

3.6. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ И ПЛАНИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ

Бочкарев А.А., д.э.н., доцент, профессор, Департамент логистики и управления цепями поставок, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Санкт-Петербург;

Бочкарев П.А., к.э.н., преподаватель, Департамент логистики и управления цепями поставок, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Санкт-Петербург;

Франюк Р.А., к.э.н., доцент, Образовательная автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Магнитогорский институт дополнительного образования», г. Санкт-Петербург

В течение последних 30 лет методы оптимизационного моделирования стали активно использоваться в планировании и управлении цепями поставок. Учитывая специфику задач планирования в цепях поставок, наибольшую популярность получило линейное программирование и такие его методы, как динамическое программирование, стохастическое программирование и планирование сценариев. Данные методы позволяют проводить оптимизацию цепи поставок по многочисленным базам данных, каждой из которых соответствует сценарий, описывающий различные варианты развития в неопределенном будущем.

Несмотря на достаточно интенсивные исследования в этой области, стохастическое программирование является все еще слабо развитым разделом математического программирования. В стохастическом программировании, больше чем в других разделах теории условных экстремальных задач, значительные трудности возникают не только при разработке методов решения задач, но и при постановке задач, в которых необходимо отразить подчас довольно тонкие ситуации планирования и управления в условиях риска и неопределенности. Отсюда возникает необходимость в разработке новых моделей планирования и управления цепями поставок в условиях неполной информации и методов, позволяющих их исследовать.

В статье рассмотрена проблема применения метода динамического линейного программирования для решения задачи выбора оптимальной стратегии отправки контейнеров с учетом существенной неравномерности загрузки и отправки контейнеров. Предложена математическая модель динамической многопериодной задачи об отправке грузовых контейнеров, которая позволяет осуществлять выбор оптимальной стратегии отправки контейнеров с учетом существенной неравномерности их загрузки и отправки с железнодорожной товарной станции. Представлен численный пример, который показывает эффективность использования метода динамического линейного программирования для решения рассмотренной задачи.

ВВЕДЕНИЕ

Модели динамического и стохастического линейного программирования в течение последних тридцати лет стали активно использоваться в планировании и, в частности, управлении цепями поставок, чему свидетельствует большое число научных публикаций, посвященных этой проблеме [1-3, 5, 7, 9, 10, 12-16, 18-30]. Полагая, что анализ такого количества работ и представленных в них моделей является объектом самостоятельного и скорее специ-

ального математического исследования, было принято решение изменить подход: направить поиск не на всевозможные теоретические модели, а сосредоточить внимание на тех, которые имеют прикладное значение и находятся на стыке между стохастическим и динамическим программированием.

На стыке между стохастическим и динамическим программированием в последние годы были предложены следующие методы:

- многоступенчатое стохастическое программирование – multistage stochastic programming (MSP) [10, 13, 15, 16, 19-25, 27-30];
- многоступенчатое стохастическое разложение – multistage stochastic decomposition (MSD) – новое направление, представляющее собой мост между стохастическим программированием и приближенным динамическим программированием [26];
- многоступенчатое стохастическое программирование: сценарий, основанный на деревьях, для планирования с неопределенностью – multistage stochastic programming: a scenario tree based approach to planning under uncertainty [14];
- динамические алгоритмы выборки для многоступенчатых стохастических программ с целью предотвращения риска – dynamic sampling algorithms for multistage stochastic programs with risk aversion [21].

Анализ этих работ показывает, что основными инструментами учета неопределенности и риска в моделях математического программирования являются деревья принятия решений и основанное на их анализе планирование сценариев. Следует отметить, что оптимизационные модели и, в частности, модели динамического и стохастического программирования, используются для решения задачи оптимизации логистической сети, управления запасами и маршрутизации перевозок, но все же в логистике эти модели используются пока еще недостаточно активно.

В данной работе рассмотрена задача оптимизации перевозок контейнерных грузов Открытого акционерного общества «Магнитогорский метизнокалибровочный завод» (ОАО «ММК-МЕТИЗ») на контейнерную площадку железнодорожной товарной станции Магнитогорска, которые компания ОАО «ТрансКонтейнер» еженедельно отправляет с железнодорожной товарной станции потребителям. Предложена математическая постановка данной задачи в виде динамической многопериодной модели линейного программирования, которая позволяет находить оптимальное количество загружаемых, хранимых на складе и отправляемых на железнодорожную товарную станцию контейнеров, а также выравнять неравномерность загрузки готовой продукции в контейнеры на ОАО «ММК-МЕТИЗ» и ее отправки потребителям с железнодорожной товарной станции.

Ранее в работе [1] рассматривалась детерминированная постановка данной задачи, которая не учитывает реально встречающихся в практике работы ОАО «ММК-МЕТИЗ» сбоев в отправке контейнеров с железнодорожной товарной станции города Магнитогорска. Некоторые из них происходят по вине ОАО «ТрансКонтейнер» по следующим причинам:

- приоритетными для ОАО «ТрансКонтейнер» могли быть другие грузы, например, домашние вещи, вследствие чего контейнеры с завода могли не попасть в ближайший поезд;
- фитинговые платформы для отправки частных контейнеров морских линий могли отсутствовать, в том числе для контейнеров ОАО «ММК-МЕТИЗ»;
- ОАО «ТрансКонтейнер», являясь монополистом, зачастую платформы из-под порожних контейнеров, прибывших в адрес завода, может использовать по своему усмотрению, а груженные контейнеры могут проставлять на станции в ожидании отправки.

Безусловно, сбои бывают и по вине ОАО «ММК-МЕТИЗ» по следующим причинам:

- неритмичность выполнения плана загрузки контейнеров на заводе;
- задержки с отгрузкой контейнеров из-за неготовности документов;
- простой контейнеров по причине ожидания дня отгрузки на соответствующее направление и другие причины.

Следовательно, детерминированная постановка данной задачи приводит к нереалистичному плану загрузки и отправки контейнеров с завода на контейнерную площадку железнодорожной товарной станции. Естественно имеется альтернатива – постановка данной задачи в виде модели стохастического программирования. В монографии Шапиро [5] рассматривается метод решения задачи оптимизации цепи поставок, включающий стохастическое программирование и планирование сценариев. Опираясь на метод, изложенный в этой работе, рассмотрим логику создания динамической многопериодной модели математического программирования и ее оптимизации по нескольким сценариям.

1. Динамическое программирование и планирование сценариев

В процессе тактического и стратегического планирования цепи поставки возникает потребность оптимизации по многочисленным базам данных, каждой из которых соответствует сценарий, описывающий различные варианты принятия решений в условиях неопределенности. Ключевые неопределенности формирования сценариев включают спрос на готовые изделия, затраты сырья или новые производственные технологии. Хотя причины для рассмотрения разнообразных сценариев интуитивно ясны, методы для их систематической идентификации и построения требуют рассмотрения.

Методы создания и анализа моделей, включающих многочисленные сценарии, вовлекают две пересекающиеся дисциплины: стохастическое программирование и относительно новая область анализа стратегий, названная планированием сценариев [5, с. 449-450]. Взаимосвязь этих дисциплин изображена на рис. 1. Использование детерминированной модели дает нам возможность учитывать неопределенность путем анализа *N* сценариев, каждый из которых относится к разным наборам исходных данных. На каждом этапе моделирования такие данные обозначаются как определенные, в результате чего появился термин «детерминированная модель». По своей сути оптими-

зация детерминированных моделей не может определять планы, предусматривающие риски.

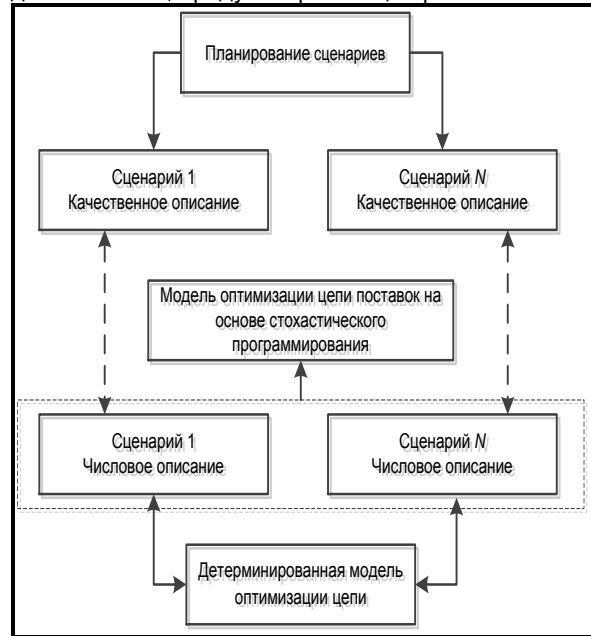


Рис. 1. Взаимосвязь стохастического программирования и планирования сценариев [5, с. 450]

Как показано на рис. 1, модель стохастического программирования, которая в более полном объеме исследует неопределенность и риски, может быть построена на основе детерминированной модели оптимизации путем ее расширения с целью одновременного рассмотрения многочисленных сценариев. В частности, модель стохастического программирования вычисляет оптимальный план непредвиденного обстоятельства и план страхования от рисков для каждого сценария. Вероятности возникновения риска, связанного с каждым сценарием, также приняты во внимание при оптимизации. Безусловно, целевой функцией модели является минимизация общего количества ожидаемых затрат цепи поставки или максимизация общего количества ожидаемых чистых доходов. Например, если для каждого из трех сценариев мы получаем чистые доходы R_1, R_2, R_3 с вероятностью p_1, p_2, p_3 , то модель стремится к максимизации $(p_1 \times R_1 + p_2 \times R_2 + p_3 \times R_3)$.

Так же как показано на рис. 1, существует свободная, но важная связь между стохастическим программированием и планированием сценариев. Цель планирования сценариев состоит в содействии менеджерам в определении последовательных, вероятных и всесторонних сценариев стратегических планов компании в будущем. Данная методология основывается на процессах, направленных на расширение взглядов менеджмента компании относительно ее будущего и на достижение общего согласия в выборе стратегии. С методологической точки зрения, модели стохастического программирования объединяют «деревья решений», описывающие неопределенное будущее, с моделями линейного или смешанного целочисленного программирования, описывающими решения о приобретении и распределении ресурсов. «Дерево реше-

ний» было изобретено в 1950-х гг. как дополнение к теории полезности, которая обеспечивает аксиоматическую структуру, характеризующую принятие решений в условиях неопределенности. Теория планирования сценариев формализует рациональные отношения лица, принимающего решения, к рискам, свойственным неопределенному будущему. Она не направлена на создание оптимизационных моделей, которые можно использовать для обоснования важности решений. Тем не менее, системы моделирования, основанные на планировании сценариев и анализе решений, развиваются и широко используются на практике.

Стохастическое программирование в конце 1950-х гг. стало рассматриваться как самостоятельное направление линейного программирования. На самом абстрактном уровне его математические свойства очень сложны и требуют интеграции теории вероятности и математического программирования. Центральная теоретическая проблема состоит в преобразовании неопределенностей, описанных множеством непрерывных распределений, в конечное число сценариев, таким образом допуская создание и решение конечной модели математического программирования.

Модели стохастического программирования в настоящее время находят широкое применение на практике, благодаря развитию теории планирования сценариев. При этом иногда игнорируют теоретические осложнения, хотя сочетание сложных стохастических моделей с математическим программированием остается затруднительным.

Применение методологии стохастического программирования и планирования сценариев к задаче выбора оптимальной стратегии отправки контейнеров с учетом существенной неравномерности их загрузки и отправки с железнодорожной товарной станции является затруднительным по следующим причинам. Во-первых, выше было отмечено, что сбои могут возникать как при загрузке контейнеров, так и при их отправки с железнодорожной товарной станции. Каждый из этих сбоев происходит со своей вероятностью p_i , что затрудняет формирование сценариев, так как сценариев может быть много, но реализация каждого из этих сценариев является редким событием. Во-вторых, существенным фактором является период времени t , в котором произошел сбой. Например, если сбой в отправке контейнеров произошел в начале планового периода (в первую неделю месяца), то до конца месяца возможно выравнивание плана (отправка дополнительных контейнеров в следующую неделю). Если же сбой произошел в конце планового периода, то очевидно, что это невозможно, т.е. первоначальный план выполнен не будет.

В связи с этим возникают следующие вопросы.

- возможно ли сценарное планирование в данном случае?
- если да, то какую полезную информацию мы получим, проводя оптимизацию по различным сценариям?

По нашему мнению, ответ на первый вопрос является утвердительным. Сценарное планирование возможно, если мы ограничимся рассмотрением небольшого количества сбоев и соответствующих им сценариев, приводящих к наибольшим издержкам (например, задержка в отправке контейнеров с желез-

нодорожной товарной станции на одну неделю). В данном случае оптимизация по различным сценариям позволит дать ответ на вопрос о том, какими дополнительными ресурсами мы должны располагать для выполнения плана отгрузок (контейнерами, автомобилями, погрузочными мощностями и оборудованием). Логика создания динамической многопериодной модели математического программирования и ее оптимизации по нескольким сценариям представлена на рис. 2.

Следует отметить, что сначала создается динамическая многопериодная модель математического программирования по базовому сценарию (сценарию 1). При создании базового сценария полагаем, что в течение всего планового периода отсутствуют сбои в процессе погрузки и отправки контейнеров, т.е. рассматривается детерминированная постановка задачи. Затем создается сценарии, отражающие ситуации сбоев (задержек в отправке контейнеров с железнодорожной товарной станции): сценарий 2 – сбой произошел в течение периода 1 (первая неделя), сценарий 3 – сбой произошел в течение периода 2 (вторая неделя) и т.д.

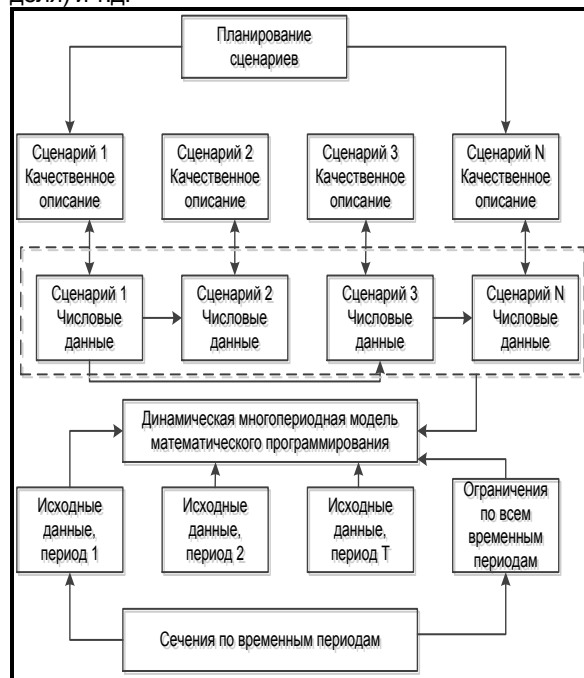


Рис. 2. Логика создания динамической многопериодной модели математического программирования

Очевидно, что для каждого из периодов планирования имеются индивидуальные исходные данные и ограничения (например, на количество грузов, которые должны быть загружены в контейнеры / отправлены в период времени t), также могут существовать общие ограничения по всем временным периодам (например, общий объем поставок грузов за весь плановый период). Влияние этих исходных данных и ограничений на создание динамической многопериодной модели выбора оптимальной стратегии отправки контейнеров по нескольким сценариям отражает рис. 2. В рассматриваемой задаче полагаем, что все сценарии

(сбои) являются равновероятными $p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1/N$ и течение планового периода (месяца) может произойти только один сбой.

2. Содержательная постановка задачи

Отправка контейнерных грузов потребителям в ОАО «ММК-МЕТИЗ» осуществляется по следующей схеме:

- грузные контейнеры вывозятся на контейнерную площадку железнодорожной товарной станции;
- контейнеры ставятся на склад временного хранения (СВХ);
- контейнеры простаивают на СВХ в ожидании таможенного оформления в режиме экспорта и погрузки на железнодорожную платформу, простои в среднем составляют 3 дня;
- затем контейнеры отправляются по железной дороге в пункт (порт) назначения.

Существуют три альтернативных варианта загрузки или затарки контейнеров.

1. На полу с последующей погрузкой его на транспортное средство с помощью крана.
2. На полу с последующей погрузкой его на транспортное средство с помощью домкратов.
3. Без снятия контейнера с транспортного средства.

Достоинство загрузки контейнеров на полу заключается в том, что при данной схеме погрузки сокращаются затраты на хранение грузных контейнеров на СВХ в ожидании формирования вагонов. Недостатки:

- применение грузоподъемного оборудования лимитируется пространством склада (низкая высота и недостаток места для складирования грузных контейнеров);
- требуются капитальные вложения на приобретение грузоподъемного оборудования.

Затраты на автоперевозки зависят от нескольких факторов:

- во-первых, от того, какого типа используются контейнеры. Возможны два варианта: использование 20-футовых контейнеров грузоподъемностью 21,5 т или 40-футовых контейнеров грузоподъемностью 27,5 т;
- во-вторых, от того, собственным или арендованным автотранспортом осуществляется доставка.

Таким образом, требуется организовать доставку грузных контейнеров с ОАО «ММК-МЕТИЗ» на контейнерную площадку железнодорожной товарной станции с минимальными затратами.

Три способа загрузки контейнеров двух типов и два варианта использования автотранспорта приводят к 12 вариантам отправки контейнеров с завода на контейнерную площадку железнодорожной товарной станции, различающихся затратами:

Отправка грузов в 20-футовых контейнерах. Собственным автотранспортом:

- с загрузкой на полу с использованием крана;
- с загрузкой на полу с использованием домкратов;
- с загрузкой в автомобиль.

Автотранспортом сторонних организаций:

- с загрузкой на полу с использованием крана;
- с загрузкой на полу с использованием домкратов;
- с загрузкой в автомобиль.

Отправка грузов в 40-футовых контейнерах. Собственным автотранспортом:

- с загрузкой на полу с использованием крана;
- с загрузкой на полу с использованием домкратов;
- с загрузкой в автомобиль.

Автотранспортом сторонних организаций:

- с загрузкой на полу с использованием крана;
- с загрузкой на полу с использованием домкратов;
- с загрузкой в автомобиль.

В табл. 1 представлен расчет затрат на отправку грузных контейнеров. Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, во-первых, что затраты на отправку грузных контейнеров (строка 7) складывается из трех составляющих: затрат на автоперевозки (строка 3), затрат грузовой товарной станции (строка 5) и амортизационных отчислений за грузоподъемное оборудование и автотранспортные средства (строка 6). Во-вторых, отправка грузов 40-футовыми контейнерами обходится дешевле отправки 20-футовыми контейнерами в расчете на 1 т груза (строка 9). В-третьих, затраты на отправку грузных контейнеров собственным автотранспортом ниже только для 20-футовых контейнеров. Перевозка 40-футовых контейнеров собственным автотранспортом обойдется дороже, так как для этого используются новые приобретенные полуприцепы-контейнеровозы и, соответственно, начисляется амортизация. Отметим здесь, что на собственный автотранспорт, предназначенный для перевозки 20-футовых контейнеров, амортизация не начисляется ввиду его полного износа.

Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно также сделать вывод о том, что самым выгодным способом отправки 20-футовых контейнеров является отправка собственным автотранспортом с затаркой на полу и их дальнейшей погрузкой с использованием домкратов, а 40-футовых контейнеров – отправка автотранспортом сторонних организаций с затаркой на полу и погрузкой с использованием домкратов (затраты, соответствующие этим вариантам отправки контейнеров, выделены в табл. 1). Таким образом, если на отправку контейнеров не накладываются дополнительные ограничения, то должны быть использованы указанные наименее затратные варианты отправки. В рассматриваемой задаче дополнительные ограничения могут быть наложены на количество контейнеров, которые загружаются на полу и, соответственно, должны быть погружены на автотранспорт с использованием крана или домкратов, а также на количество грузов, которые должны быть отправлены 20- и 40-футовыми контейнерами. Кроме того, в данной задаче необходимо учесть неравномерность отправки продукции с железнодорожной товарной станции и минимизировать затраты, связанные с предьявлением грузов ранее назначенного срока погрузки. Поскольку человеческая логика часто заходит в тупик при решении сложных задач, когда на исковые переменные накладывается большое количество ограничений, поэтому целесообразно построить математическую модель рассматриваемой задачи и получить оптимальное решение.

Таблица 1

РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА ОТПРАВКУ ГРУЖЕНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

Показатели	Ед. изм.	20-футовый контейнер						40-футовый контейнер					
		собственный автотранспорт			автотранспорт сторонних организаций			собственный автотранспорт			автотранспорт сторонних организаций		
		загрузка			загрузка			загрузка			загрузка		
		на полу с использованием		в автомобиль	на полу с использованием		в автомобиль	на полу с использованием		в автомобиль	на полу с использованием		в автомобиль
		крана	домкратов		крана	домкратов		крана	домкратов		крана	домкратов	
1. Среднее время рейса	час	1,33	1,33	1,33	2,33	2,33	2,33	1,33	1,33	1,33	2,33	2,33	2,33
2. Стоимость 1 маш.-ч	руб.	188,5	188,5	188,5	329,0	329,0	329,0	188,5	188,5	188,5	329,0	329,0	329,0
3. Сумма затрат на автоперевозки	руб.	250,7	250,7	250,7	766,5	766,5	766,5	250,7	250,7	250,7	766,5	766,5	766,5
4. Протяженность рейса	км	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
5. Затраты грузовой товарной станции	руб.	5811,7	5811,7	6805,7	5811,7	5811,7	6805,7	6674,6	6674,6	7668,6	6674,6	6674,6	7668,6
5.1. Хранение порожних контейнеров	руб.	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0	4176,0
5.2. Хранение груженых контейнеров	руб.	496,0	496,0	1490,0	496,0	496,0	1490,0	496,0	496,0	1490,0	496,0	496,0	1490,0
5.3. Сбор за предъявление грузов ранее назначенного срока погрузки	руб.	628,7	628,7	628,7	628,7	628,7	628,7	911,6	911,6	911,6	911,6	911,6	911,6
5.4. Погрузочно-разгрузочные работы	руб.	511,0	511,0	511,0	511,0	511,0	511,0	1091,0	1091,0	1091,0	1091,0	1091,0	1091,0
6. Амортизационные отчисления	руб.	531,0	208,77	0	531,0	208,8	0	1216,2	804,0	536,9	679,2	267,0	0
6.1. Грузоподъемное оборудование	руб.	531,0	208,77	0	531,0	208,8	0	679,2	267,0	0	679,2	267,0	0
6.2. Автотранспортное оборудование	руб.	0	0	0	0	0	0	536,9	536,9	536,9	0	0	0
7. Итого затрат	руб.	6593,4	6271,1	7056,4	7109,2	6786,9	7572,2	8141,4	7729,2	8456,2	8120,3	7708,1	8435,1
8. Вес груза (брутто) в контейнере	т	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
9. Затраты на 1 т груза	руб.	306,7	291,7	328,2	330,7	315,7	352,2	296,1	281,1	307,5	295,3	280,3	306,7

3. Математическая постановка задачи

Математические методы управления в условиях неполной информации, в том числе проблемы создания динамических и стохастических многопериодных моделей линейного программирования, рассматриваются в работах [2, 3, 5-9].

В работе [1] дана математическая модель рассматриваемой задачи, как модель динамического линейного программирования, которая позволяет определить оптимальное количество загруженных, отправленных и складированных контейнеров, при которых общие затраты на отправку контейнеров были бы минимальными.

Введем следующие условные обозначения:

$i \in \{1, \dots, I\}$ – множество индексов типов контейнеров;

$j \in \{1, \dots, J\}$ – множество индексов способов отправки контейнеров;

$t \in \{1, \dots, T\}$ – множество индексов периодов планирования;

$x_{i,j,t}$ – количество контейнеров i -го типа, загруженных j -м способом, в период времени t , ед.;

$x_{i,j,t}^{\max}$ – максимальное количество контейнеров i -го типа, которое может быть загружено j -м способом, в период времени t , ед.;

$y_{i,j,t}$ – количество контейнеров i -го типа, загруженных j -м способом и отправленных на железнодорожную товарную станцию, в период времени t , ед.;

$d_{i,j,t-1}$ – количество складированных контейнеров i -го типа, загруженных j -м способом, в начале периода времени t ;

$d_{i,j,t}$ – количество складированных контейнеров i -го типа, загруженных j -м способом, в конце периода времени t ;

$c_{i,j,t}^{(1)}$ – затраты на отправку одного контейнера i -го типа, загруженного j -м способом, в период времени t ;

$c_{i,j,t}^{(2)}$ – сбор за предъявление контейнера i -го типа, загруженного j -м способом, в период времени t ранее назначенного срока;

q_i – вес груза (брутто) в контейнере i -го типа, t ;

$Q_{i,t}$ – количество грузов, отправленных в контейнерах i -го типа, в период времени t , t ;

Q_t – количество грузов, которые должны быть загружены в контейнеры в период времени t , t ;

Q_t^* – количество грузов, которые могут быть отправлены в период времени t , t ;

Q_0 – общий объем поставок грузов за весь плановый период, t .

Оптимальное соотношение между загруженными, отправленными и хранимыми на складе контейнерами может быть получено из решения следующей специальной задачи линейного программирования. Требуется вычислить переменные $x_{i,j,t}$ и $y_{i,j,t}$, обращающие в минимум линейную форму (1):

$$Z = \sum_t \left(\sum_i \sum_j \left(c_{i,j,t}^{(1)} y_{i,j,t} - c_{i,j,t}^{(2)*} * (d_{i,j,t-1} + x_{i,j,t} - y_{i,j,t}) \right) \right) \rightarrow \min; \quad (1)$$

при условиях, выраженных формулами (2-10):

$$\sum_i \sum_j (d_{i,j,0} + \sum_t (x_{i,j,t} - y_{i,j,t})) \leq d_{i,t}, \quad (2)$$

$$\forall i, j, t \in \{1, 2, \dots, T-1\};$$

$$\sum_i \sum_j (d_{i,j,0} + \sum_t (x_{i,j,t} - y_{i,j,t})) = 0, \forall i, j, t = T; \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j x_{i,j,t} \leq x_{i,j,t}^{max}, \forall t; \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_j q_i x_{i,j,t} \geq Q_t, \forall t; \quad (5)$$

$$\sum_j q_j y_{i,j,t} \geq Q_t^*, \forall t; \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j q_i y_{i,j,t} \geq Q_{i,t}, \forall t; \quad (7)$$

$$\sum_t x_{i,j,t} = \sum_t y_{i,j,t}, \forall i, j; \quad (8)$$

$$x_{i,j,t} \geq 0, y_{i,j,t} \geq 0, d_{i,j,t} \geq 0, \forall i, j, t; \quad (9)$$

$$x_{i,j,t} - \text{целое}; y_{i,j,t} - \text{целое}. \quad (10)$$

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, во-первых, что затраты на отправку грузовых контейнеров (строка 7) складывается из трех составляющих: затрат на автоперевозки (строка 3), затрат грузовой товарной станции (строка 5) и амортизационных отчислений за грузоподъемное оборудование и автотранспортные средства (строка 6). Во-вторых, отправка грузов 40-футовыми контейнерами обходится дешевле отправок 20-футовых контейнерами в расчете на 1 т груза (строка 9). В-третьих, затраты на отправку грузовых контейнеров собственным автотранспортом ниже только для 20-футовых контейнеров. Перевозка 40-футовых контейнеров собственным автотранспортом обойдется дороже, так как для этого используется новые приобретенные полуприцепы-контейне-

ровозы, и, соответственно, начисляется амортизация. Отметим здесь, что на собственный автотранспорт, предназначенный для перевозки 20-футовых контейнеров, амортизация не начисляется ввиду его полного износа.

Целевая функция (1) представляет собой сумму затрат на отправку грузовых контейнеров за вычетом из нее сборов за предъявление грузов ранее назначенного срока.

Условия по вместимости склада указываются в форме неравенства, которое соответствует формуле (2). По итогам прошедшего периода все контейнеры должны быть выгружены со склада, чтобы при $t = T$ вместимость склада должна быть равна нулю, данному ограничению соответствует формула (3). Ограничение по числу контейнеров i -го типа для загрузки j -ым способом за время t представлено формулой (4). Ограничение на количество контейнерных грузов, требующих загрузки в период t , представлено формулой (5). Ограничение на количество контейнерных грузов, которые могут быть отправлены в период времени t , представлено формулой (6). Ограничение на количество грузов, отправленных в контейнерах i -го типа, представлено формулой (7). Ограничение, представленное в виде формулы (8), позволяет сбалансировать количество загруженных и отправленных контейнеров в течение всего периода планирования $t \in \{1, \dots, T\}$.

При решении данной задачи необходимо учесть ограничения на неотрицательность и целочисленность переменных $x_{i,j,t}$, $y_{i,j,t}$ и $d_{i,j,t}$. Данные ограничения выражены формулами (9-10).

В рассмотренной выше постановке задача является детерминированной, т.е. она не учитывает возможные изменения объемов поставок по периодам планирования и возможную неравномерность (задержку) отправок грузов с железнодорожной товарной станции. Предлагается учитывать данные ограничения методом планирования сценариев. Базовый сценарий предполагает, что плановые и фактические величины загруженных $x_{i,j,t}$, отправленных $y_{i,j,t}$ и складированных $d_{i,j,t}$ контейнеров совпадают. В случае возникновения расхождения между плановыми и фактическими величинами данных показателей необходимо создавать новый сценарий. Допустим, что сбой – задержка отправки контейнеров с железнодорожной товарной станции на одну неделю – произошел в течение первой недели ($t = 1$). Таким образом, в первом периоде планирования возникло расхождение между планом, который нам дает базовый сценарий, и фактом, следовательно, необходимо рассмотреть сценарий 2, математическая постановка которого рассмотрена ниже.

Требуется вычислить переменные $x_{i,j,t}$ и $y_{i,j,t}$, обращающие в минимум линейную форму (11):

$$Z = \sum_t \left(\sum_i \sum_j \left(c_{i,j,t}^{(1)} y_{i,j,t} - c_{i,j,t}^{(2)*} * (d_{i,j,t-1} + x_{i,j,t} - y_{i,j,t}) \right) \right) \rightarrow \min; \quad (11)$$

при условиях, выраженных формулами (12-21):

$$\sum_i \sum_j \left(d_{i,j,t} + \sum_t (x_{i,j,t} - y_{i,j,t}) \right) \leq \quad (12)$$

$$\leq d_{i,t}, \forall i, j, t \in \{2, \dots, T-1\};$$

$$\sum_i \sum_j \left(d_{i,j,0} + \sum_t (x_{i,j,t} - y_{i,j,t}) \right) = \quad (13)$$

$$= 0, \forall i, j, t = T;$$

$$\sum_i \sum_j x_{i,j,t} \leq x_{i,j,t}^{\max}, \forall t \in \{2, \dots, T\}; \quad (14)$$

$$\sum_i \sum_j q_i x_{i,j,t} \geq Q_t, \forall t \in \{2, \dots, T\}; \quad (15)$$

$$\sum_j q_i y_{i,j,t} \geq Q_t^*, \forall t \in \{2, \dots, T\}; \quad (16)$$

$$\sum_i \sum_j q_i y_{i,j,t} \geq Q_t, \forall t \in \{2, \dots, T\}; \quad (17)$$

$$\sum_t x_{i,j,t} = \sum_t y_{i,j,t}, \forall i, j; \quad (18)$$

$$x_{i,j,t} \geq 0, y_{i,j,t} \geq 0, d_{i,j,t} \geq 0, \forall i, j, t \in \{2, \dots, T\}; \quad (19)$$

$$x_{i,j,t} = \text{const}, y_{i,j,t} = \text{const}, \forall i, j, t = 1; \quad (20)$$

$$x_{i,j,t} - \text{целое}; y_{i,j,t} - \text{целое}. \quad (21)$$

Таким образом, целевая функция (11) не претерпела никаких изменений и, по-прежнему, представляет собой сумму затрат на отправку грузных контейнеров за вычетом из нее сборов за предъявление грузов ранее назначенного срока за весь плановый период $t \in \{1, \dots, T\}$. Ограничения (12-21) в целом соответствуют ограничениям (2-10), но значения переменных $x_{i,j,t}$ и $y_{i,j,t}$ находятся при $t \in \{2, \dots, T\}$ и добавляем новые ограничения для переменных $x_{i,j,t} = \text{const}$, $y_{i,j,t} = \text{const}$, $\forall i, j, t = 1$.

Очевидно, что задержка отправки контейнеров с железнодорожной товарной станции может возникнуть в течение всего планового периода $t \in \{1, \dots, T\}$, т.е. в течение любой недели, поэтому необходимо рассмотреть альтернативные сценарии и построить их математические модели, которые будут аналогичны модели (11-21) сценария 1.

Рассмотрим численный пример, иллюстрирующий эффективность предложенной динамической многопериодной модели математического программирования для задачи выбора оптимальной стратегии отправки контейнеров и ее оптимизации по нескольким сценариям.

4. Численный пример

Допустим, что объем поставок контейнерных грузов Q_0 составляет 1500 т в месяц. Загрузка контейнеров на заводе осуществляется неравномерно: в неделю 1 каждого месяца $Q_1 = 600$ т, во неделю 2 $Q_2 = 400$ т, в неделю 3 $Q_3 = 300$ т, в неделю 4 $Q_4 = 200$ т. Отправка контейнеров с железнодорожной товарной станции должна осуществляться равномерно $Q_t = 375$ т, $t = \{1, 2, 3, 4\}$. Причем из них 20-футовыми контейнерами должны быть отправлены не менее: 300 т в неделю 1 ($Q_{1,1} = 300$ т), 200 т в неделю 2 ($Q_{1,2} = 200$ т), 150 т в неделю 3 ($Q_{1,3} = 150$ т) и 100 т в неделю 4 месяца

($Q_{1,4} = 100$ т). Но фактически это требование зачастую нарушается, ввиду того что происходит задержка отправки контейнеров с железнодорожной товарной станции сроком на семь дней или одну неделю.

Рассмотрим следующие сценарии.

Сценарий 1 (базовый): полагаем, что в базовом сценарии не было сбоев в отправке контейнеров с железнодорожной товарной станции за весь плановый период $t \in \{1, \dots, T\}$.

Сценарий 2, при котором $y_{i,j,t} = 0, \forall i, j, t = 1$ и соответственно $Q_{i,t} = 0, \forall i, t = 1$, т.е. в течение недели 1 с железнодорожной товарной станции не было отправок поездов с контейнерными грузами. Предположим, что задержка отправки поезда с контейнерными грузами составляет 7 дней, следовательно, грузы должны быть отправлены в течение недели 2.

Сценарий 3, при котором $y_{i,j,t} = 0, \forall i, j, t = 2$ и соответственно $Q_{i,t} = 0, \forall i, t = 2$, т.е. в течение недели 2 с железнодорожной товарной станции не было отправок поездов с контейнерными грузами. Предположим, что задержка отправки поезда с контейнерными грузами составляет 7 дней, следовательно, грузы должны быть отправлены в течение недели 3.

Сценарий 4, при котором $y_{i,j,t} = 0, \forall i, j, t = 3$ и соответственно $Q_{i,t} = 0, \forall i, t = 3$, т.е. в течение недели 3 с железнодорожной товарной станции не было отправок поездов с контейнерными грузами. Также считаем, что задержка отправки поезда с контейнерными грузами составляет 7 дней, следовательно, грузы должны быть отправлены в течение недели 4.

На отправку контейнерных грузов налагаются дополнительные ограничения. Количество контейнеров, готовых к еженедельной отправке с затаркой контейнера на полу и дальнейшей его погрузкой на полуприцеп-контейнеровоз с помощью крана или домкратов, – 5 шт. для любого предложенного подхода к загрузке. Заводской склад способен вмещать не более 20 шт. 20-футовых контейнеров, а также не более 10 шт. 40-футовых контейнеров. Для нахождения решения нужно вычислить оптимальные доли погруженных $x_{i,j,t}$, отправленных $y_{i,j,t}$ и переданных на хранение контейнеров $d_{i,j,t}$, с учетом которых совокупные затраты на доставку достигли бы минимума.

Численный результат предложенной задачи возможно получить с помощью дополнительной надстройки Excel, так как работа подразумевает обработку большого массива данных. Поиск решений произведен с помощью надстройки Analytic Solver Platform. Результаты решения данной задачи по сценарию 1 (базовому) представлен в табл. 2. Анализ найденных решений по всем четырем сценариям рассмотрен с помощью структуры отправок контейнеров, представленной в табл. 3.

Анализ сценария 1 (базового) показывает, во-первых, для отправки 1500 т контейнерных грузов в течение месяца потребуется 64 контейнера, в том числе 20-футовых – 41 ед. и 40-футовых – 23 ед. Во-вторых, в оптимальном решении используется 7 из 12

возможных способов отправки контейнеров. Не используются только два способа отправки 20-футовых контейнеров (автотранспортом сторонних организаций с затаркой контейнеров на полу по загрузкой их на автомобиль с использованием домкратов, а также с затаркой контейнеров без снятия его с автомобиля) и три способа отправки 40-футовых контейнеров (собственным автотранспортом с затаркой контейнеров на полу с дальнейшей погрузкой их с использованием крана и домкратов, а также сторонним автотранспортом с затаркой контейнеров на полу и погрузкой их с помощью крана). В данном случае общие затраты на

отправку контейнеров за 4-недельный период составят 438,8 тыс. руб. В-третьих, анализ использования контейнеров различных типов (см. табл. 3) показывает, что используются следующие способы загрузки:

- с загрузкой на полу с использованием крана – 20 контейнеров, в том числе 20-футовых – 19 ед., 40-футовых – 0 ед.;
- с загрузкой на полу с использованием домкратов – 20 контейнеров, в том числе 20-футовых – 16 ед., 40-футовых – 4 ед.;
- с загрузкой в автомобиль – 24 контейнера, в том числе 20-футовых – 5 ед., 40-футовых – 19 ед.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ ОТПРАВКЕ ГРУЖЕНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ (СЦЕНАРИЙ 1)¹

Показатели	Ед. изм.	20 футовый контейнер						40 футовый контейнер						Сумма
		собственный автотранспорт			автотранспорт сторонних организаций			собственный автотранспорт			автотранспорт сторонних организаций			
		затарка			затарка			затарка			затарка			
		на полу с использованием		в авто-мобиль	на полу с использованием		в авто-мобиль	на полу с использованием		в авто-мобиль	на полу с использованием		в авто-мобиль	
		кра-на	дом-крат-ов		кра-на	дом-крат-ов		кра-на	дом-крат-ов		кра-на	дом-крат-ов		
Неделя 1														
1. Затраты на 1 контейнер	руб.	6593,4	6271,1	7056,4	7109,2	6786,9	7572,2	8141,4	7729,2	8456,2	8120,3	7708,1	8435,1	–
2. Сбор за предъявление грузов ранее назначенного срока	руб.	628,7	628,7	0	628,7	628,7	0	911,6	911,6	0	911,6	911,6	0	–
3. Вес груза (брутто) в контейнере	т	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	–
4. Количество за-груженных контей-неров	ед.	7	10	5	0	0	0	0	0	2	0	3	0	27
5. Количество от-правленных контей-неров	ед.	5	5	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	17
6. Количество скла-дированных 20 фу-товых контейнеров на начало периода	ед.	0	0	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	0
7. Количество скла-дированных 40 фу-товых контейнеров на начало периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	0	0	0
8. Количество скла-дированных 20 фу-товых контейнеров на конец периода	ед.	2	5	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	7
9. Количество скла-дированных 40 фу-товых контейнеров на конец периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	3	0	3
10. Загружено грузов	т	150,5	215	107,5	0	0	0	0	0	55	0	82,5	0	610,5
11. Отправлено гру-зов	т	107,5	107,5	107,5	0	0	0	0	0	55	0	0	0	377,5
Еженедельные за-траты	руб.	109381									Итого отправлено грузов			377,5

¹ В табл. 2 пропущенные значения означают, что данные в строке относятся только 20-футовым контейнерам или только к 40-футовым контейнерам.

Показатели	Ед. изм.	20-футовый контейнер						40-футовый контейнер						Сумма
		собственный автотранспорт			автотранспорт сторонних организаций			собственный автотранспорт			сторонних организаций			
		затарка			затарка			затарка			затарка			
		на полу с использованием		в авто-мобиль	на полу с использованием		в авто-мобиль	на полу с использованием		в авто-мобиль	на полу с использованием		в авто-мобиль	
		крана	домкратов		крана	домкратов		крана	домкратов		крана	домкратов		
Неделя 2														
1. Затраты на 1 контейнер	руб.	6593,4	6271,1	7056,4	7109,2	6786,9	7572,2	8141,4	7729,2	8456,2	8120,3	7708,1	8435,1	–
2. Сбор за предъявление грузов ранее назначенного срока	руб.	628,7	628,7	0	628,7	628,7	0	911,6	911,6	0	911,6	911,6	0	–
3. Вес груза (брутто) в контейнере	т	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	–
4. Количество загруженных контейнеров	ед.	7	3	0	1	0	0	0	0	6	0	0	0	17
5. Количество отправленных контейнеров	ед.	4	5	0	1	0	0	0	0	6	0	0	0	16
6. Количество складированных 20 футовых контейнеров на начало периода	ед.	2	5	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	7
7. Количество складированных 40 футовых контейнеров на начало периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	3	0	3
8. Количество складированных 20 футовых контейнеров на конец периода	ед.	5	3	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	8
9. Количество складированных 40 футовых контейнеров на конец периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	3	0	3
10. Загружено грузов	т	150,5	64,5	0	21,5	0	0	0	0	165	0	0	0	401,5
11. Отправлено грузов	т	86	107,5	0	21,5	0	0	0	0	165	0	0	0	380
Еженедельные затраты	руб.	107811										Итого отправлено грузов	380	
Неделя 3														
1. Затраты на 1 контейнер	руб.	6593,4	6271,1	7056,4	7109,2	6786,9	7572,2	8141,4	7729,2	8456,2	8120,3	7708,1	8435,1	–
2. Сбор за предъявление грузов ранее назначенного срока	руб.	628,7	628,7	0	628,7	628,7	0	911,6	911,6	0	911,6	911,6	0	–
3. Вес груза (брутто) в контейнере	т	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	–
4. Количество загруженных контейнеров	ед.	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	12
5. Количество отправленных контейнеров	ед.	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	16
6. Количество складированных 20 футовых контейнеров на начало периода	ед.	5	3	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	8
7. Количество складированных 40 футовых контейнеров на начало периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	3	0	3
8. Количество складированных 20 футовых контейнеров на конец периода	ед.	2	1	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	3
9. Количество складированных 40 футовых контейнеров на конец периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	4	0	4
10. Загружено грузов	т	43	64,5	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5	165	300
11. Отправлено грузов	т	107,5	107,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	165	380
Еженедельные затрат	руб.	109400										Итого отправлено	380	

Неделя 4														
1. Затраты на 1 контейнер	руб.	6593,4	6271,1	7056,4	7109,2	6786,9	7572,2	8141,4	7729,2	8456,2	8120,3	7708,1	8435,1	–
2. Сбор за предъявление грузов ранее назначенного срока	руб.	628,7	628,7	0	628,7	628,7	0	911,6	911,6	0	911,6	911,6	0	–
3. Вес груза (брутто) в контейнере	т	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	–
4. Количество загруженных контейнеров	ед.	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8
5. Количество отправленных контейнеров	ед.	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	15
6. Количество складированных 20 футовых контейнеров на начало периода	ед.	2	1	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	3
7. Количество складированных 40 футовых контейнеров на начало периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	4	0	4
8. Количество складированных 20 футовых контейнеров на конец периода	ед.	0	0	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	0
9. Количество складированных 40 футовых контейнеров на конец периода	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	0	0	0
10. Загружено грузов	т	64,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137,5	202
11. Отправлено грузов	т	107,5	21,5	0	0	0	0	0	0	0	0	110	137,5	376,5
Еженедельные затраты	руб.	112245										Итого отправлено		376,5
Итого за 4 недели														
1. Общее кол. загруженных контейнеров	ед.	19	16	5	1	0	0	0	0	8	0	4	11	64
2. Общее кол. отправленных контейнеров	ед.	19	16	5	1	0	0	0	0	8	0	4	11	64
3. Общее кол. складированных 20 футовых контейнеров	ед.	5	5	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	10
4. Общее кол. складированных 40 футовых контейнеров	ед.	–	–	–	–	–	–	0	0	0	0	4	0	4
5. Общее кол. загруженных грузов	т	408,5	344	107,5	21,5	0	0	0	0	220	0	110	302,5	1514
6. Общее кол. отправленных грузов	т	408,5	344	107,5	21,5	0	0	0	0	220	0	110	302,5	1514
Общие затраты за 4-х недельный период	руб.													438838,68

Таблица 3

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Показатели	Ед. изм.	Значения для сценария			
		Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Итого отправлено контейнеров, в том числе:	ед.	64	64	64	64
20-и футовых контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием крана	ед.	20	11	17	20
40-а футовых контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием крана	ед.	0	4	1	0
Всего отправлено контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием крана	ед.	20	15	18	20
20-и футовых контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием домкратов	ед.	16	12	13	16
40-а футовых контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием домкратов	ед.	4	3	6	4
Всего отправлено контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием домкратов	ед.	20	15	19	20
20-и футовых контейнеров с затаркой в автомобиль	ед.	5	18	11	5
40-а футовых контейнеров с затаркой в автомобиль	ед.	19	16	16	19

Показатели	Ед. изм.	Значения для сценария			
		Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Всего отправлено контейнеров с затаркой в автомобиль	ед.	24	34	27	24
Всего отправлено 20-и футовых контейнеров	ед.	41	41	41	41
Всего отправлено 40-а футовых контейнеров	ед.	23	23	23	23
Количество использованных способов загрузки контейнеров	ед.	7	8	8	7.
Общие затраты	тыс. руб.	438,8	436,4	433,3	432,6
Увеличение (+) / снижение (-) общих затрат по сравнению со сценарием 1	%	-	-0,55%	-1,27%	-1,43%

В-четвертых, обращает на себя внимание, что общее количество складированных 20-футовых контейнеров составляет 10 ед., а 40-футовых – 4 ед., что значительно меньше ограничения по емкости склада, которое для 20-футовых контейнеров составляет 20 ед., а для 40-футовых – 10 ед. Очевидно, что данного количества складированных контейнеров достаточно для выравнивания неравномерности их отправки потребителям с железнодорожной товарной станции.

Анализ сценариев 2-4, предполагающих ситуацию сбоев в отправки контейнеров с железнодорожной товарной станции, показывает, что, во-первых, во всех случаях для отправки 1500 т контейнерных грузов в течение месяца потребуется 64 контейнера, в том числе 20-футовых – 41 ед. и 40-футовых – 23 ед., но в каждом из сценариев используются различные способы загрузки контейнеров.

Во-вторых, затраты снижаются по сравнению с базовым вариантом: в соответствии со сценарием 2 – на 0,55%, в соответствии со сценарием 3 – на 1,27% и в соответствии со сценарием 4 – на 1,43%. Снижение затрат обусловлено ослаблением ограничений в данной задаче. Прежде всего ослабляется ограничение на количество грузов, которое должно быть отправлено с железнодорожной товарной станции в течение недели. Очевидно, что ввиду задержки отправки контейнерных грузов на одну неделю первоначальное ограничение ($Q_t = 375$ т, $t = \{1, 2, 3, 4\}$) не может быть выполнено. Также ослабляются ограничения на еженедельно отправляемое количество контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием крана, а также на еженедельно отправляемое количество контейнеров с затаркой на полу и погрузкой с использованием домкратов. Следует отметить, что без ослабления данных ограничений задача не имеет решения.

Следовательно, в случае сбоев (задержек в отправки контейнеров с железнодорожной товарной станции на одну неделю) существующих погрузочных мощностей недостаточно. Возможными путями решения этой проблемы являются применение сверхурочного труда или закупка дополнительного оборудования (крана и домкратов) для погрузки контейнеров на полуприцеп-контейнеровоз.

Заключение

Рассмотренный достаточно сложный пример, основанный на реальных данных, показывает, что анализ затрат далеко не всегда позволяет принять правильное решение относительно способов отправки контейнерных грузов. Модели линейного

программирования, являющиеся мощным инструментом поддержки принятия управленческих решений, должны более активно использоваться менеджерами. Предложена динамическая многопериодная модель задачи об отправке груженых контейнеров (11-21), которая позволяет осуществлять выбор оптимальной стратегии отправки контейнеров с учетом существенной неравномерности их загрузки и отправки с железнодорожной товарной станции. Представлено численное решение, которое подтверждает, что метод динамического линейного программирования может быть успешно использован для решения задачи выбора оптимальной стратегии отправки контейнеров в условиях существенной неравномерности их загрузки и отправки.

Литература

1. Бочкарев А.А. Оптимизация перевозок контейнерных грузов [Текст] / А.А. Бочкарев // Логистика и управление цепями поставок. – 2012. – №1. – С. 43-55.
2. Бочкарев А.А. Процессный подход к моделированию и интегрированному планированию цепи поставок: Теория и методология [Текст] : монография / А.А. Бочкарев. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. – 290 с.
3. Гольштейн Е.Г. Специальные направления в линейном программировании [Текст] / Е.Г. Гольштейн, Д.Б. Юдин. – 2-е изд., испр. – М. : КРАСАНД, 2010. – 528 с.
4. Мадера А.Г. Моделирование и принятие решений в менеджменте: руководство для будущих топ-менеджеров [Текст] : учеб. / А.Г. Мадера. – М. : Изд-во ЛКИ, 2015. – 688 с.
5. Шапиро Д. Моделирование цепи поставок [Текст] / Джереми Ф. Шапиро ; пер. с англ. под ред. В.С. Лукинского. – СПб. : Питер, 2006. – 720 с.
6. Юдин Д.Б. Задачи и методы линейного программирования: математические основы и практические задачи [Текст] / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – 3-е изд. – М. : ЛИБРОКОМ, 2010. – 320 с.
7. Юдин Д.Б. Математические модели управления в условиях неполной информации: задачи и методы стохастического программирования [Текст] / Д.Б. Юдин. – М. : КРАСАНД, 2017. – 400 с.
8. Юдин Д.Б. Задачи и методы линейного программирования: задачи транспортного типа [Текст] / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – 3-е изд. – М. : ЛИБРОКОМ, 2010. – 184 с.
9. Юдин Д.Б. Экстремальные модели в экономике [Текст] / Д.Б. Юдин, А.Д. Юдин. – М. : ЛИБРОКОМ, 2015. – 312 с.
10. Bakir I. et al. Scenario set partition dual bounds for multi-stage stochastic programming: a hierarchy of bounds and a partition sampling approach [Electronic resource] / I. Bakir, N. Boland, B. Dandurand, A. Erera // J. on computing. – 2016. – Dec. URL: <http://www.optimization->

- online.org/DB_HTML/2016/01/5311.html (дата обращения: 04.07.2018).
11. Bertsekas D.P. Network optimization: continuous and discrete models [Text] / Dimitri P. Bertsekas. – Athena Scientific, Belmont, USA, 1998. – P. 585.
 12. Bochkarev A.A. Selection and lot-sizing optimization problem under changing demand [Text] / A.A. Bochkarev, P.A. Bochkarev // Global interdisciplinary business-economics and advancement conference (GIBA) (5-18 may 2014, Clear-water beach, Florida, USA) ; co-ed. prof. dr. Cihan Cobanoglu, prof. dr. Serdar Ongan. – University of South Florida Sarasota-Manatee, USA, 2014. – Pp. 645-651.
 13. Christian B. Solution approaches to large scale multistage stochastic programs with endogenous and exogenous uncertainty [Electronic resource] : PhD Dissertation / Brianna Christian. – Auburn, Alabama. – 2017. – Dec. 16. – 196 p. URL: <http://hdl.handle.net/10415/6046>.
 14. Defourny B. et al. Multistage stochastic programming: a scenario tree based approach to planning under uncertainty [Electronic resource] / B. Defourny, D. Ernst, L. Wehenkel // University of liege, Belgium. – 2011. URL: <http://hdl.handle.net/2268/80246>.
 15. DeMiguel V. What multistage stochastic programming can do for network revenue management [Electronic resource] / V. DeMiguel, N. Mishra ; London business school. – 2006. URL: <http://faculty.london.edu/avmiguel/DeMiguel-Mishra-Manuscript.pdf>.
 16. Ding T. et al. Multi-stage stochastic programming with nonanticipativity constraints for expansion of combined power and natural gas systems [Electronic resource] / T. Ding, Y. Hu, Z. Bie // IEEE transactions on power systems. – 2018. – Vol. 33 ; iss. 1. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7921436/>.
 17. Farahani R.Z. Facility location: concepts, models, algorithms and case studies [Text] / Reza Zanjirani Farahani. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – P. 549.
 18. Farahmand A. et al. Truncated approximate dynamic programming with task-dependent terminal value [Electronic resource] / A. Farahmand, D.N. Nikovski, Y. Igarashi, H. Konaka // AAAI'16 proceedings of the thirtieth AAAI conference on artificial intelligence. – 2016. – Pp. 3123-3129. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3016340>.
 19. Gupta V. Solution strategies for multistage stochastic programming with endogenous uncertainties [Electronic resource] / V. Gupta, I.E. Grossmann // Computers & Chemical engineering. – 2011. – Vol. 35 ; iss. 11. – Pp. 2235-2247. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135410003601>.
 20. Kaňková V. Multistage stochastic programming via autoregressive sequences [Text] / V. Kaňková // Acta oeconomica pragensia. – 2007. – Vol. 2007 ; iss. 4. – Pp. 99-110. URL: <http://www.vse.cz/polek/download.php?jnl=aop&pdf=79.pdf>
 21. Philpott A.B. Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion [Electronic resource] / A.B. Philpott, V.L. de Matos // European j. of operational research. – 2012. – Vol. 218 ; iss. 2. – Pp. 470-483. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221711010332>.
 22. Powell W.B. What you should know about approximate dynamic programming [Electronic resource] / W.B. Powell // Naval research logistics. – 2009. – Vol. 56 ; iss. 3. – Pp. 239-249. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nav.20347>.
 23. Rockafellar R.T. Duality and optimality in multistage stochastic programming [Electronic resource] / R.T. Rockafellar // Annals of operations research. – 1999. – Vol. 85 ; iss. 0. – Pp. 1-19. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1018909508556>.
 24. Saint-Guillain M. et al. A multistage stochastic programming approach to the dynamic and stochastic VRPTW [Electronic resource] / M. Saint-Guillain, Y. Deville, C.A. Solnon // International conference on AI and OR techniques in constraint programming for combinatorial optimization problems CPAIOR. – 2015. – Pp. 357-374. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18008-3_25.
 25. Schwartz R. et al. Limited multistage stochastic programming for water distribution systems optimal operation [Electronic resource] / R. Schwartz, M. Housh, A. Ostfeld // J. of water resources planning and management. – 2016. – Vol. 142 ; iss. 10. URL: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000687>.
 26. Sen S. Multistage stochastic decomposition: a bridge between stochastic programming and approximate dynamic programming [Electronic resource] / S. Sen, Z. Zhou // SIAM j. on optimization. – 2014. – Vol. 24 ; iss. 1. – Pp. 127-153. URL: <https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/120864854>.
 27. Snyder S.A. et al. A scenario optimization model for dynamic reserve site selection [Electronic resource] / S.A. Snyder, R.G. Haight, C.S. ReVelle // Environmental modeling & assessment. – 2004. – Vol. 9 ; iss. 3. – Pp. 179-187. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:ENMO.0000049388.71603.7f>.
 28. Shapiro A. Inference of statistical bounds for multistage stochastic programming problems [Electronic resource] / A. Shapiro // Mathematical methods of operations research. – 2003. – Vol. 58 ; iss. 1. – Pp. 57-68. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s001860300280>.
 29. Suo M.Q. et al. An inventory-theory-based inexact multistage stochastic programming model for water resources management [Electronic resource] / M.Q. Suo, Y.P. Li, G.H. Huang, Y.R. Fan, Z. Li // Mathematical problems in engineering. – 2013. – Vol. 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/482095>.
 30. Zeng Z. Multistage stochastic programming models for pharmaceutical clinical trial planning [Electronic resource] / Z. Zeng, S. Cremaschi // Processes. – 2017. – Vol. 5 ; iss. 4. URL: <https://doi.org/10.3390/pr5040071>.

Ключевые слова

Логистика; распределение; динамическое линейное программирование; планирование сценариев.

Бочкарев Андрей Александрович
E-mail: abochkarev@hse.ru

Бочкарев Павел Андреевич
E-mail: pbochkarev@hse.ru

Франюк Роман Анатольевич
E-mail: rafranyuk@mail.ru

РЕЦЕНЗИЯ

Статья А.А. Бочкарева, доктора экономических наук, доцента, профессора Департамента логистики и управления цепями поставок Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» – Санкт-Петербург, П.А. Бочкарева, кандидата экономических наук, преподавателя Департамента логистики и управления цепями поставок Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» – Санкт-Петербург и Р.А. Франюка, кандидата экономических наук, доцента Образовательной автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Магнитогорский институт дополнительного образования» посвящена актуальной проблеме применения методов математического программирования к решению задачи выбора оптимальной стратегии отправки контейнеров

с железнодорожной товарной станции с учетом существенной неравномерности загрузки и отправки контейнеров.

Авторы справедливо обращают внимание на необходимость в разработке новых моделей планирования и управления цепями поставок в условиях неполной информации и методов, позволяющих их исследовать.

Авторами предложена математическая модель динамической многопериодной задачи об отправке груженых контейнеров, которая позволяет осуществлять выбор оптимальной стратегии отправки контейнеров с учетом существенной неравномерности их загрузки и отправки с железнодорожной товарной станции. Представлен численный пример, который показывает эффективность использования метода динамического линейного программирования для решения рассмотренной задачи.

Статья А.А. Бочкарева, П.А. Бочкарева и Р.А. Франюка удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научным публикациям в журнале «Аудит и финансовый анализ», и может быть рекомендована для публикации.

Малевиц Ю.В., д.э.н., профессор, декан факультета бизнеса, таможенного дела и экономической безопасности, заведующий кафедрой таможенного дела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», г. Санкт-Петербург.