

УДК 676.004.3:518.5

В.А. Кузнецов

Кузнецов Владимир Алексеевич родился в 1949 г., окончил Ленинградский государственный университет, кандидат экономических наук, и.о. заведующего кафедрой прикладной математики и кибернетики Петрозаводского государственного университета, заслуженный деятель науки Республики Карелия. Имеет свыше 100 печатных трудов в области экономико-математического моделирования, управления и автоматизации в лесном комплексе.



ПЛАНИРОВАНИЕ ПОГРУЗКИ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА В ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

Предложены математические модели и методы решения задачи оптимальной погрузки рулонов бумаги и картона в транспортные средства. Рассмотрены варианты погрузки в контейнеры или вагоны, приведены алгоритмы решения задачи, основные функции программной системы планирования отгрузки.

Ключевые слова: ЦБК, планирование и оптимизация погрузки готовой продукции, математические модели, транспортные средства.

Затраты на транспортировку продукции ЦБК составляют немалую часть полной себестоимости. При этом нередко появляются сверхнормативные затраты, когда при загрузке вагона или контейнера, в случае неправильно подобранной партии продукции или несоответствия транспортного средства, не полностью используются его объем, грузоподъемность, или то и другое, что особенно нежелательно при дефиците транспортных средств (ТС). Кроме того, транспортные условия могут повлиять на качество доставленной продукции, вызывая претензии заказчика и возможные штрафные санкции. Таким образом, выбор транспортных средств и планирование отгрузки продукции становятся существенным фактором повышения эффективности и экономических показателей производства.

Планирование отгрузки рулонов бумаги или картона выполняется оператором отгрузки и в случае одного-двух форматов, как правило, не представляет большой сложности. Однако если форматов три-пять, число вариантов размещения рулонов существенно возрастает и поиск наилучшего с учетом выполнения необходимых условий требует трудоемких расчетов. Задача усложняется, а потенциальные потери могут возрастать при увеличении номенклатуры форматов продукции или выборе средств транспортировки (контейнер, вагон, трюм теплохода).

В статье решен комплекс задач, связанных с выбором транспортных средств и погрузкой продукции. Объектами планирования являются продукция ЦБК в виде рулонов бумаги или картона различных форматов и диаметров и контейнеры, вагоны или трюмы теплоходов, грузовые емкости

которых представляют собой прямоугольные параллелепипеды. При этом необходимо соблюдать соответствующую технологию погрузки и учитывать: размеры и форму транспортного средства и ворот, высоту у стенок и в центре вагона, карнизы трюмов, возможные перемещения погрузчиков, положение центра тяжести, жесткость размещения груза и ряд других параметров.

Желательно также найти схемы погрузки, которые исключали бы незаполненность транспортного средства или недогруз части партии бумаги заказчику.

Обозначим вид продукции (или формат) как совокупность цилиндрических рулонов картона или бумаги одинаковой высоты (формата) и близких по диаметру. Характеристика вида продукции: формат, средний диаметр, плотность или средний вес рулона. Предметы раскроя в данной задаче – рулоны определенной номенклатуры форматов.

Таким образом, заказ представляет собой набор форматов с указанием объема отгрузки каждого из них. Возможно точное определение или указание верхней и нижней границ объема продукции в тоннах или единицах рулонов. Число различных форматов в составе заказа может быть произвольным.

Разработанная программная система предназначена для решения ряда взаимосвязанных задач выбора транспортных средств, уточнения объемов и построения схем погрузки продукции.

1. Задан набор (количество) ТС. Требуется определить наибольшую по объему или стоимости партию продукции, которую можно отгрузить, используя данные транспортные средства.

2. Заданы объемы партии продукции конкретных форматов. Требуется определить наименьший по затратам или количеству набор ТС.

3. Задача отличается от предыдущей тем, что объемы отгрузки заданы нижней и верхней границами. Требуется определить объемы, которые обеспечат наиболее эффективное заполнение ТС, предназначенных для перевозки.

4. Задача совмещает условия двух предшествующих: объемы продукции и количества ТС каждого вида заданы нижней и верхней границами.

Решение данных задач связано с исследованием ряда вспомогательных задач:

наиболее равномерное по весу, объему или их совокупности распределение грузов между однотипными контейнерами;

равномерное разбиение номенклатуры рулонов на вертикальные столбики;

размещение столбиков по площади транспортного средства с учетом технологии погрузки: размеров и формы ворот, высоты у стенок и в центре вагона, карнизов трюмов, возможных перемещений погрузчика, положения центра тяжести и жесткости размещения груза;

наглядное графическое отображение полученных схем погрузки.

Алгоритм решения комплекса задач состоит из нескольких последовательно выполняемых (возможно с возвратом) шагов.

Шаг 1. Для каждого из рассматриваемых ТС и диаметра единицы продукции рассчитывают число рулонов, которые помещаются на дно данного контейнера при наиболее плотной загрузке, определяют процент использования площади ТС и максимальную допустимую по грузоподъемности среднюю высоту рулона. На данном этапе фактически выполнена разметка площади ТС на будущие точки погрузки центров рулонов.

Шаг 2. Каждая точка погрузки в дальнейшем будет занята рулоном продукции или столбиком рулонов. Необходимо определить состав этого столбика. Его высота не должна превышать высоту ТС.

Шаг 3. Среди всех вариантов надо выбрать те, которые обеспечат погрузку продукции необходимого ассортимента с наибольшим по весу и объему заполнением ТС. Это достигается решением задачи целочисленной линейной оптимизации с ограничениями по массе и объему продукции внутри каждого ТС. Функционал задачи определяют выбранным критерием эффективности (минимум транспортных расходов, числа ТС и пр.). Возможно указать допуски на грузоподъемность и габариты ТС.

В результате расчетов получают схему отгрузки, в которой задействована часть видов ТС и указаны схемы формирования столбцов, необходимые для обеспечения: погрузки рулонов каждого вида, заданного их числом или границами; ограничений числа ТС каждого вида и грузоподъемности; по возможности плотного заполнения ТС; оптимума по одному из заданных функционалов; наименьшего количества требуемых ТС; наименьших затрат на аренду и эксплуатацию ТС; максимальной допустимой плотности загрузки ТС; подсчета необходимого числа ТС.

Шаг 4. Определяется распределение грузов между ТС. При этом нужно учесть, что из двух факторов (вес и объем) обычно только один лимитирует загрузку ТС. В первом случае груз следует разместить равномерно по весу (не заботясь о столбиках), во втором – по числу столбиков. На этом этапе можно обеспечить единообразие схем загрузки ТС или минимизировать число форматов продукции в каждом из них.

Шаг 5. Уточнение состава и числа столбцов с учетом вместимости ТС по площади и объему. Задача появляется только в том случае, когда загрузка лимитирует вес, но не объем продукции. Тогда число столбиков меньше определенного на первом этапе, и потребуется разбиение наиболее высоких столбиков примерно пополам.

Шаг 6. Выбор мозаики на днище ТС. На этом этапе вычисляются координаты геометрических центров столбиков рулонов. Размещение рулонов стандартных диаметров внутри обычного контейнера (а не вагона или трюма теплохода) не составляет проблемы, их выстраивают в два ряда. Задача намного сложнее, если ширина транспортного средства больше удвоенного диаметра рулона, что существенно увеличивает множество вариантов заполнения площади пола. Условно такие варианты делятся на наиболее плотные регулярные и нерегулярные, симметричные относительно центра

ТС или оси. Выбор варианта зависит от плотности и технологии погрузки. Конструкция решетки должна обеспечивать жесткость положения груза.

Шаг 7. Размещение столбцов по площади ТС с учетом балансировки и жесткости конструкции. В случае одного формата столбики различаются только числом рулонов. Задача значительно усложняется, если в одно ТС приходится загружать рулоны нескольких форматов. Регулировать положение центра тяжести удастся перестановкой определенного количества крайних столбиков.

Шаг 8. Формирование наглядного графического отображения схемы размещения.

Рассматриваемая задача требует достаточно тонкой техники оптимизации, она совмещает свойства задачи раскроя (расположение рулонов по высоте транспортного средства), геометрического размещения кругов внутри прямоугольника (рулоны на днище) и целочисленного линейного программирования, поскольку методы линейной оптимизации не всегда обеспечивают целочисленность результатов расчетов.

При этом рассматривается несколько комбинаторных вспомогательных задач, решение которых позволяет:

а) распределить расчетное число рулонов разных форматов между ТС одинакового вида. Здесь возможны две стратегии: обеспечить, по возможности, минимальную номенклатуру форматов в каждом ТС или примерно одинаковое заполнение каждого из них. Эти две стратегии приводят к совершенно различным результатам, на практике возможно применение любой из них;

а) для каждого ТС определить оптимальное число столбиков, которые будут содержать все предназначенные для погрузки рулоны. Задача весьма актуальна при использовании больших по объему, но недостаточных по грузоподъемности ТС, ввиду целесообразности плотного заполнения всей площади днища;

в) распределить рулоны, предназначенные для погрузки в одно ТС, между столбиками таким образом, чтобы минимизировать разницу между самым высоким и самым низким из них. Это необходимо, чтобы обеспечить жесткость конструкции заполнения ТС;

г) распределить столбики внутри ТС так, чтобы минимизировать отклонение центра тяжести системы от геометрического центра.

Остановимся подробнее на вспомогательных задачах в составе данного алгоритма.

Задача 1. Задача построения столбиков рулонов сводится к оптимизации раскроя высоты контейнера на форматы рулонов. Использование метода генерации столбцов позволяет решать задачу линейного раскроя в качестве вспомогательной при проверке оптимальности текущего базисного плана следующей задачи.

Задача 2. Основная задача линейной оптимизации соответствует выбору планов с учетом групп объектов раскроя. Ее решение можно интерпретировать как выбор способов заполнения каждого ТС столбиками рулонов, с

учетом геометрического размещения и грузоподъемности, жесткости конструкции и положения центра тяжести, соответствия содержимого ТС структуре заказа. Все перечисленные условия и требования невозможно согласовать в рамках одной модели, поэтому постановку исходной задачи придется «ослабить».

Для этого допустимо не учитывать жесткость конструкции, положение центра тяжести и разрешить загружать в ТС не целое количество определенных столбиков рулонов. Тогда исходная задача упростится до задачи линейного программирования, поскольку занятый объем и масса груза линейно зависят от числа помещенных в ТС рулонов. Полученную задачу назовем центральной вспомогательной, ее цель – определить состав и количественное соотношение наиболее эффективных столбиков рулонов для каждого вида ТС.

Определим данные задачи:

M – множество форматов продукции (предметов раскроя);

B_i^y, b_i^y – верхняя и нижняя границы числа планируемых к отгрузке рулонов формата $i \in M$;

Q – множество видов ТС;

B_q^v – известное количество имеющихся ТС;

v_q – необходимое число ТС вида $q \in Q$;

W_q – грузоподъемность;

C_q^y – эксплуатационные расходы;

K – множество высот столбиков рулонов всех ТС;

$K_q \subset K$ – группа объектов раскроя, относящихся к ТС ($q \in Q$);

N_k – множество конструкций столбиков рулонов, определяемых соответствующей высотой, $N = \cup_{k \in K} N_k$;

h_j – высота;

w_j – вес;

x_j – неизвестное число планируемых к погрузке столбиков конструкции $j \in N$;

d_{qj} – доля площади днища ТС $q \in Q$ под столбиком $j \in N_q$;

a_{ij} – число рулонов продукции формата $i \in M$ в столбце $j \in N$.

Хотя ТС разного вида могут вмещать столбики одинаковой высоты, их следует различать, т. е. множества K_q считать непересекающимися. Границы числа рулонов B_i^y и b_i^y могут совпадать, жестко задавая объем продукции, или различаться ($b_i^y > B_i^y$), допуская отклонения для наиболее полного использования ТС. Можно определить $c_i^y = 1$ и получить задачу определения минимального количества ТС, необходимого для отгрузки заказа, или $c_i^y = W_i$, максимизируя плотность загрузки. Для определения d_{qj} требуется решить специальную задачу геометрической оптимизации, параметры a_{ij} можно получить в результате решения предшествующей задачи.

Сформулируем математическую модель. В качестве функционала выберем минимум следующей линейной зависимости:

$$\sum_{q \in Q} c_q^y y_i - \theta \left(\sum_{q \in Q} \sum_{j \in N_q} d_{qj} x_j \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где θ – полученное подбором малое положительное число.

Условия задачи:

устанавливают границы объемов отгрузки:

$$b_i^y \leq \sum_{j \in N} a_{ij} x_j \leq B_i^y, \quad i \in M; \quad (2)$$

связывают неизвестные количества столбцов и контейнеров:

$$\sum_{j \in N_q} d_{qj} x_j \leq y_q, \quad q \in Q; \quad (3)$$

связывают вес груза и грузоподъемность ТС:

$$\sum_{j \in N_q} w_j x_j \leq W_q y_q, \quad q \in Q; \quad (4)$$

ограничивают количество ТС:

$$0 \geq y_q \geq B_q^y, \quad q \in Q; \quad (5)$$

учитывают условие неотрицательности:

$$x_j \geq 0, \quad j \in N. \quad (6)$$

Математическую модель логично дополнить условием целочисленности переменных: x_s – целые, $s \in S$; y_i – целые, $i \in M$.

Количество конструкций столбиков $j \in N$ значительно, в связи с чем непосредственное решение столь большой задачи целочисленной оптимизации весьма затруднено да и не нужно, принимая во внимание ряд проблем с расчетом параметров a_{ij} .

Использование метода генерации столбцов $j \in N$ при решении задачи (1)–(6) позволяет не хранить в памяти матрицу раскроев, а чередовать итерации симплексного метода с решением одной или нескольких задач линейного раскроя.

Математическую модель легко изменить, чтобы учитывать разную высоту столбцов (к примеру у стенок, в центре и возле ворот вагона, под карнизами и в середине трюма теплохода), вместо столбцов рассматривать этажи или слои груза.

Целочисленность переменных y_q достигается посредством использования метода ветвей и границ в результате многократного решения вспомогательной задачи (1)–(6) с пересчетом коэффициентов c_j и правых частей B_q^y . Решение проблем, связанных с дробными значениями x_s^* , требует несколько иной техники комбинаторной оптимизации.

Задача 3. Задача распределения рулонов завершает расчет плана погрузки. Переход от линейной модели к схемам погрузки связан с решением

ряда весьма своеобразных комбинаторных задач а) – г), сформулированных в шаге 8.

Чтобы построить требуемые схемы загрузки каждого ТС, необходимо решить эти задачи в указанной последовательности, поскольку каждая из них уточняет решение предшествующей. Все эти задачи могут быть записаны в виде математической модели и решены точно, однако в этом нет необходимости.

Для поиска приближенных решений задач а) и в) используется простой «жадный» алгоритм. Далее решения улучшаются за счет перестановок рулонов по два-три в соответствии с вычислительной схемой метода локальной оптимизации. При решении задачи а) можно учитывать индивидуальные особенности ТС – отклонения грузоподъемности (до 8 % собственного веса) и их геометрических размеров. Приближенные решения задач б) и г) основаны на симметрии планов погрузки.

Практика использования разработанной программной системы для решения задачи погрузки на ряде ЦБК показала, что обычно удается плотнее размещать рулоны и увеличивать на 5 ... 10 % вес отгружаемой продукции. Это позволяет сократить число используемых вагонов и контейнеров, повысить загрузку теплоходов.

Другим немаловажным преимуществом системы является наличие удобного для оператора средства моделирования процесса погрузки, которое позволяет:

- быстро рассчитать оптимальные схемы отгрузки;
- сравнить различные схемы и выбрать самую технологичную;
- определить наиболее подходящий набор вагонов и контейнеров для запланированного объема отгрузки;
- представить полученные схемы в печатном виде с указанием всех необходимых числовых показателей отгрузки и вида транспортного средства (размеры, центр тяжести, жесткость размещения груза, вес и форматы бумаги и др.).

Таким образом, программная система планирования отгрузки рулонов бумаги дает возможность:

- сократить время расчета схем отгрузки и освободить оператора от выполнения трудоемких расчетов;
- рассчитать число необходимых транспортных средств для отгрузки заказчику требуемой партии продукции различных форматов;
- увеличить плотность загрузки транспортных средств с выполнением всех технологических требований;
- гарантировать оптимальность выбранных схем отгрузки;
- иметь печатные графические документы по отгрузке каждого вагона, контейнера или трюма теплохода, что очень удобно для отчетности и в случае возникновения рекламаций, связанных с доставкой продукции заказчиком.

Программная система легко настраивается на любые размеры и формы транспортных средств, может быть адаптирована к «геометрии»

трюмов, отличной от параллелепипеда, предоставляет пользователю всю необходимую справочную информацию и печатные документы. Система разработана с использованием языка программирования C++, имеет удобный интерфейс с пользователем, легко настраивается на реальный технологический процесс на разных предприятиях. В настоящее время эта система используется в ОАО «Кондопога», внедряется в ОАО «Сегежский ЦБК».

В дальнейшем планируется расширить функции программной системы, создать систему оперативного управления отгрузкой готовой продукции, что позволит координировать работу цеха погрузки, отдела сбыта и производств комбината.

Более подробно описание этой и других разработок, математические модели и методы решения прикладных оптимизационных задач для предприятий лесопромышленного комплекса изложены в работах [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А.В., Кузнецов В.А. Математические модели и методы в планировании и управлении предприятием ЦБП. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. – 256 с.
2. Кузнецов В.А. Задачи раскроя в целлюлозно-бумажной промышленности. – СПб.: Изд-во СПбЛТА, 2000. – 96 с.

Петрозаводский государственный
университет
Поступила 17.01.03

V.A. Kuznetsov

Planning of Loading Finished Products of Pulp-and-paper Mill on Vehicles

Mathematical models and methods have been proposed for solving problems of optimal loading of paper and cardboard reels on vehicles. Variants of loading in containers or railcars are considered, algorithms for solving problem and basic functions for software system of shipment planning are provided.