

**СИРАЗЕТДИНОВА Татьяна Юрьевна**

**Конструирование прямоугольного раскроя  
в системах автоматизированного проектирования  
с учетом дефектных областей материала**

**05.13.12 – Системы автоматизации проектирования**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа 2007**

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики и кибернетики  
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель	канд. техн. наук, доц. <b>Валеева Аида Фаритовна</b>
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. <b>Мартынов Виталий Владимирович</b> канд. техн. наук, доц. <b>Григорчук Татьяна Ивановна</b>
Ведущая организация	Башкирский государственный университет

Защита состоится 27 апреля 2007 г. в 10<sup>00</sup> часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03 при  
Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Уфа- центр, ул. К. Маркса 12, УГАТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.

В.В. Миронов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Одним из факторов снижения себестоимости выпускаемой продукции является рациональное использование имеющихся ресурсов, в том числе промышленных материалов. В связи с этим задача оптимизации технологической подготовки производства является актуальной. Внедрение систем автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) способствует более эффективному использованию промышленных материалов. Одной из важных составляющих САПР являются подсистемы расчета рационального размещения прямоугольных заготовок, которые решают оптимизационную задачу раскроя с учетом технологических ограничений, таких, как гильотинность реза, направление волокон материала, обход дефектов материала и др.

Как известно, задачи раскроя относятся к классу NP-трудных задач комбинаторной оптимизации. Это означает, что для их решения нет методов и алгоритмов, находящих точное решение за полиномиальное время. При решении задач, возникающих в реальном производстве, необходимо получить результат за приемлемое время. Следовательно, актуальной становится разработка эффективных эвристических методов решения задач прямоугольного раскроя, учитывающих различные технологические ограничения в составе системы автоматизированного проектирования.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и алгоритмов расчета прямоугольного раскроя при наличии различных технологических ограничений (в том числе с учетом обхода дефектных областей материала), созданию на этой базе программного обеспечения, входящего в состав САПР и автоматизированного рабочего места технолога раскройно-заготовительного производства.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является разработка методов, алгоритмов и программ расчета рационального прямоугольного раскроя листового и рулонного материала в системах автоматизированного проектирования с учетом обхода дефектных областей материала и оценка эффективности разработанных методов на базе численного эксперимента.

### **Задачи исследования**

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ методов расчета прямоугольного раскроя и выделить класс методов, подходящих для решения данной задачи с учетом дефектных областей материала.
2. Разработать метод проектирования прямоугольного раскроя, позволяющий учитывать обход дефектных областей листового и рулонного материала.

3. Реализовать методы и алгоритмы для включения в программное обеспечение автоматизированного рабочего места технолога раскройно-заготовительного производства на промышленном предприятии.

4. Разработать оптимизационное ядро САПР раскроя листового и рулонного материала на основе предложенных методов и алгоритмов в виде прикладного программного обеспечения.

5. Исследовать эффективность предложенных методов и алгоритмов решения задачи прямоугольного гильотинного раскроя на базе численного эксперимента.

### **Методы исследования**

Результаты исследований, выполненных в работе, базируются на методах исследования операций, теории и практике автоматизации проектирования, принципах модульного и структурного программирования. Для анализа эффективности методов применялись численные эксперименты.

### **На защиту выносятся**

1. Декодер «вставки», разработанный для реализации технологических ограничений и обхода дефектных областей раскраиваемого материала.

2. Метод «холодного» отжига, разработанный на базе метаэвристики «имитация отжига», предназначенный для расчета прямоугольного раскроя листового и рулонного материала.

3. Программная реализация разработанных методов в составе системы прямоугольного раскроя 2DR-CUT.

4. Результаты численных экспериментов и рекомендации по использованию предлагаемых алгоритмов.

### **Научная новизна результатов**

1. Разработан декодер «вставки» для проектирования прямоугольного раскроя с учетом обхода дефектных областей материала. Данный декодер, в отличие от известных, может использоваться для решения задач гильотинного и негильотинного прямоугольного раскроя листового и рулонного материала с учетом дополнительных ограничений, а также в составе различных метаэвристик.

2. Предложен метод «холодного» отжига, основанный на принципах метаэвристики «имитация отжига», который в отличие от последней:

- работает с постоянным параметром температуры;
- использует несколько видов окрестности, выбор которых осуществляется случайным образом;
- использует новые способы расчета элементов вектора достижимости.

3. Разработано оптимизационное ядро САПР на основе предложенных методов и алгоритмов для включения в автоматизированное рабочее место технолога раскройно-заготовительного производства.

### **Практическая значимость и внедрение результатов**

Практическая значимость полученных результатов заключается в повышении эффективности использования промышленных материалов на этапе технологической подготовки производства на основе разработанных методов, алгоритмов и программ расчета рационального прямоугольного раскроя листового и рулонного материала с учетом дефектных областей материала.

Разработанное программное обеспечение, реализующее методы и алгоритмы расчета прямоугольного раскроя листового и рулонного материала с учетом технологических ограничений, в качестве подсистемы для решения задач прямоугольного раскроя интегрировано в известную систему автоматизированного проектирования «Сириус», внедренную на следующих предприятиях: ООО «Центр автоматизации проектирования и высоких технологий» (г. Екатеринбург), ЗАО «Курганстальмост» (г. Курган), ОАО «Мечел» (г. Челябинск). Применение разработанного программного обеспечения позволило повысить эффективность использования материала на 5-8%.

Разработанные методы решения задачи являются инвариантными и могут быть легко адаптированы под конкретное производство, предъявляющее некоторые дополнительные технологические ограничения.

Результаты работы внедрены в учебный процесс Уфимского государственного авиационного технического университета по специальностям: математическое обеспечение и администрирование информационных систем, а также математические методы в экономике.

### **Связь исследования с научными проблемами**

Работа выполнялась при частичной поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проекты 99-01-000937 и 01-01-000510.

### **Апробация работы и публикации**

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- Международной уфимской зимней школе-конференции по математике (Уфа, 2005);
- III Всероссийской конференции «Проблемы оптимизации и экономические приложения» (Омск, 2006);
- Зимней школе для аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2006, 2007);
- Научных семинарах кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 1 в рецензируемом журнале из списка ВАК.

Выражаю глубокую благодарность д-ру техн. наук, профессору Мухачевой Элите Александровне за советы и помощь при работе над диссертацией.

## СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 130 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность работы; сформулированы цель диссертации, основные задачи, новизна полученных результатов и их практическая значимость.

В **первой главе** рассматриваются вопросы автоматизации проектирования и технологической подготовки производства и определяется место раскройно-заготовительных работ в САПР и АСТПП. Приводится обзор задач раскроя-упаковки и выделяется класс задач, решаемых в рамках диссертационной работы. Приведены постановки задачи прямоугольного раскроя с дефектными областями раскраиваемого материала, описана математическая модель прямоугольного раскроя с учетом обхода дефектных областей, приводится обзор методов решения задач прямоугольного раскроя.

Под системой автоматизированного проектирования прямоугольного раскроя понимается совокупность математических, программных, технических и организационных средств, предназначенных для расчета и использования рациональных карт раскроя. Структура САПР раскроя содержит три основные подсистемы:

1. Подсистема препроцессорной обработки исходной информации об объектах и областях размещения, которая предназначена для подготовки, хранения и редактирования данных о геометрии объектов для решения конкретной задачи.

2. Подсистема генерирования карт раскроя, основной целью которой является формирование рационального размещения геометрических объектов в автоматическом режиме.

3. Подсистема постпроцессорной обработки информации о размещенных геометрических объектах.

Автоматизированное место технолога раскройно-заготовительного производства включает в себя подсистему препроцессорной обработки информации и подсистему генерирования карт раскроя, которая предназначена для решения задач прямоугольного раскроя.

### **Постановка задач прямоугольного раскроя с учетом обхода дефектных областей материала**

Рассматривается задача раскроя на прямоугольные заготовки нескольких типов. Различаются задачи гильотинного (допускаются только сквозные резы,

параллельные кромкам материала) и негильотинного раскроя, которые, в свою очередь, разделяются на задачи раскроя полосы и задачи раскроя листов.

Исходная информация задач прямоугольного раскроя может быть задана наборами следующего вида: для задачи раскроя полосы –  $\langle W; n; w; l; \gamma; \varepsilon, D \rangle$ , для задачи раскроя листов –  $\langle W; L; n; w; l; \gamma; \varepsilon, D \rangle$ , где  $W$  – ширина полосы или листа;  $L$  – длина листа;  $n$  – количество прямоугольников;  $w = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n)$ ,  $w_i$  – ширина прямоугольника;  $l = (l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n)$ ,  $l_i$  – длина прямоугольника  $i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $\gamma$  – признак гильотинности;  $\varepsilon$  – признак возможности поворота прямоугольников. Вводится прямоугольная система координат: оси  $O_x$  и  $O_y$  совпадают со сторонами полосы (листа). Решение задачи представляется в виде набора элементов  $\langle X, Y \rangle$ , где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – векторы координат прямоугольников. Положение  $i$ -го прямоугольника зададим координатами нижней левой точки прямоугольника  $(x_i; y_i)$ . Пусть  $D = (d_1, d_2, \dots, d_m, \dots, d_t)$  – список дефектных областей,  $m = \overline{1, t}$ . Дефектные области  $d_m$  аппроксимируются наборами прямоугольников  $\Pi_j$  на этапе подготовки исходной информации,  $d_m = \bigcup_{j=1}^k \Pi_j$ , положение  $\Pi_j$  определяется набором  $\langle x'_j, y'_j, l'_j, w'_j \rangle$  (если решается задача раскроя полосы) и набором  $\langle x'_j, y'_j, l'_j, w'_j, n'_j \rangle$  (если решается задача раскроя листов), где  $x'_j, y'_j$  – координаты нижнего левого угла дефектной области,  $l'_j, w'_j$  – длина и ширина дефектной области,  $n'_j$  – номер листа, который содержит дефектную область.

Набор элементов  $\langle X, Y \rangle$  называется допустимым прямоугольным раскроем, если:

- стороны прямоугольников параллельны сторонам полосы или листов (условие ортогональности);
- прямоугольники не перекрывают друг друга;
- прямоугольники не выходят за границы полосы или листа;
- выполняется условие гильотинности (если решается задача гильотинного раскроя);
- прямоугольники не пересекаются с дефектными областями  $\forall i, j: i = \overline{1, \dots, n}, j = \overline{1, \dots, k} (x_i \geq x'_j + l'_j) \vee (x'_j \geq x_i + l_i)$  или  $(y_i \geq y'_j + w'_j) \vee (y'_j \geq y_i + w_i)$ .

При выполнении условий допустимости требуется найти минимальную длину занятой части полосы (если решается задача раскроя полосы) либо минимальное количество листов (если решается задача раскроя листов).

Приведен обзор известных методов решения задач прямоугольного раскроя. Общая схема получения решения таких задач состоит в следующем: генерирование начального решения с последующим его кодированием; поиск лучшего решения на множестве допустимых решений, которые представляются с помощью выбранного способа кодирования. Поиск лучшего решения включает в себя не только алгоритмы, работающие с кодировкой решения, но и декодеры,

преобразующие полученную кодировку в карту раскроя. Был рассмотрен класс метаэвристических алгоритмов и выбран подкласс эволюционных алгоритмов, а именно: метод «имитация отжига» и наивный эволюционный алгоритм (1+1)-EA. Качество полученного решения зависит не только от выбранного метода расчета раскроя и схемы кодирования, но и от алгоритмов декодирования карт раскроя. В связи с этим возникает необходимость в разработке декодера, позволяющего учитывать технологические ограничения, возникающие в реальном производстве, а также условие непересечения прямоугольников с дефектными областями материала.

Во **второй главе** разработан метод «холодного» отжига для решения задач прямоугольного раскроя, основанный на процедурах метаэвристики «имитация отжига»; разработан новый декодер, позволяющий учитывать технологические ограничения при промышленном раскрое материала.

Разработан метод «холодного» отжига (Cold Annealing, CA) для решения задач раскроя полосы и листов на базе процедур известной метаэвристики «имитация отжига». Основное отличие предлагаемого алгоритма состоит в том, что вводится фиксированный параметр температуры. Приведем общую схему алгоритма CA:

1. Задать параметр  $n_0$  (аналог температуры)
2.  $q_0 \leftarrow$  Генерировать начальное состояние (решение)
3. Повторять, пока не выполнен критерий останова
  - 3.1 Выбрать следующее текущее состояние  $q$
  - 3.2 Выбрать случайным образом тип окрестности  $N(q)$ 
    - 3.2.1 Генерировать состояния окрестности  $N(q)$
    - 3.2.2 Для каждого состояния окрестности  $N(q)$  повторять
      - 3.2.2.1 Вычислить значения оценочной функции для каждого состояния окрестности  $N(q)$
      - 3.2.2.2 Определить векторы генерации  $G$ , достижимости  $A$ , переходов  $P$
    - 3.2.3 Выполнить переход в одно из состояний окрестности  $N(q)$  в зависимости от вектора перехода  $P$ .

Для генерации начального состояния используется однопроходная эвристика. На каждом шаге алгоритма CA случайным образом осуществляется выбор текущего состояния  $q$  из окрестности  $N(q)$ . Важную роль в задачах раскроя играет способ кодирования решений. В алгоритме CA для кодировки состояний предлагается структура данных (код), представляющая собой вектор  $V = (v_0, v_1, \dots, v_{n-1})$ , элементы которого  $v_i = \langle b_i, r_i, p_i \rangle$ , где  $b_i$  – номер прямоугольника;  $r_i$  – флаг поворота детали (0 – без поворота, 1 – с поворотом на  $90^\circ$ );  $p_i$  – число, позволяющее выбрать координаты размещения прямоугольника на полосе или



листе. В алгоритмах локального поиска качество получаемого решения в значительной степени зависит от выбора окрестности. В алгоритме СА предлагается несколько типов окрестностей, которые различаются по типу и мощности. Для получения различных типов окрестности  $N(q)$  используются следующие операции над кодом:

- замена двух прямоугольников местами;
- перемещение элемента вектора  $V$ ;
- изменение флага поворота  $r_i$  в  $V$ ;
- изменение числа  $p_i$ .

По мощности окрестности разделяются на три типа: «малая» – количество модификаций в кодировке  $k = 1..10$ ; «средняя» – количество модификаций равно количеству прямоугольников  $n$ ; «большая» – количество модификаций равно  $n^2$ . Существенное значение при расчете прямоугольного раскроя имеет декодер, который для каждого кодированного состояния позволяет восстановить карту раскроя и вычислить оценочную функцию  $F(q)$ . В отличие от известной схемы «имитация отжига» в алгоритме СА используются: оценочная функция  $F(q) = \ln S(q)$ , где  $S(q)$  – площадь использованного материала для состояния  $q$ ; вектор генерации  $G = (G_1, G_2, \dots, G_l)$ , где  $l$  – это количество элементов в окрестности,

$$G_i = \begin{cases} \frac{1}{l}, & \text{если } q_j \in N(q) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \text{ где } N(q) \text{ – окрестность состояния } q;$$

ненормированный вектор достижимости  $A$ , элементы которого  $A_j = e^{-(F(q_j)-F(q))n_0} = e^{-(\ln S(q_j)-\ln S(q))n_0} = (S(q)/S(q_j))^{n_0}$ , где  $q_j, q$  – состояния,  $n_0$  – параметр алгоритма (аналог температуры); ненормированный вектор переходов  $P$  с элементами  $P_j = G_j A_j$ , которые нормируются по формуле  $P_{j \text{ норм}} = \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i}$ . Элементы

нормированного вектора переходов позволяют осуществить вероятностный выбор текущего состояния в окрестности.

В работе также реализован алгоритм решения задач раскроя на базе метаэвристики (1+1)-EA, являющейся аналогом алгоритма «имитация отжига» с нулевой температурой. Основная идея этого алгоритма состоит в том, что на каждой итерации строится окрестность, содержащая только одно состояние.

В настоящее время для решения задач прямоугольного раскроя/упаковки известны различные декодеры: в Европе популярен «усовершенствованный нижний левый» и его различные модификации, в школе под руководством Э.А. Мухачевой разработаны декодеры на базе блочных структур и послыной технологии, однопроходные эвристики; в Японии разработаны алгоритмы на базе

пары последовательностей. При решении задач раскроя с учетом технологических ограничений, в том числе обхода дефектных областей материала, требуется значительная модификация схем перечисленных декодеров, трудоемкая с вычислительной точки зрения.

В работе предложен новый унифицированный декодер «вставки» (Priority Rotate Place, PRP), позволяющий, в отличие от перечисленных, восстановить карту раскроя при решении различных задач раскроя/упаковки с учетом технологических ограничений, а также осуществить обход дефектных областей материала. Декодер PRP позволяет получить VL-компактную карту раскроя (VL-компактная карта раскроя – это карта, в которой ни один прямоугольник не может быть сдвинут вниз или влево) и работает со свободными областями. Под свободной областью понимается прямоугольный участок полосы (или листа), который является максимальным при условии, что он не пересекается с уже уложенными прямоугольниками и границами материала, ограничен слева, сверху и снизу уложенными прямоугольниками или краями материала.

Декодер работает следующим образом: сначала производится размещение дефектных областей с указанными координатами, затем просматривается список прямоугольников, заданных вектором  $V$ . Для каждого элемента  $v_i$  вектора  $V$  выполняется следующая процедура:

- получение списка точек  $M = \{M_0(x_0; y_0), M_1(x_1; y_1), \dots, M_{k-1}(x_{k-1}; y_{k-1})\}$ , куда прямоугольник  $b_i$  с учетом флага поворота  $r_i$  может быть уложен (рис. 1). Для примера, изображенного на рис. 1,  $k = 4$ ;
- выбор точки  $M_{p_i \bmod |M|}$  и укладка прямоугольника  $b_i$  без поворота, если  $r_i = 0$ , иначе с поворотом, в точку с координатами  $(x_{p_i \bmod |M|}; y_{p_i \bmod |M|})$ .

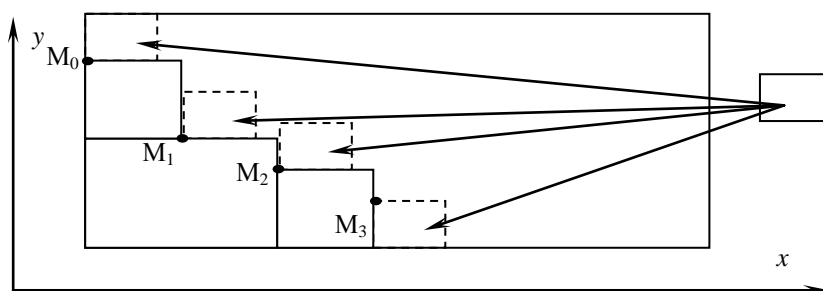


Рисунок 1 – Укладка прямоугольника декодером PRP

### Получение списка точек свободных областей

1. Вся полоса (лист) представляет собой свободную область. Область с координатами нижнего левого угла  $M_0(0;0)$  является единственной для укладки прямоугольника.

2. После укладки каждого прямоугольника свободная область делится на несколько областей (рис. 2, а, б, в). Если прямоугольник помещается в одну из этих

областей, то координаты ее нижнего левого угла добавляются в список точек  $M=\{M_0, M_1, \dots, M_{k-1}\}$ , в противном случае, данная область удаляется из списка свободных областей для укладки текущего прямоугольника (рис. 2, в).

3. Если решается задача гильотинного раскроя, для каждой свободной области проверяется условие гильотинности. Если условие гильотинности при укладке прямоугольника в свободную область нарушается, то данная свободная область удаляется из списка свободных областей (рис. 2, з).

Пример карты раскроя приведен на рис. 2, д.

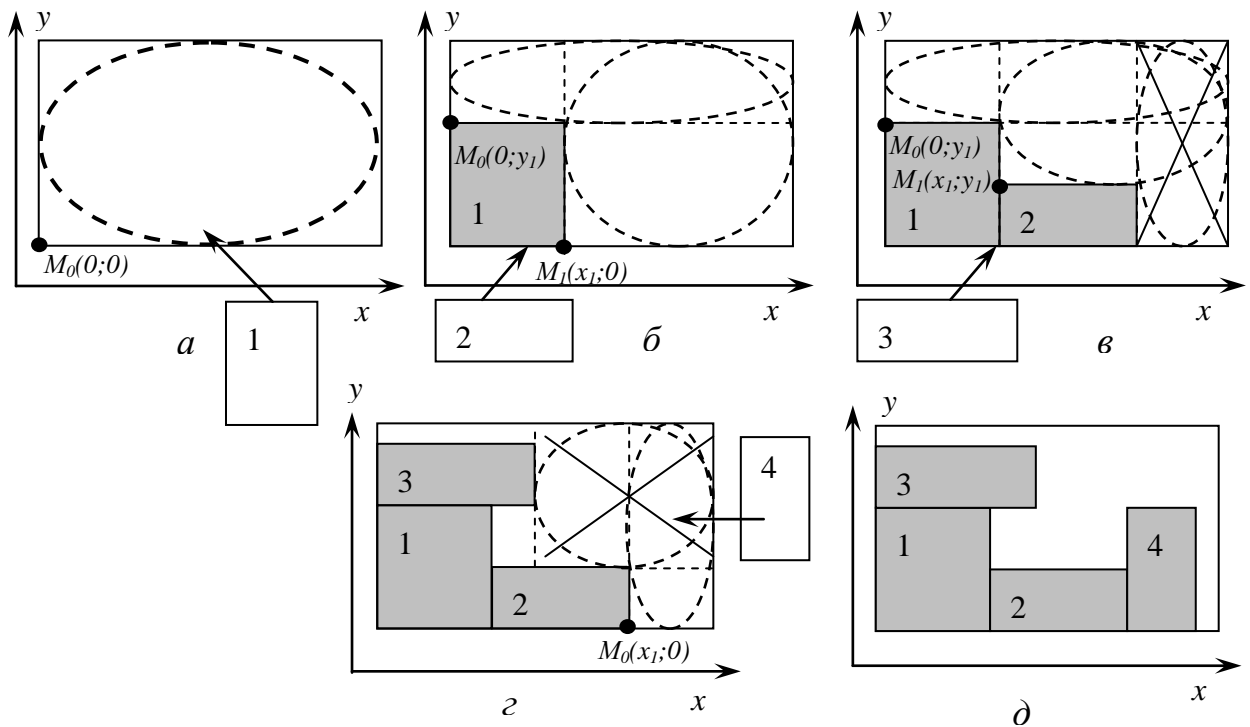


Рисунок 2 –Схема получения списка точек

$a$  – размещение прямоугольника №1;  $б$  – размещение прямоугольника №2;  
 $в$  – размещение прямоугольника №3;  $з$  – размещение прямоугольника №4;  
 $д$  – пример карты раскроя

### Схема работы декодера «вставки» PRP

1. Инициализация. Вся полоса (лист) – свободная область
2. Для всех элементов вектора  $V$  выполнять 2.1 – 2.4
  - 2.1 Выбор первого элемента вектора  $V$  (прямоугольника)
  - 2.2 Построение списка свободных областей, куда прямоугольник может быть уложен
    - 2.2.1 Выбор первой свободной области из списка свободных областей
    - 2.2.2 Пока список свободных областей не пуст, выполнять 2.2.2.1-2.2.2.3

2.2.2.1 Если элемент  $v_i$  помещается в свободную область, то добавить координаты  $(x; y)$  нижнего левого угла свободной области в список точек  $M = \{M_0, M_1, \dots, M_{k-1}\}$

2.2.2.2 Выбор следующей свободной области

2.2.2.3 Если решается задача раскроя на листы и свободных областей больше нет, то берется новый лист

2.3 Укладка элемента  $v_i$  в область, определяемую точкой  $p_i$

2.4 Переход к следующему элементу вектора  $V$

### Пример работы декодера при наличии дефектных областей

Дана полоса ширины  $W = 8$ , количество прямоугольников  $n = 4$  с размерами  $w = (2; 4; 4; 3)$ ,  $l = (6; 4; 1; 4)$ . Вектор  $V = (\langle 4, 1, 3 \rangle, \langle 2, 0, 4 \rangle, \langle 3, 0, 6 \rangle, \langle 1, 1, 5 \rangle)$ . Построить карту раскроя.

1. Укладка области  $d_1$  с дефектом (рис. 3, а).

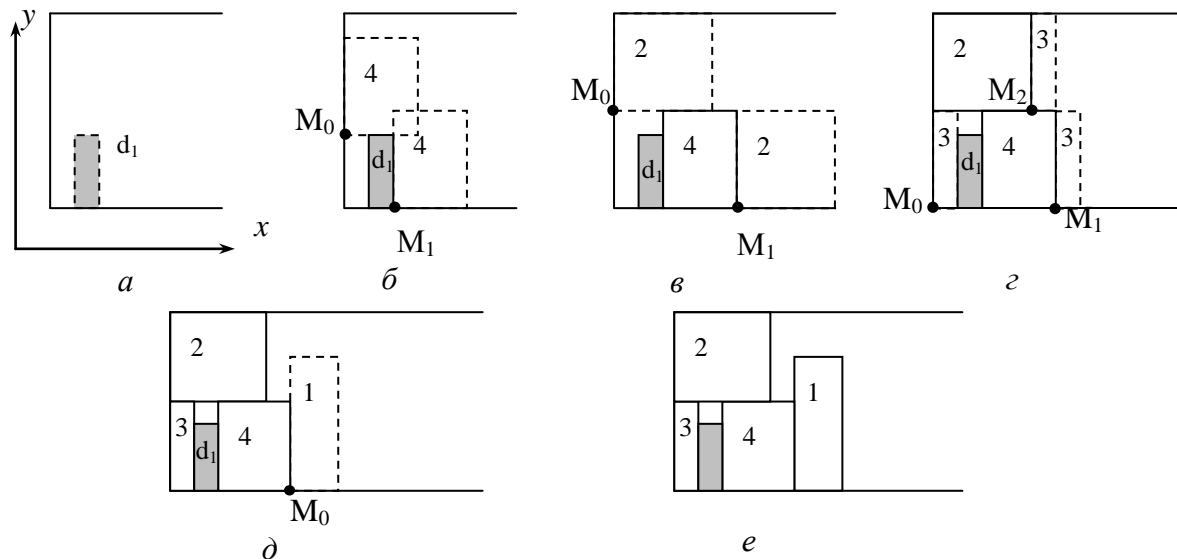


Рисунок 3 – Пример получения карты раскроя

а – размещение области с дефектом; б – выбор размещения прямоугольника №1; в – размещение прямоугольника №2; г – размещение прямоугольника №3; д – размещение прямоугольника №4; е – полученная карта раскроя

2. Укладка прямоугольника, характеризуемого элементом  $v_0 = \langle 4, 1, 3 \rangle$ . Это прямоугольник №4, который должен быть уложен с поворотом. Список точек  $M = \{M_0(0;3), M_1(2;0)\}$ . Выбирается точка  $M_{3 \bmod |M|}$ , т.е. выбирается точка  $M_0$ , и прямоугольник укладывается с поворотом с координатами нижнего левого угла прямоугольника  $(0;3)$  (рис. 3,б).

3. Укладка прямоугольника, характеризуемого элементом  $v_1 = \langle 2, 0, 4 \rangle$ . Это прямоугольник №2, который должен быть уложен без поворота. Список точек  $M = \{M_0(0;4), M_1(5;0)\}$ . Выбирается точка  $M_{4 \bmod |M|}$ , т.е. выбирается точка  $M_0$ , и прямоугольник укладывается без поворота с координатами угла  $(0;4)$  (рис. 3,в).

4. Укладка прямоугольника, характеризуемого элементом  $v_1 = \langle 3, 0, 6 \rangle$ . Это прямоугольник №3, который должен быть уложен без поворота. Список точек  $M = \{M_0(0;0), M_1(5;0), M_2(4;4)\}$ . Выбирается точка  $M_{6 \bmod |M|}$ , т.е. выбирается точка  $M_0$ , и прямоугольник укладывается без поворота с координатами угла (0; 0) (рис. 3,з).

5. Укладка прямоугольника, характеризуемого элементом  $v_1 = \langle 1, 1, 5 \rangle$ . Это прямоугольник №1, который должен быть уложен с поворотом. Список точек  $M = \{M_0(5;0)\}$ . Выбирается точка  $M_{4 \bmod |M|}$ , т.е. выбирается точка  $M_0$ , и прямоугольник укладывается с поворотом с координатами угла (5; 0) (рис. 3,д).

Полученная карта раскроя изображена на рисунке 3,е.

**Третья глава** посвящена автоматизированной системе расчета прямоугольного раскроя. Описано современное состояние раскройно-заготовительного производства, структура САПР раскроя-упаковки. Выделены основные подсистемы САПР раскроя-упаковки, приведены блок-схемы разработанных алгоритмов; представлена архитектура системы 2DR-CUT, являющейся подсистемой САПР раскроя-упаковки; приведены функциональные возможности программы-оболочки 2DR-CUT, функциональная и информационная модели.

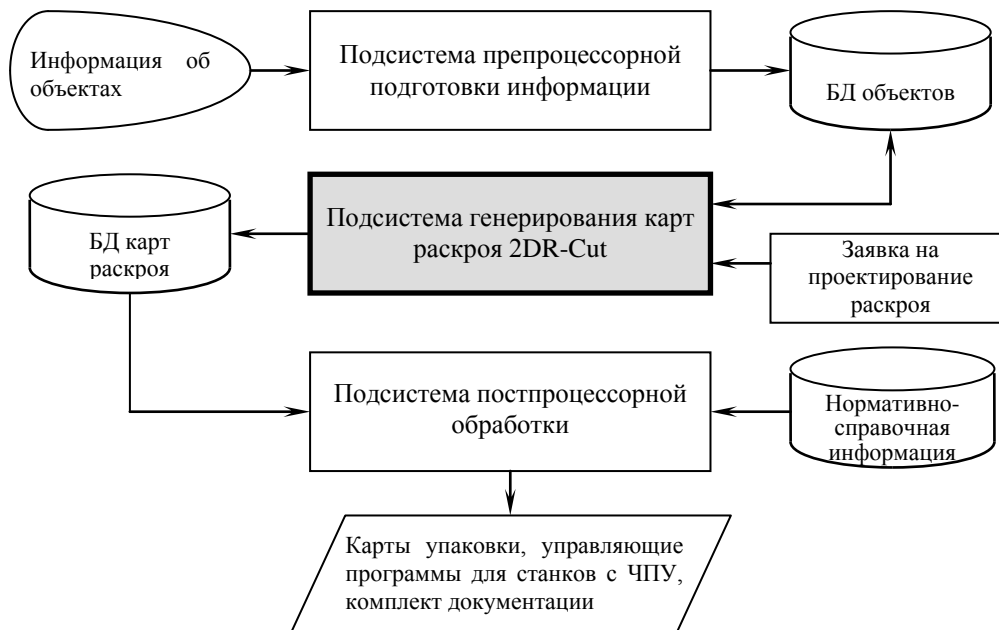


Рисунок 4 – Схема САПР раскроя-упаковки

Основные подсистемы САПР раскроя-упаковки представлены на рис. 4. Серым цветом выделена подсистема, включающая разработанное программное обеспечение. Оно может быть интегрировано в систему автоматизированного проектирования (САД/САМ систему).

Разработанные алгоритмы расчета прямоугольного раскроя представлены в виде динамически подключаемых библиотек (DLL), но интеграция этих алгоритмов в CAD/CAM систему требует соответствия внутренних форматов данных. В связи с этим предусмотрен вариант с использованием исполняемого модуля, на вход которого подается текстовый файл задания, а на выходе формируется текстовый файл результата – карты раскроя (рис. 5). Этот исполняемый модуль использует расчетные алгоритмы в виде DLL, передавая задания на расчет карт раскроя и получая результат в виде списка координат размещения прямоугольных заготовок.

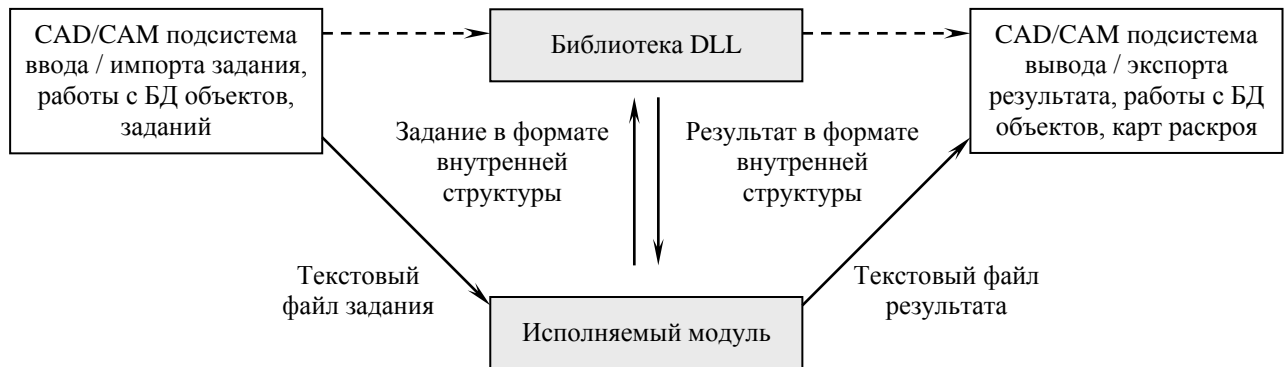


Рисунок 5 – Интеграция разработанного программного обеспечения в САПР

Разработанное программное обеспечение для расчета прямоугольного раскроя листового и рулонного материала с учетом технологических ограничений интегрировано в систему автоматизированного проектирования «Сириус».

В четвертой главе описаны результаты численных экспериментов. В численном эксперименте рассматривались различные классы задач раскроя рулонного материала. Было рассмотрено четыре класса различных прямоугольников: «большие» **B** ( $l \in [0,4W;0,5W]$ ,  $w \in [0,4W;0,5W]$ ); «малые» **S** ( $l \in [0,02W;0,1W]$ ,  $w \in [0,02W;0,1W]$ ); «длинные» **L** ( $l \in [0,02W;0,1W]$ ,  $w \in [0,4W;0,5W]$ ) и ( $l \in [0,4W;0,5W]$ ,  $w \in [0,02W;0,1W]$ ); «триплеты» **T** ( $l \in [0,3W;0,35W]$ ,  $w \in [0,3W;0,35W]$ ). В работе проведена серия численных экспериментов. В качестве критерия получаемых решений использовался коэффициент раскроя (КРа), который вычисляется следующим образом:

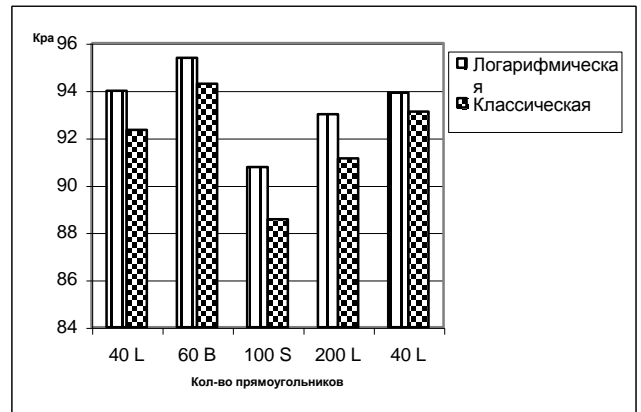
$$KPa = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot l_i}{W \cdot L'} \cdot 100\% \text{ для полосы и } KPa = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot l_i}{W \cdot L \cdot N} \cdot 100\% \text{ для листов, где } L' - \text{длина занятой части полосы, } W - \text{ширина полосы или листа, } L - \text{длина листа, } N - \text{количество листов, } w_i, l_i - \text{размеры прямоугольников.}$$

*Серия 1.* Исследовалась зависимость коэффициента раскроя, получаемого методом «холодного» отжига от контрольного параметра. Решалась задача на полосу (рис. 5, а). Параметры алгоритма:  $n_0 = \{1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 5000\}$ ; время работы – 1 секунда,

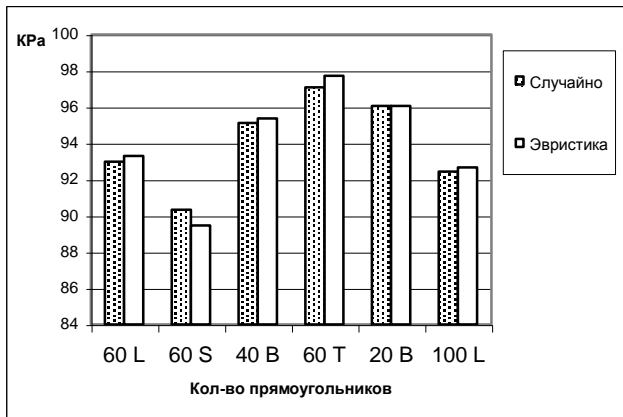
10 секунд, 50 секунд, количество прямоугольников – 80, раскрой гильотинный. При увеличении контрольного параметра  $n_0$  до 1500 эффективность алгоритма возрастает. Рекомендуемые значения параметра от 500 до 1500.



*a*



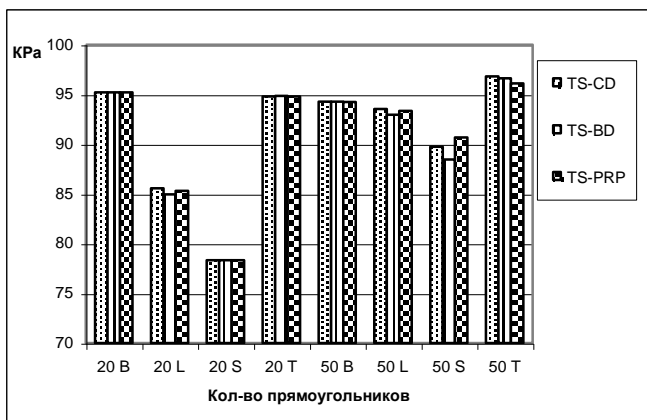
*б*



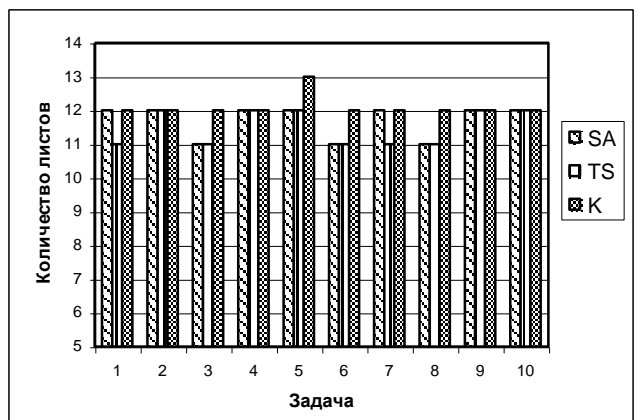
*в*



*г*



*д*



*е*

Рисунок 6 – Результаты численного эксперимента

- a* – зависимость значения оценочной функции от контрольного параметра;
- б* – зависимость KPa от вида оценочной функции;
- в* – зависимость KPa от начального решения;
- г* – сравнение методов SA, CA и (1+1)-EA;
- д* – сравнение декодеров; *е* – сравнение алгоритмов SA, TS и NPE\_Decode

*Серия 2.* Исследовалась зависимость коэффициента раскроя, получаемого методом «холодного» отжига, от вида оценочной функции  $F(q)$ . Решалась задача на полосу (рис. 5, б). Параметры алгоритма:  $n_0=500$ ; время работы алгоритма – 50 секунд, количество прямоугольников – 40, 60, 100 и 200, раскрой гильотинный. Использовались следующие оценочные функции:  $F(q) = S(q)$ , где  $S(q)$  – площадь использованного материала, и  $F(q) = \ln S(q)$ . Использование логарифмической оценочной функции повышает качество решения задачи на 3-5%.

*Серия 3.* Исследовалась зависимость коэффициента раскроя, получаемого методом «холодного» отжига от начального решения, которое генерировалось случайным образом или с помощью эффективной однопроходной эвристики. Решалась задача на полосу (рис. 5, в). Параметры алгоритма:  $n_0=50$ ; время работы – 1 минута, количество прямоугольников – 20, 40, 60 и 100, раскрой гильотинный. При использовании однопроходной эвристики в качестве начального решения эффективность метода «холодного» отжига возрастает на 1-2%.

*Серия 4.* Сравнительный анализ методов «имитация отжига», «холодного» отжига, (1+1)-EA (повороты прямоугольных заготовок запрещены) (рис. 5, г). Параметры алгоритмов: время работы – 5 минут, количество прямоугольников – 20 и 50, раскрой гильотинный. Метод «холодного» отжига показывает лучшие результаты на классах задач «триплеты», «длинные» и «малые» прямоугольниками по сравнению с методом «имитация отжига» на 2-3% и по сравнению с методом (1+1)-EA на 3-5%, а также при увеличении числа заготовок.

*Серия 5.* Целью эксперимента при решении задачи раскроя полосы являлось сравнение декодеров в составе метаэвристики «поиск с запретами» (Мухачева Э.А., Ермаченко А.И.). Использовались декодеры: «последовательного конструирования», «блочный» и «вставки». Повороты прямоугольников разрешены (рис. 5, д). Параметры алгоритмов: время работы – 1 минута, количество прямоугольников – 20 и 50, раскрой негильотинный. Разработанный декодер «вставки» показал лучшие результаты в классе «длинные» прямоугольники, чем декодер «последовательного конструирования» и «блочный» на 1-2%.

*Серия 6.* Проводилось сравнение методов «поиск с запретами», «холодного» отжига с декодером «вставки» и NPE\_Decode (Кочетов Ю.А., Руднев А.С., Новосибирский государственный университет). Повороты прямоугольников разрешены. Параметры алгоритмов: время работы – 1 минута, количество прямоугольников – 80, раскрой гильотинный, наличие дефектных областей материала. Тестовые данные: класс В – «большие» прямоугольники [0.4W..0.5W; 0.4W..0.55W]. Решалась задача гильотинного раскроя на листы с дефектными областями (рис. 5, е). В 30% случаев алгоритмы «холодного» отжига и «поиск с запретами» с декодером «вставки» показали улучшение решения на один лист.

### **Основные результаты работы и выводы**

1. Выполнен анализ методов расчета прямоугольного раскроя на основе вероятностных методов локального поиска и выделен класс эволюционных



методов для решения задач прямоугольного раскроя с учетом дефектных областей. Разработан алгоритм «холодного» отжига, основанный на базе процедур метода «имитация отжига». На большинстве классов задач он показал лучшие результаты по сравнению с классическим методом «имитация отжига». Реализован алгоритм (1+1)-EA как частный случай алгоритма «имитация отжига» с нулевой температурой.

2. Разработан новый метод проектирования прямоугольного раскроя – декодер PRP, учитывающий дефекты раскройного материала. Этот декодер используется в составе метаэвристик (1+1)-EA, «холодного» отжига и «поиска с запретами». Они включены в автоматизированную систему расчета прямоугольного раскроя 2DR-Cut. Использование нового декодера позволяет повысить качество решения по сравнению с известными декодерами на 3-5%.

3. Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие учитывать ряд технологических ограничений: припуски нарезы, окантовку рулона или листов, дефекты раскраиваемого материала, реализованные в виде программного обеспечения. Программное обеспечение в составе системы 2DR-CUT автоматизированного рабочего места технолога раскройно-заготовительного производства позволяет повысить коэффициент использования материала в среднем на 5-8% по сравнению с простыми эвристиками и значительно сократить время проектирования.

4. Разработано оптимизационное ядро САПР в виде программного комплекса проектирования прямоугольного раскроя листового и рулонного материала с учетом дефектных областей на базе модифицированных эволюционных методов в рамках системы САПР раскройно-заготовительного производства. Результаты диссертационной работы приняты к внедрению в виде алгоритмов и программного обеспечения на ООО «Центр автоматизации проектирования и высоких технологий» (г. Екатеринбург), на предприятии, производящем мебель.

5. Исследована эффективность предложенных методов на базе численного эксперимента с использованием системы двумерного прямоугольного раскроя 2DR-CUT. При раскрое полосы наблюдается заметное улучшение качества решения задачи раскроя на некоторых классах задач.

### **Публикации по теме диссертации**

#### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:***

1. Комплекс алгоритмов и программ расчета гильотинного раскроя / Э.А. Мухачева, А.И. Ермаченко, Т.М. Сиразетдинов., Т.Ю. Жукова (Сиразетдинова) // Информационные технологии. 2004, №8. С. 18–25.

#### ***Другие публикации:***

2. Применение метода «моделирования отжига» для решения задачи раскроя / Т.Ю. Жукова (Сиразетдинова) // Принятие решений в условиях неопределенности: сб. статей. Уфа: УГАТУ, 2003. С.45-51.

3. Применение метаэвристики «имитация отжига» для задач гильотинного прямоугольного раскроя / А.Ф. Валеева, Т.Ю. Сиразетдинова // Междунар. Уфимск. зимн. шк.-конф. по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых : матер. конф. Уфа, 2005. С. 99.

4. Метод «имитация отжига» для решения задач двухмерного гильотинного раскроя / Т.Ю. Сиразетдинова // Интеллектуальные системы обработки информации и управления : сб. статей регион. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Технологии, 2006. С.165-173.

5. Задача прямоугольного гильотинного раскроя на базе метаэвристики «имитация отжига» / Т.Ю. Сиразетдинова, А.Ф. Валеева // Проблемы оптимизации и экономические приложения, III Всероссийская конф.: матер. конф. Омск, 2006. С. 55-62.

6. Решение задачи прямоугольного гильотинного раскроя с применением процедур имитации отжига / А.Ф. Валеева, Т.Ю. Сиразетдинова // Социально-экономические и технические системы. [Электронный ресурс] Набережные Челны, №9 2006 ( <http://kampi.ru/sets>). 7 с.

7. Система проектирования прямоугольного раскроя /А.И. Ермаченко, Т.Ю. Сиразетдинова и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611452 от 11. 06.2004. М.

Сиразетдинова Татьяна Юрьевна

Конструирование прямоугольного раскроя в системах автоматизированного проектирования с учетом дефектных областей материала

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 23.03.2007. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 1,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 117.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12