

# ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 658.7:669.06.048.88

Файнштейн С.И., Тугарова В.Д., Калитаев А.Н., Букреев А.Ю., Колесников Е.Ф.

## ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ НА СКЛАДАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 1. Актуальность

Анализ работ по планированию и управлению производством отечественных предприятий показал, что главной задачей, дающей наибольший экономический эффект, является оперативное управление производством, которое является своеобразным индикатором достигнутого уровня организации производства. Оперативное управление производством, в свою очередь, невозможно без оперативного планирования (ОП), то есть развертывания плана выполнения работ во времени. Однако реализовать оптимизационные методы в оперативном планировании крайне сложно.

Оптимизация краткосрочного планирования требует оперативной переработки больших объемов информации и проведения трудоемких расчетов. Кроме того, аргументированное составление и последующая четкая реализация краткосрочных планов должны основываться на формализованных производственных маршрутах движения продукции (в нашей задаче – металла), в противном случае неизбежны ситуации, когда краткосрочные планы не будут своевременно обеспечены необходимыми ресурсами и, следовательно, окажутся невыполнимыми.

Таким образом, эффективное краткосрочное планирование невозможно без тщательно проработанного математического аппарата и применения средств вычислительной техники.

Решение данной проблемы планируется рассмотреть на примере организации склада готовой продукции листопрокатного цеха № 4 (ЛПЦ-4) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Склад готовой продукции состоит из складов слябов, рулонов и пачек. В данной работе будет рассмотрен склад пачек. Предварительно были собраны исходные данные, отражающие работу этого участка цеха, и определены ограничения и допущения, предлагаемые для применения к разрабатываемому алгоритму размещения готовой продукции.

Склад готовой продукции, предназначенный

для размещения, хранения и отгрузки пачек с листами ЛПЦ-4 состоит из территории, схематично представленной ниже.

### 2. Эвристическая модель склада

Для решения задачи оперативного планирования складских операций обратимся к эвристической модели пространства состояний, нашедшей широкое применение в робототехнике. С точки зрения робототехники в модели «СКЛАД» исполнителем допустимых операций является подъемный кран грузоподъемностью 10 т, а целью оперативного планирования – составление для исполнителя плана последовательных действий. Для корректного построения модели нам нужно определить:

- начальное состояние задачи;
- допустимые операции (ходы), переводящие задачу из одного состояния в другое, причем каждому ходу сопоставляется некоторая стоимость;
- терминальные (целевые) состояния, по достижении которых задача считается решенной и выбрать стратегию управления поиском.

Заметим, что цель поиска заключается не в том, чтобы сформировать для исполнителя план перевода задачи из начального состояния в терминальное, а в том, чтобы исполнитель сделал это последовательностью ходов минимальной стоимости.

#### *Начальное состояние задачи*

Центральным объектом нашей модели является склад. Готовая продукция поступает на склад с одного из **R агрегатов резки**, причем номер агрегата резки определяет диапазон возможного типоразмера продукции и отгружается в один из тупиков.

Непосредственно склад состоит из **L параллельных линий ячеек** стандартной площади и конфигурации, в разных линиях может находиться разное количество ячеек. Кроме того, в каждой линии склада имеется одна особая безразмерная ячейка, называемая **изолятор**, и каж-

дая линия ячеек имеет один **тупик**, куда производится отгрузка.

Минимальный элемент любой операции размещения/отгрузки – **пачка** – может находиться в одном из трех состояний:

- пачка, еще не размещенная на складе;
- пачка, размещенная на складе в составе неотгруженного заказа;
- неостребованный остаток.

Пачка обладает следующими признаками:

- 1) номером агрегата резки;
- 2) типоразмером: маркой стали, длиной, шириной, толщиной, весом, высотой;
- 3) назначением (товар, нетовар, экспорт);
- 4) номером, указывающим на принадлежность некоторому заказу, либо нулем, если пачка является неостребованным остатком.

Если пачка еще не размещена, то она, помимо трех вышеперечисленных признаков, имеет **дату размещения на складе** и **дату отгрузки**. Размещенная пачка еще не отгруженного заказа имеет дату отгрузки. Неостребованный остаток имеет нулевую дату отгрузки.

**Заказ** имеет уникальный номер и состоит не более чем из  $N$  пачек с одинаковыми признаками: агрегатом резки, типоразмером, назначением, датой размещения и датой отгрузки.

**Ячейка** может быть либо пустой, либо содержать двумерный массив штабелей. Количество штабелей в одной ячейке зависит от типоразмера составляющих их пачек и варьируется от 1 до  $L_{Max}$  по длине ячейки и от 1 до  $W_{Max}$  по ширине.

**Штабель** – последовательность пачек, уложенных друг на друга. Высота штабеля ограничена числом  $MaxH$ , которое зависит от типоразмера пачек. Штабель, состоящий из 0 пачек, будем называть **пустым**.

#### *Допустимые операции*

Возможны три типа **допустимых операций**, переводящих склад из одного состояния в другое: **размещение, перекаладывание и отгрузка**. Эти операции производятся либо над отдельной пачкой, либо над **стопкой** – последовательностью не более  $V$  пачек, уложенных друг на друга. Ограничение на количество пачек в стопке зависит от типоразмера пачек и грузоподъемности крана.

1. Существуют три разных типа операций размещения.

Текущая пачка/стопка:

- размещается в пустом штабеле;
- укладывается поверх непустого штабеля с учетом ограничения  $N$  на высоту штабеля;
- размещается в изоляторе.

Будем считать допустимым размещение па-

чек из одного заказа в разных штабелях и разных ячейках.

2. Операция перекаладывания заключается в следующем.

Перекаладываемая пачка/стопка снимается с верха непустого штабеля и затем размещается согласно пункту 1.

3. Операция отгрузки заключается в следующем. Отгружаемая пачка/стопка снимается с верха штабеля и удаляется в тупик. Будем считать допустимой операцией отгрузку продукции в тупик непосредственно с агрегата резки, минуя склад.

Как уже говорилось, исполнителем допустимых операций является кран. Примем следующее допущение: два крана не могут одновременно производить операции над одной и той же ячейкой и не могут одновременно отгружать один и тот же заказ. Таким образом, сколько бы у нас не было кранов, работающих параллельно и независимо друг от друга, операция размещения/отгрузки одного заказа **планируется для одного крана**.

#### *Терминальные состояния*

При описании терминальных состояний задачи следует учесть, что процесс размещения и отгрузки заказов разворачивается во времени. Будем считать, что у нас есть некоторый **расчетный период времени**, для определенности месяц. Для каждого размещаемого на складе и отгружаемого со склада заказа известна **дата** (**день, месяц, год**) выполнения операции, но не известно время суток (час), когда заказ поступит на склад для размещения или, наоборот, будет отгружаться.

Таким образом, информация о том, что и когда будет размещаться/отгружаться, содержится в **посуточных списках** на весь расчетный период времени. Посуточные списки делятся на **списки для размещения и списки для отгрузки**. Посуточный список для размещения содержит перечень заказов, которые должны быть привезены с агрегата резки и размещены на складе в текущие сутки, причем каждый заказ представлен списком пачек. Посуточный список для отгрузки содержит перечень заказов, которые в течение суток должны быть отгружены либо со склада, либо с агрегата резки.

Еще раз подчеркнем, что момент поступления и отгрузки заказов в течение суток неизвестен, поэтому оперативное планирование заключается в составлении плана действий по размещению или отгрузке в режиме реального времени, то есть по мере поступления заказов. Таким образом, объектом оперативного планирования является текущий размещаемый/отгружаемый заказ, начальным состоянием задачи является

совокупное состояние агрегатов резки, склада, тупиков до выполнения операции размещения/отгрузки, **терминальным – состояние агрегатов резки, склада, тупиков после выполнения операции размещения/отгрузки.**

*Стратегия управления поиском*

Как известно, все стратегии управления поиском в пространстве состояний делятся на две категории: пробный поиск и безвозвратный поиск. Эвристический поиск [2] является классическим примером пробного поиска, но в то же самое время эвристический поиск, сфокусированный при помощи сильной эвристики, работает в безвозвратном режиме. Поэтому результаты, полученные от применения сильно сфокусированного поиска, в большой степени зависят от удачного или неудачного выбора эвристики. При удачном выборе эвристики безвозвратный поиск является быстрым эффективным алгоритмом,двигающимся к целевому состоянию самым коротким путем. При неудачном – может не достигнуть целевого состояния вообще. Применим **безвозвратный эвристический поиск** к имеющемуся пространству состояний и построим для него эффективную оценочную эвристическую функцию.

Пусть наша задача находится в каком-то текущем состоянии и у нас имеется конечное множество допустимых операций (ходов), применимых к данному состоянию. Одни ходы будут более эффективны с точки зрения достижения целевого состояния, другие – менее. (Аналогией может служить текущая позиция на шахматной

доске и множество ходов, возможных в данной позиции согласно правилам игры.) Всей имеющейся у нас информации из предметной области задачи мы должны придать числовой вид, то есть оценивать эффективность каждого хода/операции одним числом. На каждом шаге из всего множества допустимых операций будем выбирать операцию минимальной стоимости и применять ее к текущему состоянию [2].

Понятно, что полученный таким образом план не обязан являться оптимальным планом, так как мы не совершали экспоненциального перебора всех возможных вариантов, но при удачном выборе оценочной эвристической функции мы получим **квазиоптимальный план**, позволяющий решить поставленные перед нами задачи оперативного планирования. Прежде чем переходить к выбору эвристической оценочной функции, сформулируем цели и задачи, которые должно преследовать оперативное управление складом.

Во-первых, это **минимизация времени, потраченного на выполнение операций размещения/отгрузки заказа.**

Во-вторых, это **систематизация хранения единиц продукции, объединенной в штабеля и ячейки согласно общим признакам.**

### 3. Выбор эвристической оценочной функции

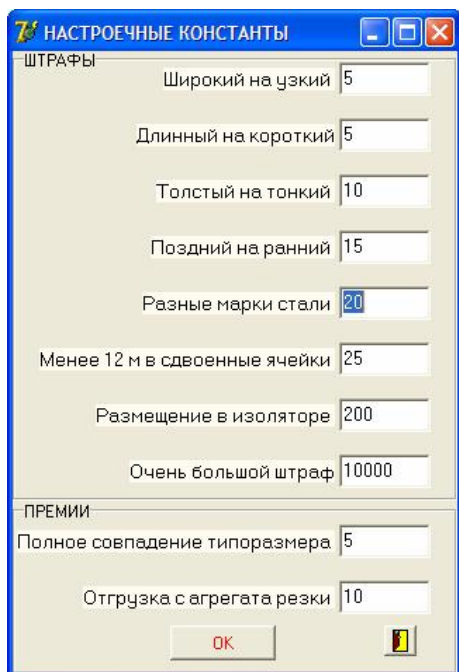
Сформулируем принцип, по которому каждой допустимой операции будет приписываться некая стоимость. Он основан на методе штрафных функций, изложенном в работе [3]. Сущность метода заключается в следующем.

**Стоимость каждой допустимой операции будет складываться как сумма положительных штрафов и отрицательных премий, начисленных по всем параметрам операции.** Примерный набор штрафов и премии приведен на рисунке:

Рассмотрим в качестве примера вычисление стоимости операции размещения пачки поверх штабеля, находящегося в  $i$ -й ячейке склада.

Пусть

- width1, len1, depth1, steel1, Date1 – ширина, длина, толщина, марка стали и дата отгрузки размещаемой пачки;
- width0, len0, depth0, steel0, Date0 – ширина, длина, толщина, марка стали и дата отгрузки верхней пачки  $i$ -го штабеля, если он не пустой;
- cell[i].double – признак «сдвоенности», принимающий значение «истина», если ячейка предназначена для размещения 12-метрового листа;
- DopW, DopL, DopD – допустимые отклоне-



Окно для начисления штрафов и премий

ния по ширине, длине, толщине;

- $H_0$ ,  $h_1$ ,  $MaxH$  – высота штабеля, высота размещаемой пачки и ограничение на высоту штабеля.

Тогда стоимость  $Cost$  размещения пачки поверх штабеля равна:

- 0, если пачка укладывается в пустой штабель;
- $-P_1$  – премия, если штабель непустой и типоразмер его верхней пачки совпадает с размещаемым;
- если типоразмеры пачек не совпали, то стоимость размещения вычисляется по формуле

$$Cost = F_1 * \text{sgn}(width_1 - width_0 - DopW) + F_2 * \text{sgn}(len_1 - len_0 - DopL) + F_3 * \text{sgn}(depth_1 - depth_0 - DopD) + F_4 * \text{sgn}(Date_1 - Date_0) + F_5 * \chi("steel_1 \diamond steel_0") + F_6 * \chi("(len_1 \le 6000) \text{AND}(cell_0[i].double = true)") + F_7 * \chi("i = 0") \neq VeryBigF * \text{sgn}(H_0 + h_1 - MaxH),$$

где функция знака  $\text{sgn}(width_1 - width_0 - DopW)$  равна 1, если ширина размещаемой пачки больше ширины верхней пачки + допуск на ширину, иначе 0; функция знака  $\text{sgn}(len_1 - len_0 - DopL)$  равна 1, если длина размещаемой пачки больше длины верхней пачки штабеля + допуск на длину, иначе 0; функция знака  $\text{sgn}(depth_1 - depth_0 - DopD)$  равна 1, если толщина размещаемой пачки больше толщины верхней пачки штабеля + допуск на толщину, иначе 0; функция знака  $\text{sgn}(Date_1 - Date_0)$  равна 1, если дата отгрузки размещаемой пачки позднее даты отгрузки верхней пачки штабеля, иначе 0; характеристическая функция  $\chi$ , служащая для арифметизации логического высказывания «марки стали не одинаковы»,  $\chi("steel_1 \diamond steel_0")$  равна 1, если логическое высказывание принимает значение «истина», иначе 0; характеристическая функция  $\chi$ , служащая для арифметизации логического высказывания «размещаем пачку длины не более 6 метров в сдвоенную ячейку»,  $\chi("(len_1 \le 6000) \text{AND}(cell_0[i].double = true)")$  равна 1, если логическое высказывание принимает значение «истина», иначе 0; характеристическая функция  $\chi$ , служащая для арифметизации логического высказывания «размещаем пачку в изоляторе»  $\chi("i = 0")$  равна 1, если логическое высказывание принимает значение «истина», иначе равна 0; функция знака  $\text{sgn}(H_0 + h_1 - MaxH)$

равна 1, если сумма высоты штабеля и высоты размещаемой пачки превысили ограничение на высоту штабеля, иначе 0;  $F_1$  – штраф за размещение широкой пачки поверх узкой;  $F_2$  – штраф за размещение длинной пачки поверх короткой;  $F_3$  – штраф за размещение толстой пачки поверх тонкой;  $F_4$  – штраф за размещение пачки с более поздней датой отгрузки поверх пачки с более ранней датой отгрузки;  $F_5$  – штраф за несовпадение марок стали;  $F_6$  – штраф за размещение пачки длиной не более 6 метров в ячейку, предназначенную для 12-метрового листа;  $F_7$  – штраф за размещение пачки в изоляторе;  $VeryBigF$  – очень большой штраф.

Аналогично происходит вычисление стоимости остальных допустимых операций.

Сделаем очень важное замечание о величинах штрафов и премий. **Числовые значения штрафов и премий** не являются наперед заданными величинами, а **играют роль настроечных констант**, подбираемых во время прогона программы на реальных данных. Меняя значения настроечных констант, мы тем самым меняем систему приоритетов и настраиваем программу под желания пользователя получать решения определенного вида. Поясним сказанное на примерах.

Если штраф за несовпадение марок стали будет больше штрафов за длину, ширину и толщину, то продукция одинаковых марок стали будет группироваться в общие ячейки.

Если штрафы за длину, ширину и толщину будут больше штрафа за несовпадение марок стали, то продукция разных марок будет перемешана, но штабеля будут формироваться в виде ровных пирамидок, сужающихся кверху.

Если штраф за размещение продукции с более поздней датой отгрузки поверх продукции с более ранней датой будет больше всех остальных штрафов, то при размещении будет совершаться большее число перекладываний из ячейки в ячейку, зато отгрузка будет происходить быстро, и так далее.

В задачах многокритериальной оптимизации невозможно четко определить, где находится настоящий оптимум, поэтому следует руководствоваться принципом «брать от многих зол как можно меньше» и желаниями пользователя организовать хранение продукции согласно выбранным им критериям.

Подведем некоторые итоги. Мы представили склад в виде модели «пространство состояний» и определили на этом пространстве оценочную функцию, вобравшую в себя все разумные эвристики, как-то: «клади сходное на сходное», «узкое на широкое», «тонкое на толстое», «короткое



на длинное», «раннее на позднее». Перечислим те положительные моменты, которые мы получим от выбора такой модели.

- Всей эвристической информации из предметной области задачи придан единообразный числовой вид.
- Отказ от жестких ограничений типа «нельзя размещать в одном штабеле разные марки стали» позволяет генерировать приемлемые решения с небольшим числом нарушений, вместо констатации факта, что идеального решения не существует.
- Отказ от фиксации ячеек под определенные марки стали позволяет для склада небольшой площади группировать продукцию одной марки в общих ячейках, динамически меняя количество таких ячеек и их расположение сообразно быстроменяющейся ситуации.
- Гибкая система штрафов и премий позволяет настраивать программу согласно критериям, выбранным пользователем.

#### **4. Алгоритм отгрузки заказа**

**Шаг 1.** Запоминаем, какое количество пачек мы должны отгрузить, и типоразмер отдельной пачки. Если такой типоразмер есть на агрегате резки, то отгружаем с агрегата резки до тех пор, пока не весь заказ отгружен и на агрегате

резки есть данный типоразмер.

Если весь заказ отгружен, то останов. Иначе переход на шаг 2.

**Шаг 2.** Ищем непустой штабель, у которого типоразмер верхней пачки совпадает с искомым типоразмером. Если такой штабель найден, то отгружаем до тех пор, пока не весь заказ отгружен и в штабеле есть данный типоразмер. Если весь заказ отгружен, то останов. Иначе переход на шаг 3.

**Шаг 3.** Ищем непустой штабель, содержащий пачку с искомым типоразмером. Если такой штабель найден, то производим следующие действия:

- 1) помечаем штабель как запрещенный;
- 2) снимаем пачку с верхушки штабеля;
- 3) размещаем пачку процедурой *FindOptTop*;
- 4) помечаем пачку как размещенную;
- 5) повторяем шаги 2–4 до тех пор, пока наверху не окажется пачка с искомым типоразмером;
- 6) отгружаем из этого штабеля до тех пор, пока не весь заказ отгружен и в штабеле есть данный типоразмер. Если весь заказ отгружен, то останов. Иначе переход на шаг 3.

Если такой штабель не найден, то переход на шаг 4.

**Шаг 4.** Ищем типоразмер в изоляторе и отгружаем. Останов.

#### **Библиографический список**

1. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.
2. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. М.: Радио и связь, 1985.
3. Алгоритм оперативного планирования посадки металла в печи листопрокатного стана / Каплан Д.С., Девятов Д.Х., Белявский А.Б., Файнштейн С.И., Торчинский В.Е. //Сталь. 2007. № 2. С. 130–133.