10
2	DC1 - C005 - C025 - C006 - C009 - DC1	9,59
3	DC1 - C033 - C015 - C003 - SF01 - C001 - C024 - C023 - C004 - SF01 - C017 - C037 - C002 - DC1	8,87 + 9,21 + 9,26
4	DC1 - C036 - C034 - DC1	4,90
5	DC1 - C029 - SF02 - C032 - C030 - C031 - C019 - SF02 - C027 - C011 - C016 - SF02 - C028 - C010 - C026 - DC1	2,58 + 8,96 + 7,47 + 8,84
6	DC1 - C013 - DC1	3,20
7	DC1 - C014 - DC1	2,83
8	DC1 - C040 - DC1	3,22

Подводя итог, можно отметить, что организация многоэшелонной доставки таит в себе много трудностей, которые необходимо преодолевать. С другой стороны, применение такого подхода увеличивает радиус обслуживания потребителей, например, с распределительного центра, повышает степень загрузки подвижного состава, сокращает время доставки грузов и, как следствие, стоимость транспортного обслуживания потребителей. Внедрение системы многоэшелонной доставки товаров должно базироваться на четком согласовании операций между всеми исполнителями и учете случайных параметров на всех этапах продвижения товара от поставщика к потребителю.

Список литературы:

1. Тюрин, А. Ю. Модели транспортного обслуживания в цепях поставок пищевой промышленности / А. Ю. Тюрин. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №4. – С.89-92.

2. Тюрин, А. Ю. Особенности решения задач многоуровневой системы доставки товаров / А. Ю. Тюрин. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №1. – С.130-135.

3. Bard J. F. A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities / J. F. Bard, L. Huang, M. Dror, P. Jaillet. – Direct text // IIE Transactions. – 1998. – 30(9). – P. 821-834.

4. Gayialis S. P. Vehicle Routing Problem for Urban Freight Transportation // S. P. Gayialis, G. D. Konstantakopoulos, I. P. Tatsiopoulos. – Direct text // ICT Challenges. Springer Proceedings in Business and Economics. – Cham: Springer, 2018. – P. 89–104.