

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА

DOI 10.26163/RAEN.2021.69.43.014
УДК 519.863 : 613

V.A. Borodavkin, Yu.A. Kapitonov

OPTIMIZATION MODELS IN LOGISTICS

Vyacheslav Borodavkin – vice principal – vice-rector for academic affairs, D. Ustinov Baltic State Technical University, Doctor of Engineering, professor, full member of the Russian Academy of Natural Sciences, full member of K. Tsyolkovskiy Russian Space Exploration Academy, recipient of the Prize of the Government of St. Petersburg in Education, St. Petersburg; **e-mail: pror-ur@bstu.spb.su**.

Yuri Kapitonov – senior lecturer, the Department of Organization Management, D. Ustinov Baltic State Technical University, PhD in Engineering; **e-mail: madlenru@mail.ru**.

We consider the main optimization models of logistics applied in scientific research and educational activity in D. Ustinov Baltic State Technical University. Their choice is determined by the scientific interests of the employees and the established range of tasks. The features of teaching logistics at the university are studied.

Keywords: *logistics; transport logistics; optimization models; features of teaching.*

V.A. Бородавкин, Ю.А. Капитонов

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В ЛОГИСТИКЕ

Вячеслав Александрович Бородавкин – первый проректор-проректор по образовательной деятельности, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, лауреат премии Правительства Санкт-Петербурга в области образования, г. Санкт-Петербург; **e-mail: pror-ur@bstu.spb.su**.

Юрий Алексеевич Капитонов – доцент кафедры «Менеджмент организации», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), кандидат технических наук, г. Санкт-Петербург; **e-mail: madlenru@mail.ru**.

В статье рассматриваются основные оптимизационные модели логистики, используемые в научных исследованиях и образовательной деятельности в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Их выбор обусловлен научными интересами работников и сформировавшимся кругом решаемых задач. Рассмотрены особенности преподавания логистики в университете.

Ключевые слова: *логистика; транспортная логистика; оптимизационные модели; особенности преподавания.*

В цифровой экономике логистика и управление цепями поставок определяют характер взаимоотношений потребителей и производителей товаров и услуг. Сквозная интеграция и оптимизация процессов с помощью цифровых информационных технологий позволяет ускорить все логистические бизнес-процессы, спрогнозировать новые технологические модели, выявить параметры, улучшающие результативность. Современное производство

трудно представить без отлаженной системы обеспечения сырьем и материалами, а также без развитой системы дистрибуции готовой продукции, которые создают условия для финансовой успешности предприятия. Если на начальных стадиях развития систем снабжения предполагалось что обеспечение сырьем и комплектующими в первую очередь опиралось на местные ресурсы, то развитие систем доставки помогает выстроить глобальные

производственно-технологические цепочки. Эти цепочки создают сложную сетевую структуру потоков товаров, услуг, капитала и технологий через национальные границы [1].

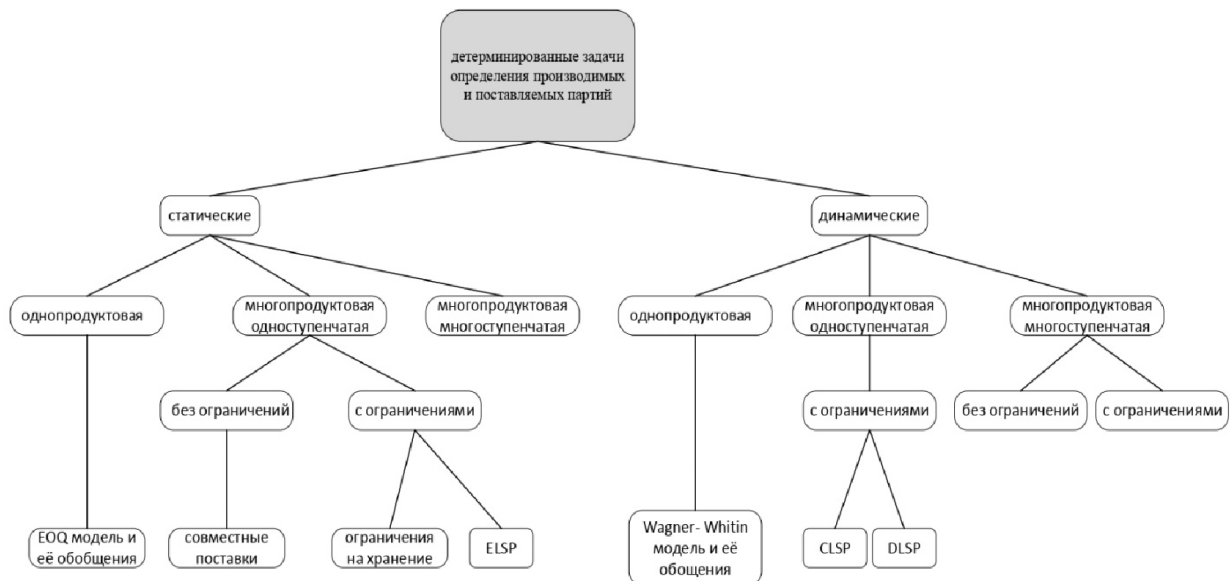
Логистика поставок

На практическом уровне отличают поставки в дистрибуционную сеть со склада производителя. Это может быть склад концерна, на котором находятся товары от разнообразных производителей, входящих в концерн. Обычно речь идет о высокотехнологичной продукции, поставках производственного оборудования, товаров имеющих высокую стоимость. Для определения спроса на товары проводится ABC – XYZ анализы, которые позволяют определиться с общими характеристиками спроса на конкретный товар и уточнить, какие математические модели логистики адекватны этим общим характеристикам и можно ли выполнить оптимизацию процессов поставки. Главным критерием качества является суммарная стоимость логистических издержек на единицу продукции. Общепринятая классификация математических моделей логистики [3] представлена на рисунке.

Базовой моделью является EOQ-модель, называемая моделью Вилсона. Она позволяет найти оптимальный объем поставляемой партии при очень жестких ограничениях на спрос (постоянный, детерминированный, однопродуктовая зада-

ча) и отсутствие ограничений на физические процессы, которые и составляют обобщенное понятие логистических процессов. Это перевозка и хранение товаров для стадии реализации в торговых предприятиях или использования как сырье или комплектующие в производственном процессе. Переходя на более низкий физический уровень говорят о процессах подготовки груза к перевозке, выбор транспортного средства, расчет загрузки, планирование хранения. По результатам предварительных расчетов должны определяться стоимость доставки партии груза и стоимость хранения единицы продукции на складе. Эти два значения являются параметрами в EOQ-модели. Определение этих параметров представляет известную трудность, зависит от типа товара (груза), и представляет инженерно-экономическую задачу. Интересна также разработка методик расчета этих параметров в зависимости от конкретных характеристик товаров.

В EOQ-модели оптимальное решение находится поиском минимума дифференцируемой функции и определяется по формуле $q = \sqrt{\frac{2Fb}{c}}$, где q^* – оптимальный объем закупаемой партии, F – стоимость заказа (транспортные расходы), b – спрос на товары, c – стоимость хранения единицы продукции на складе в сутки. Логистические модели, приведенные в левой



Классификация математических моделей логистики

части рис. 1, представляют обобщение EOQ-модели при постоянном спросе и поэтому разрешимы. Исключение составляет модель ELSP (*Economic Lot Scheduling Problem*) в производственной логистике, которая объединяет задачу о расчете оптимальных объемов партий в многопродуктовых задачах и расписание загрузки производственного оборудования. Задачи расчета расписания работы производственного оборудования являются трудноразрешимы по следующим причинам:

- очень большое число допустимых вариантов решения (планов);

- многие задачи формулируются как задачи линейного целочисленного программирования, а переменные в задачах отражают и временные, и количественные факторы. А это значит, что переменных и ограничений на них очень большое число. Точные решения возможны только при небольшой размерности задачи.

В правой части схемы на рисунке рассматриваются задачи определения объемов поставок при динамически изменяе-

мом спросе. Для таких товаров характерен сезонный спрос в условиях рыночной экономики. Даже на товары повседневного спроса иногда полезно применять такие математические модели. Всем известно, в торговых сетях спрос в выходные дни значительно превосходит спрос в будние, а в предпраздничные – выходит на пик, после которого наблюдается спад.

Специфика приведенных динамических моделей состоит в дискретности. Планируемый временной период разбивается на равномерные интервалы. В пределах интервала параметры модели считают постоянными. В различные интервалы эти параметры могут отличаться друг от друга. Для исходных данных и параметров формируется таблица; данные по спросу рассчитываются на основании прогнозов с учетом сезонности и представляют собой вектор значений. Wagner и Within сформулировали динамическую задачу о поставках и доказали наличие оптимальных решений. Задача записывается следующим образом. Требуется найти

$$\min : K(z, l, q) = \sum_{t=1}^T (u_t * q_t + f_t * z_t + c_t * I_t), \quad (1)$$

где

$$I_t = I_{t-1} + q_t - b_t, \quad t = 1, \dots, T$$

$$q_t \leq B_t * z_t, \quad B_t = \sum_{i=t}^T b_i, \quad t = 1, \dots, T$$

$$I_t \geq 0, \quad q_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T$$

$$I_0 = I_T = 0$$

$$z_t = \begin{cases} 1, & \text{если поставка осуществляется в начале периода } t \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Состояние склада I_t в конце периода рассчитывается как состояние в конце предыдущего периода $t-1$ плюс заказанное количество q_t минус израсходованное (проданное) количество b_t . Оптимальное (минимальное) значение критерия определяется вектором поставок $q = q_1, \dots, q_T$. Значения поставок могут быть $q_t = 0$, если поставок в период t нет, и равны сумме спроса на какое-то количество последующих периодов, если поставки в период t осуществляются. Для решения задачи Wagner–Whitin предложены как точные,

так и эвристические методы. Точный (основной) метод решения – динамическое программирование. В вычислительном плане удобнее другой способ решения. При проведении вспомогательных расчетов формируется треугольная матрица значений критерия (1) со всеми возможными вариантами. Множество допустимых решений представляется в виде графа, в котором веса дуг соответствуют расходам. Далее определяется кратчайший путь в графе (например алгоритмом Дейкстры). Результат расчета кратчайшего пути

дает точное решение исходной задачи. Возможны и эвристические методы решения. В вычислительном плане они существенно проще, но точность результата при их применении не гарантирована.

В работе [2] приведен вариант задачи Wagner–Within, в котором учитываются дополнительные ограничения по грузопместимости транспортных средств и ограничения на сроки хранения продаваемых товаров. В этом случае задача о кратчайшем пути рассматривается как общая задача линейного целочисленного программирования. При планировании на год и длительности периодов один месяц точный расчет поставок возможно провести в MicrosoftExcel, входящем в состав офисного программного обеспечения, с его ограничениями на число переменных и число ограничений на них.

Задача CLSP (динамическая многопродуктовая одноступенчатая о поставках) является обобщением задачи Wagner–Within при наличии нескольких продуктов и ограничениях на поставки. Существенно возрастает размерность задачи. Вектор спроса преобразуется в матрицу спроса, в которой элемент матрицы b_{kt} – спрос на продукт k в период t , а вектор объемов поставки становится матрицей с элементом q_{kt} . В работе [6] приводятся пять вариантов формулировок и некоторые методы их решения, преимущественно эвристические.

Рассмотренные выше модели могут применены в дистрибуционных сетях, поскольку они одноступенчатые. Более сложные модели поставок применяются в производственных системах. Обобщенное типовое название – MLCLSP (многоступенчатая динамическая многопродуктовая модель с ограничениями). Подобные модели требуют уточнения и согласования с самой существующей производственной системой. Особый интерес представляют задачи синхронизации поставок с производственными процессами. Такие задачи являются составной частью производственной концепции «JustinTime», которая приводит (на примере крупных автомобильных компаний) к снижению запасов незавершенного производства, и в целом к

снижению производственных издержек. Они объединяют задачи планирования производства (в том числе производственных расписаний) и задачи о поставках [5].

Транспортная логистика

В последние годы прикладные задачи о перевозках пассажиров и грузов развивались очень интенсивно. Большое число научных статей, доклады на конференциях международного уровня, монографии позволяют говорить о том, что транспортная логистика превратилась в самостоятельную научную и учебную дисциплину.

В основе многих практических работ лежит задача о маршрутизации транспорта (VRP) [7]. Известна и многократно опубликована классификация этих задач. Для транспортной системы задача формулируется следующим образом.

Известен граф сети транспортной системы, задаваемый матрицей инцидентности вершин и матрицей стоимости перевозок. Известно положение депо (стартовой точки), из которой начинаются и в которой заканчиваются маршруты. Обычно известен спрос на товар в каждой из вершин графа. Требуется составить маршрут (последовательность обхода вершин графа), при котором достигается минимум некоторой целевой функции и при выполнении некоторого типа ограничений. Детализация задачи происходит по следующим направлениям:

- характеристики депо и спроса. Возможно одно депо или несколько. Спрос – в узлах или на дугах, имеются ли временные окна при обслуживании клиентов и т.д.;

- характеристики транспортных средств. Одно или несколько. Однотипные или различные с различными ограничениями по вместимости. Есть или нет ограничений на длительность туров и т.д.;

- дополнительные характеристики. Обслуживание только одним транспортным средством или возможно несколькими. Обслуживание без учета времени посещения или возможен период времени, в который произойдет посещение и т.д.;

- целевые функции, как правило, – минимум суммарных расходов, но воз-

можны и другие.

Далее прикладные задачи детализируются для различных видов транспорта с учетом их специфики – авиационный, железнодорожный, грузовой автомобильный, пассажирские перевозки. Детализация этих задач может происходить за счет уточнения инфраструктурных особенностей транспортных узлов (аэропортов, вокзалов и т.д.). Отдельно следует отметить задачи синхронизации при перевозках различными видами транспорта или синхронизации при пересадках в пассажирских перевозках.

Рассмотрим в дальнейшем только авиационный транспорт. Специфика работы авиакомпаний заключается в том, что в их распоряжении находится некоторое множество типов самолетов, произведенное разными производителями в разное время. Даже относясь к одному классу (дальнемагистральные, среднемагистральные, ближнемагистральные) эти самолеты различаются по пассажироплощадности и стоимостью эксплуатации. Поэтому популярна задача о распределении самолетов по линиям (Fleet Assignment Problem – FAP), которая учитывает маршрутизацию в очень упрощенной форме. Одна из формулировок следующая.

Авиакомпания обладает n типами самолетов и обслуживает m линий.

Известно:

P_j – цена билета для пассажира на линии j ($j=1, \dots, m$);

k_{ij} – стоимость эксплуатации самолета типа i на линии j ($i=1, \dots, n$);

μ_i – число имеющихся самолетов типа i ;

g_i – пассажироплощадность типа самолетов i ;

q_j – число пассажиров, ожидаемых на линии j (спрос на перевозку).

Требуется распределить самолеты по линиям таким образом, чтобы прибыль авиакомпаний была максимальной. Данная задача является задачей линейного целочисленного программирования. Она может быть решена симплекс-методом (метод Гомори).

Наращивание данного класса моделей

происходило за счет введения времени выполнения рейсов, времени наземного обслуживания воздушных судов, выделяемого временного трафика для осуществления рейсов. Это позволило решать задачи маршрутизации в области авиационных перевозок в более полном объеме. Дополнительно появилась группа задач о назначениях экипажей на рейсы, в которых учитываются ограничения на фонд рабочего времени и возможная различная стоимость выполнения летных работ различными экипажами.

Сегодня известны несколько опубликованных и апробированных математических моделей маршрутизации в авиационном транспорте. В некоторых моделях используются трассы воздушных судов и возможность или невозможность обслуживания данного типа самолетов в конкретном аэропорту из рассматриваемой сети аэропортов. Особый интерес представляют те математические модели маршрутизации, которые решаются методом генерации столбцов [4].

Аналогично для других видов транспорта разработаны математические модели, учитывающие специфику рассматриваемого вида транспорта. Все эти модели относятся к задачам исследования операций большой размерности.

Контейнерные терминалы

В развитой экономике актуальной становится оптимизация операций работы контейнерных терминалов. Это связано с тем, что логистика, особенно на крупных контейнерных терминалах, уже достигла такой степени сложности, что дальнейшие улучшения требуют применения научных методов. Как отмечают специалисты, точная настройка работы контейнерного терминала требует оптимизации и принятия решений в режиме онлайн (в реальном времени). Это объясняется тем, что большинство процессов, происходящих на контейнерных терминалах, нельзя предвидеть в течение длительного периода времени – в целом горизонт планирования для оптимизации очень короткий. С другой стороны, контейнер, являющийся элементом управляемого потока, характеризуется очень ограниченным набором дан-

ных – типоразмером, весом, конечным пунктом назначения. Этот факт упрощает формализацию процесса управления потоком контейнеров.

Планирование работы с судном-морским контейнеровозом состоит из трех частичных процессов: планирование работы причалов в порту, планирование размещения контейнеров на контейнеровозе и планирование работы кранов.

1. Распределение причалов. Перед прибытием контейнеровоза ему необходимо выделить причал. Расписание на линии больших морских судов известно заранее. Данные о загрузках судов передаются с судоводных линий оператору терминала посредством электронных систем передачи сообщений. Помимо технических данных судов и причальных кранов (не все причальные краны могут работать на всех судах) необходимо учитывать другие критерии, такие как длина судна и длина стрелы крана. Существует несколько критериев оптимизации распределения причалов. С практической точки зрения общая сумма расстояний перемещений для всех загружаемых и разгружаемых контейнеров должна быть минимизирована.

2. Планирование загрузки контейнеров на морские контейнеровозы. Цель оптимизации с точки зрения судоводной линии – минимизировать количество смен во время перегрузок в порту перегрузки (разгрузка с корабля на берег и новая догрузка) и максимально использовать грузместимость. Ограничения, которые необходимо обязательно учитывать, связаны с остойчивостью судна. При этом контейнерная укладка должна быть такой, чтобы в следующем порту на судоводной линии при разгрузке требуемые контейнеры были легко доступны.

3. Планирование работы кранов обычно формулируется как задача оптимизации производственных расписаний с их специфическими критериями. Обычно это минимизация общего времени выполнения работ (*англ. makespan*).

Отдельной задачей при контейнерных перевозках любым видом транспорта является являет расчет укладки грузов в

контейнеры. Существуют коммерческие интернет-программы, производящие такие расчеты. Однако считать данную задачу полностью решенной преждевременно, точное решение трудно достижимо, т.к. данная задача является NP-трудной. Коммерческие программы используют эвристические методы решения, алгоритмы решения задачи не приводятся, и их точность не обсуждается.

Преподавание логистики в университете

Анализ рабочих программ логистических дисциплин, реализуемых в нашем университете, показал, что в образовательных программах экономического профиля они, в основном, содержат концептуальные положения и слабо ориентированы на практическое применение. Это, в первую очередь, связано с недостаточной базовой математической подготовкой. При изучении логистики и применении математических моделей необходимо понимать, что такое линейное, линейное целочисленное, динамическое программирование. Если рассмотреть в качестве альтернативы образовательную программу по специальности «Специальные организационно-технические системы», то здесь обучающиеся могут не только самостоятельно выполнять курсовые и выпускные квалификационные работы, но и решать научные задачи с применением современных компьютерных технологий. Помимо значительного базового набора математических дисциплин для технических специальностей им читаются курсы «Технология системного моделирования», «Исследование операций», «Моделирование случайных процессов», «Оптимизация», «Системы искусственного интеллекта», «Нейронные сети» и т.д. Выпускники этой специальности ориентированы на решение задач внешнего проектирования и оценки эффективности сложных организационно-технических систем.

Если вернуться к экономистам, то программы обучения в колледжах транспортной направленности бывают даже содержательнее с точки зрения практической ориентации, поскольку обучающиеся решают задачи маршрутизации в простых

постановках и неплохо понимают, как эти процессы устроены изнутри. При преподавании дисциплины «Исследование операций» довольно часто используется «ручной» расчет при решении транспортной задачи. Ручной расчет симплекса-таблиц с абстрактными примерами соответствует самому раннему этапу развития математической дисциплины – исследования операций. Это приводит к тому, что в курсовых и выпускных квалификационных работах, выполняемых студентами самостоятельно, подобные задачи отсутствуют. В выпускных квалификационных работах бакалавров подобные задачи встречаются, как правило, на кафедрах прикладной математики и почти никогда – на экономических кафедрах. Выходом из данной ситуации может быть переход на использование прикладного программного обеспечения класса MAD-CAD/MADLAB. Эти программы осуществляют расчеты с высокой степенью оперативности. Они реализуют принцип «программирование без программирования». В сочетании с текстовыми редакторами создается безбумажная версия необходимых материалов. Это позволяет максимально сосредоточиться на работе с математическими моделями логистики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет Всемирной торговой организации 2019 г. // Всемирная торговая организация: [сайт]. URL: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/gvc_dev_report_2019_e.pdf (дата обращения: 22.01.2021).
2. Капитонов Ю.А. Решение задачи о поставках при динамически изменяемом спросе как задачи линейного программирования // ВИНТИТранспорт: наука, техника, управление. 2016. № 12. С. 33–44.
3. Domschke W, Scholl A. Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2005. 414 s.
4. Lubbecke M. E., Desrosiers J. Selected Topics in Column Generation // Operations Research. 2005. Vol. 53. № 6. November–December. P. 1007–1023.
5. Roger Rios, Yasmin A. Rios-Solis. Just-in-Time Systems (Springer Optimization and Its Applications (60)) (Volume 30) 2012th Editio.
6. Tempelmeier H. Material-Logistik. Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und –steuerung in Advanced Planning-Systemen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 455 s.
7. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications (MOS-SIAM Series on Optimization). Editors: Toth, Vigo, 2015.