

На правах рукописи

ФАЙЗРАХМАНОВ Ришат Илшатович

**ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССА РАСКРОЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ
ПРИ НАЛИЧИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

**Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)**

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

Уфа – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный технический университет»
на кафедре вычислительной математики и кибернетики

- Научный руководитель** д-р техн. наук, профессор
Валеева Аида Фаритовна
- Официальные оппоненты** д-р техн. наук, доц.
Асанов Асхат Замилович
проф. каф. прикладной математики
и информатики филиала ФГАОУ ВПО
«Казанский (Приволжский) Федеральный
университет» в г. Набережные Челны
- канд. техн. наук
Сиразетдинов Тимур Маратович
гл. специалист ООО «РН-УфаНИПИнефть»
- Ведущая организация** Башкирский государственный университет

Защита диссертации состоится 29 апреля 2011 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета

Автореферат разослан «25» марта 2011 г.

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



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важным фактором конкурентоспособности в условиях единичного производства является снижение материалоемкости и рационального использования материальных ресурсов, что требует совершенствование системы технологической подготовки раскроя промышленных материалов. Одной из важных составляющих технологической подготовки производства является оптимизация раскроя промышленных материалов с учетом различных технологических ограничений, таких как гильотинность реза, направление волокон материала, обход дефектных областей материала и др. Задачи раскроя промышленных материалов, ориентированных на единичное производство, возникают при изготовлении разнообразной продукции на заказ. При этом необходимо осуществлять раскрой на заготовки различных форм.

Подобные задачи раскроя относятся к классу NP-трудных проблем, что означает отсутствие в настоящее время алгоритмов полиномиальной сложности, находящие решения за приемлемое на практике время. В связи с этим актуальной становится разработка и исследование эвристических методов решения задач раскроя, учитывающих технологические ограничения, возникающие в реальном производстве при производстве конечной продукции.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и алгоритмов решения задач раскроя промышленных материалов на заготовки различных геометрических форм с учетом технологических ограничений, возникающих в реальном производстве.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов и алгоритмов для повышения эффективности управления раскроем промышленных материалов при наличии технологических ограничений.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих технологий раскройно-заготовительных работ. Выявить основные технологические ограничения и сформулировать содержательную постановку задачи оптимизации раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений. Провести системный анализ и выявить недостатки существующих методов и алгоритмов оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь.

2. Разработать математические модели для задач раскроя промышленных материалов на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений.

3. Разработать методы и алгоритмы для решения различных математических моделей задач раскроя промышленных материалов при наличии технологических ограничений.

4. Разработать программное обеспечение на основе предложенных методов и алгоритмов для решения задачи оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений.

5. Исследовать эффективность предложенных методов и алгоритмов с помощью численного эксперимента и разработать рекомендации по их применению в реальном производстве.

Методы исследования. В работе использовались методы системного анализа, проектирования программного обеспечения, методы решения задач дискретной оптимизации. Оценка эффективности предложенных методов и алгоритмов осуществлялась с помощью численных экспериментов на случайно сгенерированных и известных примерах и их сравнении с результатами полученными другими авторами.

На защиту выносятся:

1. Результаты системного анализа проблемы раскроя промышленных материалов в металлообрабатывающей промышленности, состоящие из анализа существующих методов и установлении основных технологических ограничений, которые следует учитывать в поставленной задаче.

2. Математические модели задач раскроя промышленных материалов на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений, возникающих в реальном производстве.

3. Метод рационального размещения заготовок различных геометрических форм на листовом и рулонном промышленном материале при наличии технологических ограничений.

4. Модифицированный алгоритм муравьиной колонии, основанный на процедурах генетического алгоритма и осуществляющий обмен информацией о построенных картах раскроя для решения задач раскроя листового и рулонного промышленного материала на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений характерных для реального производства в металлургической промышленности.

5. Программное обеспечение на основе предложенных методов и алгоритмов оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений на примере металлургической промышленности.

Научная новизна результатов диссертационного исследования:

1. Математические модели задач раскроя промышленных материалов на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений, в отличие от известных работ позволяют учитывать дефектные области, аппроксимируемые различными геометрическими фигурами.

2. Метод рационального размещения заготовок на рулонном и листовом промышленном материале, в отличие от известных методов позволяет размещать заготовки различных геометрических форм и осуществлять обход

дефектных областей материала аппроксимируемых различными геометрическими фигурами.

3. Модифицированный алгоритм муравьиной колонии, основанный на процедурах генетического алгоритма и осуществляющий обмен информацией о построенных картах раскроя, для решения задачи раскроя листового и рулонного материалов на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений характерных для реального производства, который использует:

а) интервальное ограничение для параметра, показывающего частоту выбора фрагмента решения во избежания ранней стагнации;

б) принцип «элитного муравья» для сохранения лучшего решения.

4. Результаты численных экспериментов, в результате которых для пяти примеров размещения круглых и прямоугольных предметов в полубесконечную область получены новые улучшенные значения целевой функции.

Практическую значимость имеют следующие результаты.

1. Методика повышения эффективности управления раскроем листового материала на этапе технологической подготовки производства при наличии технологических ограничений (направление волокон материала, припуски на окантовку сторон промышленного материала, на механическую обработку заготовки, на выполнение резов, припуски между заготовками для фиксацию материала), позволяющая снизить потери материала и время простоя в производстве.

2. Рабочий прототип программного обеспечения, реализующий предложенные методы и алгоритмы расчета раскроя промышленных материалов на заготовки круглых и прямоугольных форм при наличии технологических ограничений.

Апробирование результатов в виде методики повышения эффективности управления раскроем листового промышленного материала при производстве заготовок и рабочего прототипа программного обеспечения для оптимизации процесса раскроя на этапе технологической подготовки производства осуществлено на предприятии ХТЦ УАИ, Уфа. Применение разработанного программного обеспечения позволяет повысить эффективность использования материала на 6–8 %.

Разработанные методы решения задач являются инвариантными и могут быть легко адаптированы под конкретное производство.

Связь исследования с научными проблемами

Работа выполнялась при частичной поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проекты 09-07-09254-моб_3 и 10-07-91330-ННУО-а, ИФ ВК 03 10 ХК.

Апробация работы и публикации

Результаты работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах.

1. IV Республиканская студенческая научно-практическая конференция «Научное и экологическое обеспечение современных технологий», УГАЭС, Уфа, 2007;

2. Международной конференции "Компьютерные науки и информационные технологии" (CSIT), Уфа, 2007–2010;
3. Зимней школе для аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2008–2010);
4. I Всероссийской молодежной научной конференции "Молодежь и наука на севере", Сыктывкар, 2008;
5. IV Всероссийской конференции "Проблемы оптимизации и экономические приложения", Омск, 2009;
6. Российская конференция "Дискретная оптимизация и исследование операций" (DOOR-2010), Республика Алтай, 2010;
7. Международная конференция «Инновационные информационные технологии: Теория и Практика», Дрезден, 2010.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ выполненных по теме диссертации при непосредственном участии автора: 9 статей, в том числе 2 в рецензируемом журнале ВАК и 7 статей в сборниках трудов конференции, 4 тезиса в сборниках конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, кроме того содержит 61 рисунка и 13 таблиц. Библиографический список включает 112 наименования и занимает 9 страниц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность заведующему кафедрой Вычислительной математики и кибернетики, профессору, доктору технических наук Н. И. Юсуповой за консультации в области системного анализа.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проводится системный анализ предметной области, на основе которого приводится актуальность задачи оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума потерь при наличии технологических ограничений на заготовки различных геометрических форм, особое внимание уделено раскрою промышленных материалов на круглые и прямоугольные заготовки. Определяется место оптимизации процесса раскроя промышленных материалов в технологической подготовке производства. На основе анализа существующих технологий раскройно-заготовительных работ определяются основные технологические ограничения, зависящие от способа резки и вида материала, относящиеся к поставленной задаче: ширина реза (зависящая как от типа резки, так и от толщины материала), отступы на механическую обработку (например, в случае термического воздействия на материал), условие гильотинности, припуски на окантовку материала (сверху, снизу, слева и справа от боковых сторон промышленного материала – для фиксации материала), отступы между заготовками

(для фиксации материала), учет дефектных областей материала, учет направления волокон материала.

На рисунке 1 представлена структурная схема управления заготовительным производством, состоящего из следующих основных уровней: уровень планирования, уровень координации и уровень исполнения.

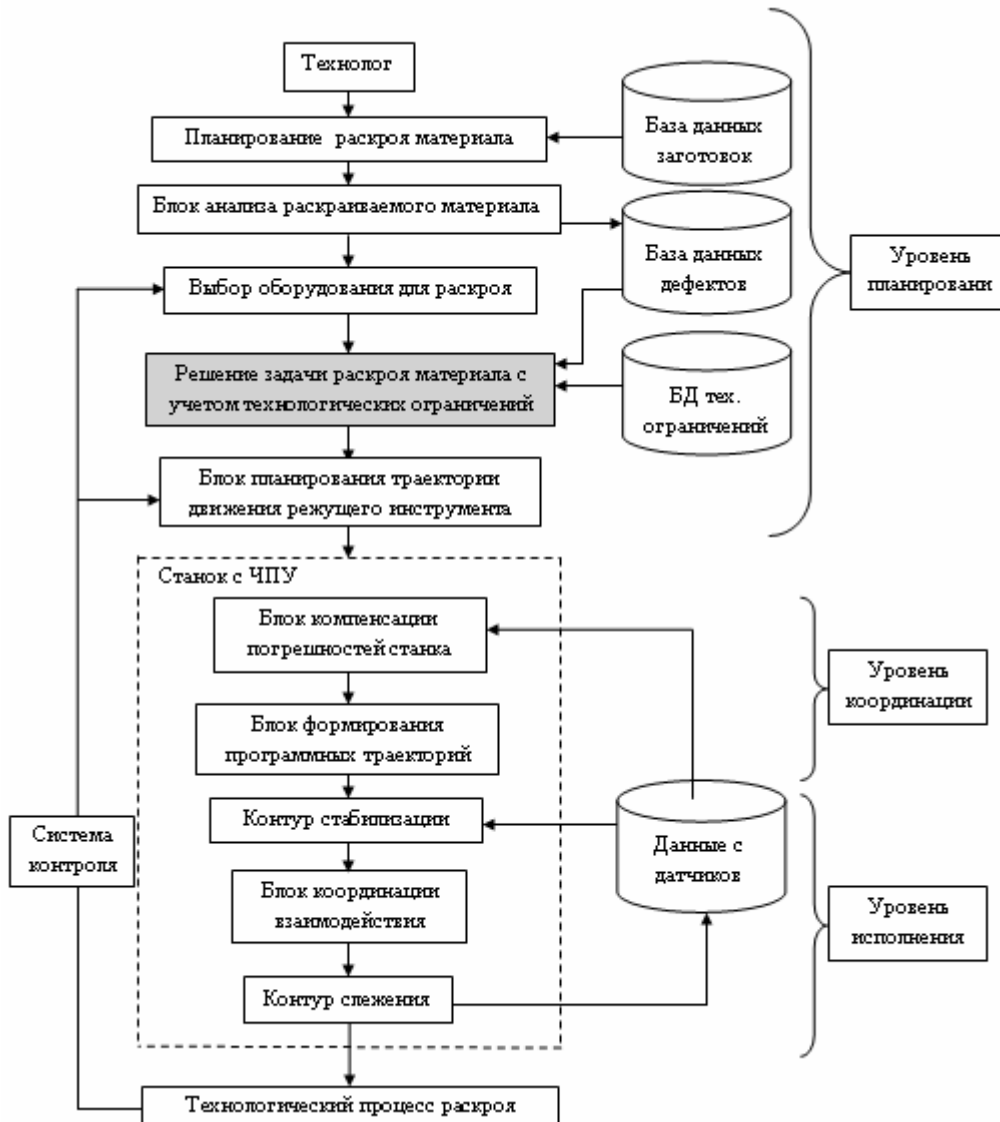


Рисунок 1 – Структурная схема управления заготовительным производством

Для достижения цели рационального раскроя промышленного материала необходимо на уровне планирования решить следующие задачи: планирование раскроя материала, анализ материала (например, определение дефектных областей), выбор технологии раскроя, решение задачи составления рациональной карты раскроя, определение минимальной траектории движения режущего инструмента. На уровне координации: компенсация систематических погрешностей станков с ЧПУ, уточнение траектории движения режущего инструмента. На уровне исполнения: компенсация погрешностей возникающих при работе станка с ЧПУ, координация раскроя с учетом воз-

никающих погрешностей. Данная работа посвящена решению задачи раскроя промышленных материалов, которая находится на уровне планирования.

Приведен обзор задач раскроя промышленных материалов и методов их решения, которые представлены в работах отечественных и зарубежных авторов (Л. В. Канторович, В. А. Залгаллер, Э. А. Мухачева, И. В. Романовский, В. В. Мартынов, А. А. Петунин, В. М. Верхотуров, А. Ф. Валеева, Ю. А. Кочетов, G. Sheithauer, H. Dykhoff, S. Martello, P. Gilmore, R. Gomory, G. Washer, M. Garry, D. Johnson и другие.)

В результате анализа существующих методов решения задач раскроя и выявления их недостатков была выбрана конструктивная метаэвристика «муравьиная колония» в связи с тем, что:

1. Алгоритмы муравьиной колонии показали хорошие результаты при решении задач комбинаторной оптимизации и для некоторых задач были найдены новые рекордные решения.
2. Основными достоинствами этих алгоритмов является: положительная обратная связь, позволяющая быстро находить хорошие решения; распределенное вычисление, препятствующее ранней сходимости алгоритма; применение жадной эвристики, позволяющей находить хорошие решения на ранних стадиях процесса поиска.

Качество полученного решения зависит не только от выбранного алгоритма расчета раскроя, но и от метода размещения заготовок на материале. В связи с этим возникает необходимость в разработке метода, позволяющего осуществлять рациональное размещение заготовок с учетом технологических ограничений, возникающих в реальном производстве. В существующих методах решения задач раскроя большое внимание уделено задачам прямоугольного раскроя и раскроя на круги, в то время как задачам одновременного раскроя на круглые и прямоугольные заготовки в литературе уделено мало внимания.

Во второй главе приведены постановки задач раскроя промышленного материала на прямоугольные и круглые заготовки с учетом технологических ограничений, приведены математические модели задач раскроя, описывается метод, позволяющий осуществлять размещение заготовок круглых и прямоугольных форм на промышленном материале при наличии технологических ограничений.

Исходная информация задач раскроя может быть задана наборами следующего вида – $\langle W; L; n_c; n_r; R_c; W_r; L_r; D; \Delta; \sigma; \varphi; \delta \rangle$, где

W, L – ширина и длина листового/рулонного материала (в случае рулонного материала $L = \infty$);

n_c, n_r – количество круглых и прямоугольных предметов, соответственно;

$R_c = (r_{1c}, r_{2c}, \dots, r_{ic}, \dots, r_{n_c c})$ – вектор радиусов круглых заготовок, r_i – радиус i -ой круглой заготовки, $i \in I_c = (1, 2, \dots, n_c)$;

$W_r = (w_{1r}, w_{2r}, \dots, w_{jr}, \dots, w_{n_r r})$, $L_r = (l_{1r}, l_{2r}, \dots, l_{jr}, \dots, l_{n_r r})$ – вектора ширин и длин прямоугольных заготовок, w_{jr} , l_{jr} – ширина и длина j -й прямоугольной заготовки соответственно, $j \in J_r = (1, 2, \dots, n_r)$;

D – список дефектных (запретных для размещения заготовок) областей;

Δ – необходимый суммарный припуск между заготовками;

σ – необходимый суммарный припуск между верхним/нижним сторонами промышленного материала и заготовкой;

φ – необходимый суммарный припуск между боковыми сторонами промышленного материала и заготовкой.

δ – необходимый суммарный припуск между дефектной областью и заготовкой.

Введем прямоугольную систему координат XOY , у которой оси OX и OY совпадают соответственно с верхней и боковой сторонами листового материала. Решение задачи представляется в виде наборов элементов:

$$\langle X_c, Y_c, K_c \rangle \text{ и } \langle X_r, Y_r, K_r \rangle,$$

где $X_c = (x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{jc}, \dots, x_{n_c c})$, $Y_c = (y_{1c}, y_{2c}, \dots, y_{jc}, \dots, y_{n_c c})$ – векторы координат круглых заготовок, (x_{ic}, y_{ic}) – координаты центра i -й круглой заготовки соответственно по оси X и Y ; $X_r = (x_{1r}, x_{2r}, \dots, x_{jr}, \dots, x_{n_r r})$, $Y_r = (y_{1r}, y_{2r}, \dots, y_{jr}, \dots, y_{n_r r})$ – векторы координат прямоугольных заготовок, (x_{jr}, y_{jr}) – координаты верхнего левого угла j -й прямоугольной заготовки по оси X и Y .

$k_{ic} \in K_c = (k_{1c}, k_{2c}, \dots, k_{ic}, \dots, k_{n_c c})$, $k_{jr} \in K_r = (k_{1r}, k_{2r}, \dots, k_{jr}, \dots, k_{n_r r})$ – номер листа на котором размещена i -я круглая и j -я прямоугольная заготовка, соответственно.

Пусть $D = D_r \cup D_c$, где $D_r = (d_{1r}, d_{2r}, \dots, d_{mr}, \dots, d_{tr})$ – список дефектных областей, аппроксимируемых наборами прямоугольников d_{mr} , $m = \overline{1, t}$; $D_c = (d_{1c}, d_{2c}, \dots, d_{sc}, \dots, d_{gc})$ – список дефектных областей, аппроксимируемых наборами кругов d_{sc} , $s = \overline{1, g}$. Положение d_{mr} определяется набором $\langle x_{mr}^d, y_{mr}^d, l_{mr}^d, w_{mr}^d, n_{mr}^d \rangle$, где (x_{mr}^d, y_{mr}^d) – координаты верхнего левого угла дефектной области, l_{mr}^d, w_{mr}^d – длина и ширина дефектной области, n_{mr}^d – номер листа, который содержит дефектную область. Положение d_{sc} определяется набором $\langle x_{sc}^d, y_{sc}^d, r_{sc}^d, n_{sc}^d \rangle$, где (x_{sc}^d, y_{sc}^d) – координаты центра дефектной области, r_{sc}^d – радиус дефектной области, n_{sc}^d – номер листа, который содержит дефектную область.

Наборы элементов $\langle X_c, Y_c, K_c \rangle$ и $\langle X_r, Y_r, K_r \rangle$, называются допустимым раскроем, если выполнены следующие условия:

1) стороны прямоугольных заготовок параллельны сторонам листового или рулонного материала (условие ортогональности);

2) прямоугольные заготовки $j, s \in J_r (\forall s \neq j)$ не перекрывают друг друга и не выходят за границы раскраиваемого материала;

3) круглые заготовки $i \in I_c$ не перекрывают друг друга и не выходят за границы раскраиваемого материала;

4) круглые $i \in I_c$ и прямоугольные заготовки $j \in J_r$ не перекрывают друг друга (формула (1));

$$\begin{aligned} & [((x_{ic} + r_{ic} + \Delta) \leq x_{jr}) \cup ((x_{jr} + l_{jr} + \Delta) \leq (x_{ic} - r_{ic})) \cup ((y_{jr} + w_{jr} + \Delta) \leq \\ & \leq (y_{ic} - r_{ic})) \cup ((y_{ic} + r_{ic} + \Delta) \leq y_{jr})] \cup [(x_{ic} \leq x_{jr}) \cap (y_{ic} \leq y_{jr}) \cap \\ & \cap ((x_{ic} - x_{jr})^2 + (y_{ic} - y_{jr})^2 \geq (r_{ic} + \Delta)^2)] \cup [(x_{ic} \geq (x_{jr} + l_{jr})) \cap \\ & \cap (y_{ic} \leq y_{jr}) \cap ((x_{ic} - x_{jr} - l_{jr})^2 + (y_{ic} - y_{jr})^2 \geq (r_{ic} + \Delta)^2)] \cup [(x_{ic} \leq x_{jr}) \cap \\ & \cap (y_{ic} \geq (y_{jr} + w_{jr})) \cap ((x_{ic} - x_{jr})^2 + (y_{ic} - y_{jr} - w_{jr})^2 \geq (r_{ic} + \Delta)^2)] \cup \\ & \cup [(x_{ic} \geq (x_{jr} + l_{jr})) \cap (y_{ic} \geq (y_{jr} + w_{jr})) \cap \\ & ((x_{ic} - x_{jr} - l_{jr})^2 + (y_{ic} - y_{jr} - w_{jr})^2 \geq (r_{ic} + \Delta)^2)] \end{aligned} \quad (1)$$

5) круглые заготовки $i \in I_c$ и прямоугольные заготовки $j \in J_r$ не пересекаются с дефектными областями аппроксимированные кругами $s \in D_c$ и прямоугольниками $t \in D_r$.

Требуется найти совокупность раскроев листов, минимизирующих их суммарное количество N .

Для размещения прямоугольных и круглых предметов разработан метод $ABLP^+$, являющийся модификацией метода $ABLP$ (M. Nifi, R. M'Hallah), создающего конечное множество позиций для размещения круглых предметов. Идея метода $ABLP^+$ состоит в следующем: пусть имеется множество кругов $I_c \in I'_c \cup I''_c$ и множество прямоугольников $I_r \in I'_r \cup I''_r$, где I'_c – множество неразмещенных кругов, I''_c – множество размещенных кругов, I'_r – множество неразмещенных прямоугольников, I''_r – множество размещенных прямоугольников. Первый компонент из множества $I_c \cup I_r$ в верхний левый угол области (пример для размещения круга приведен на рисунке 1, *a*; далее формируется список Π допустимых позиций для размещения следующего компонента из множества $I'_c \cup I'_r$ и удаление из него тех позиций, которые не обеспечивают допустимое размещение; из сформированного списка позиций Π выбирается самая верхняя левая позиция для добавления следующего предмета.

В методе $ABLP^+$ формирование списка допустимых позиций происходит следующим образом:

1. Каждый круг P_i радиусом r_{ic} и координатами размещения (x_{ic}, y_{ic}) , описывается кругом радиусом $r_{ic} + \Delta$, который очерчивается горизонтальными и вертикальными линиями, позволяющими определить по четыре позиции для размещения следующего круга или прямоугольника. Пример формирования четырех позиций (x_{kr}^1, y_{kr}^1) , (x_{kr}^2, y_{kr}^2) , (x_{kr}^3, y_{kr}^3) , (x_{kr}^4, y_{kr}^4) кругом P_i для размещения следующего прямоугольника R_k приведен на рисунке 1, *b*.

2. Каждый размещенный прямоугольник R_k шириной w_{kr} и длиной l_{kr} , описывается прямоугольником шириной $w_{kr} + 2 \times \Delta$ и длиной $l_{kr} + 2 \times \Delta$, который очерчивается горизонтальными и вертикальными линиями, позволяющими определить по четыре позиции для размещения следующего круга или прямоугольника. Пример формирования четырех позиций (x_{jc}^1, y_{jc}^1) , (x_{jc}^2, y_{jc}^2) , (x_{jc}^3, y_{jc}^3) прямоугольником R_k для размещения следующего круга P_j приведен на рисунке 2.

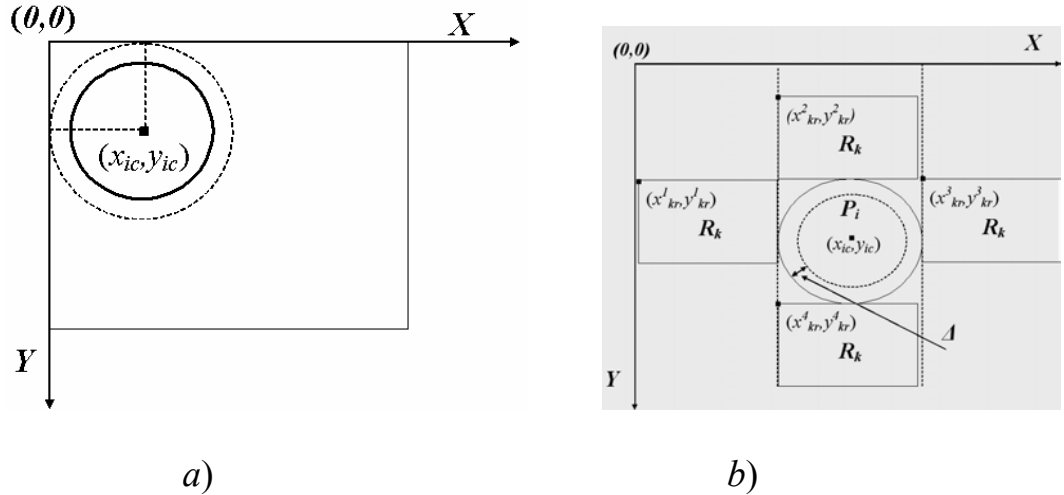


Рисунок 1 — Метод $ABL P^+$: a — размещение круга в верхний левый угол области; b — четыре позиции, образованные кругом P_i для размещения прямоугольника R_k

3. Углы области размещения образуют дополнительные позиции для размещения следующего предмета.

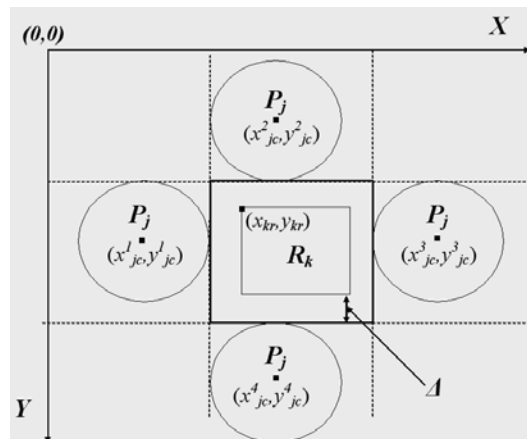


Рисунок 2 — Четыре позиции, образованные прямоугольником R_k для размещения круга P_j

4. Два смежных круга P_i и P_s генерируют по две дополнительные позиции для размещения следующего круга P_j или прямоугольника R_j . Пример

формирования двух позиций (x_{jr}^1, y_{jr}^1) и (x_{jr}^2, y_{jr}^2) для прямоугольника R_j приведен на рисунке 3, *a*.

5. Пара (P_i, R_k) , где P_i – круг, R_k – прямоугольник, генерирует по две дополнительные позиции для размещения следующего круга P_j или прямоугольника R_j . Пример формирования двух позиций (x_{jc}^1, y_{jc}^1) и (x_{jc}^2, y_{jc}^2) для размещения следующего круга P_j приведен на рисунке 3, *b*

В третьей главе рассматриваются алгоритмы муравьиной колонии, их достоинства и недостатки. Для решения задачи оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений разработан алгоритм *ACOGA*, основанный на алгоритме муравьиной колонии с процедурами генетического алгоритма *P-ACO* для решения задачи коммивояжера (М. Guntssch, М. Middendorf).

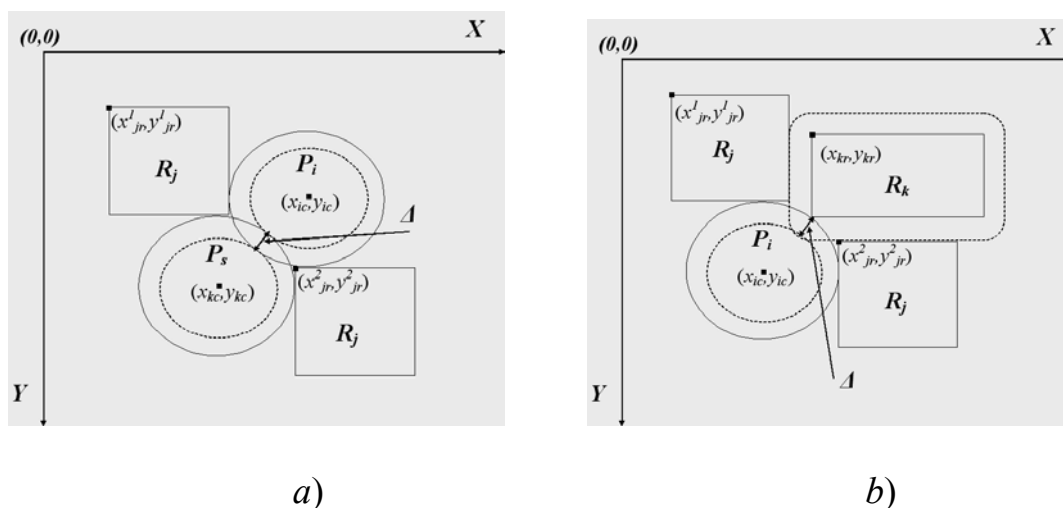


Рисунок 3 — Позиции, генерируемые парами размещенных предметов: *a* — позиции, генерируемые парой кругов для размещения прямоугольника R_j ; *b* — позиции, генерируемые парой круг и прямоугольник для размещения прямоугольника R_j

Алгоритм *ACOGA* для решения задачи оптимизации процесса раскроя промышленных материалов при наличии дефектных областей

Вход: W – ширина полосы; n_c – количество кругов; n_r – количество прямоугольников; w_j, l_j – ширина и длина j -го прямоугольника соответственно, r_i – радиус i -го круга, $i=1, 2, \dots, n_r$; $j=1, 2, \dots, n_c$, $D=(d_1, d_2, \dots, d_s)$ – список дефектных областей, одна из стратегий обновления популяции: *Age* (удаление самого старого решения из популяции), *Quality* (удаления решения с худшей целевой функцией) или *Probability* (удаление решения из популяции с некоторой вероятностью).

Выход: лучшее найденное решение (*карта раскроя*)

1. Инициализация параметров алгоритма: k – размерность популяции; m – количество агентов; α – коэффициент влияния феромона; β – коэффициент

влияния эвристической информации; τ_{init} – начальное значение феромона (феромон – численная характеристика предмета, показывающая насколько часто данный предмет входил в лучшие решения на предыдущих итерациях алгоритма); τ_{max} – максимальное значение феромона; ρ – коэффициент испарения феромона; размещение дефектных областей $D=(d_1, d_2, \dots, d_s)$.

2. Повторять, пока не выполнен критерий остановки:

2.1. Выбрать предмет из множества $I_c \cup I_r$ с некоторой вероятностью по формуле (2) и поместить его в верхний левый угол области при помощи метода $ABLP^+$.

2.2. Для каждого из m агентов, не завершивших построение решений, выполнить:

2.2.1. Выбрать следующий предмет из множества $I'_c \cup J'_r$ с некоторой вероятностью, определяемой формулой (2).

2.2.2. Добавить выбранный компонент к частично построенному решению:

2.2.2.1. С помощью метода $ABLP^+$ построить список позиций, удовлетворяющий условиям допустимости 1) – 5);

2.2.2.2. Поместить компонент в лучшую позицию – верхнюю левую найденную позицию.

2.3. Определить среди решений, построенных агентами карту раскрытия с наилучшей целевой функцией.

2.4. Если $|P| = k$, то удалить из популяции решение согласно выбранной стратегии обновления популяции:

2.4.1. Выполнить обновление феромона.

2.5. Добавить лучшее решение в популяцию P :

2.5.1. Выполнить обновление феромона.

3. Выдать результат – лучшее найденное решение.

Параметры алгоритма $\alpha, \beta, \tau_{init}, \tau_{max}$ – вещественные положительные числа.

$$\forall i, j \in I'_c \cup I'_r : p = \frac{\tau_{ij}^\alpha \times \eta_j^\beta}{\sum_{k \in I'_c \cup I'_r} \tau_{ik}^\alpha \times \eta_k^\beta}, \quad (2)$$

где τ_{ij} – феромон, численная характеристика показывающая насколько часто фрагмент j размещался после фрагмента i ;

$\eta_j = (w_{jr} \times l_{jr}) \times \gamma + (\pi \times r_{jc}) \times (1 - \gamma)$ – численная характеристика полезности предмета j для построения решения;

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{если предмет } j \in J_r; \\ 0, & \text{если предмет } j \in I_c. \end{cases}$$

Обновление феромона происходит лишь для решений популяции: если решение добавляется в популяцию, к значению феромона добавляется вели-

чина θ ; если решение удаляется из популяции, значение феромона уменьшается на величину θ . Величина θ определяется по формуле (3):

$$\theta = \frac{Q}{f(a)}, \quad (3)$$

где $f(a)$ – значение целевой функции лучшего найденного решения; Q – некоторая постоянная величина.

Четвертая глава посвящена исследованию эффективности предложенных методов решения задач раскроя промышленных материалов при наличии технологических ограничений на базе численных экспериментов и приводятся решения задач на реальных примерах, взятых из производства.

Численный эксперимент основан на сравнительном анализе полученных результатов с нижними и верхними границами, с известными рекордными решениями, полученными другими эвристическими алгоритмам. Он проведен на различных наборах тестовых примеров из международных библиотек *OR-library* и *OR-Benchmark* (<http://www.laria.u-picardie.fr/hifi/OR-Benchmark/>).

В качестве формального критерия и оценки эффективности полученных решений в работе рассматривается эффективность использования материала: коэффициент раскроя, количество затраченных листов, длина занятой части рулонного материала. Для проведения экспериментов использовался программный прототип решения задач раскроя промышленных материалов на базе пакета C#, в котором реализованы предложенные методы и алгоритмы оптимизации раскроя листового и рулонного промышленных материалов.

Эксперимент 1. Определение влияние параметров алгоритма на качество решений.

Работа алгоритма *ACOGA* проводилась на каждом примере при следующих параметрах: коэффициенты α и β изменялись на интервале от 0,4 до 2-х с шагом 0,1; количество агентов $m=12$; размер популяции $k=10$; начальное значение феромона $\tau_{init}=0,05$.

Для задач размещения прямоугольников в полубесконечную область рассмотрены тестовые примеры из международной библиотеки *OR-library*. На рисунке 4, *a* приведены значения целевых функций при некоторых значениях коэффициентов α и β на тестовых данных класса *N1*, содержащего пять примеров *N11*, *N12*, *N13*, *N14*, *N15*, в каждом из которых содержится по 17 прямоугольников.

Для задачи размещения кругов в полубесконечную область рассмотрены тестовые примеры, в которых радиусы кругов были случайно сгенерированы в интервале $r_{ic} \in [0,1 \times W, \dots, 0,5 \times W]$, где r_{ic} – радиус i -го круга. На рисунке 4, *b* приведены значения целевых функций при некоторых значениях коэффициентов α и β на тестовых данных класса *C1*, содержащего три примера *C11*, *C12*, *C13*, в каждом из которых содержится по 100 кругов.

Эксперимент 2. Решалась задача размещения кругов.

Эксперимент проводился на известных классах примеров $SY1-SY6$ (Е. Норрег). Для сравнения были также представлены решения задачи размещения кругов, полученные генетическим алгоритмом $CAGA$ (M. Hifi, R. M'Hallah), методом ветвей и границ $S.Y.$ (Y. G. Stoyan, G. N. Yaskov), жадной эвристической процедурой $B1.5$ (W. Q. Huang, H. Akeb, Y. Li, C. M. Li), алгоритмом вероятностного поиска с запретами $TABU SEARCH (TS)$ (Ю. А. Кочетов, А. С. Руднев) и решениями, найденными с помощью коммерческого пакета $GAMS$ (<http://www.gams.com/>). В качестве оценки применялась нижняя граница оптимальной длины полубесконечной области LB ,

$$LB = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{W} \quad (S_i - \text{площадь } i\text{-го круга, } W - \text{ширина полубесконечной области})$$

В качестве критерия оценки выступает длина занятой части полубесконечной области L (рисунок 4).

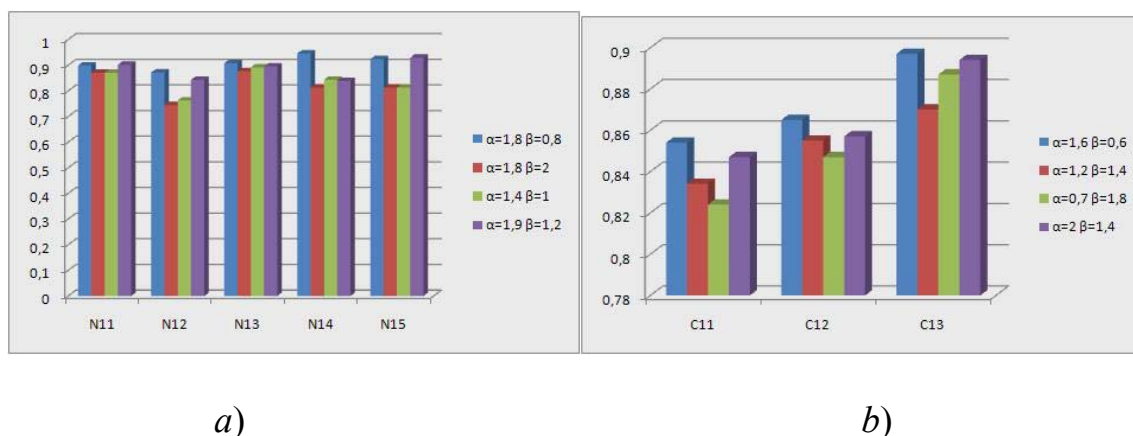


Рисунок 3 — Определение влияния параметров на качество решений: a — Класс NI ; b — Класс CI

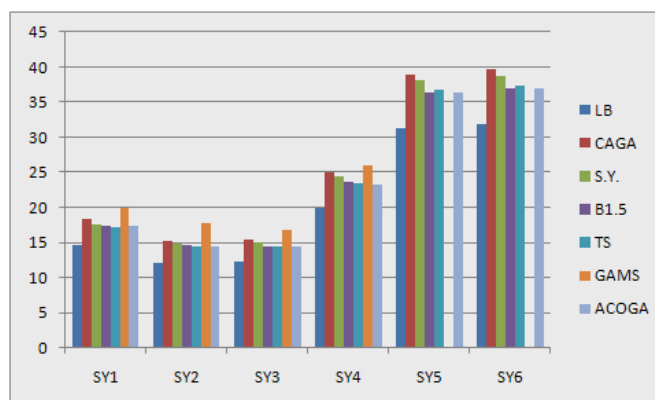


Рисунок 4 — Сравнение алгоритма $ACOGA$ с алгоритмами $CAGA$, SY , $B1.5$, TS и пакетом $GAMS$

Эксперимент №3. Решалась задача одновременного размещения кругов и прямоугольников.

В эксперименте проводилось сравнение работы алгоритмов TS , $ACOGA$ и коммерческого пакета $GAMS$ (рисунок 5). LB -нижняя и UB -верхняя оценки

(А.С. Руднев); для алгоритмов *TS*, *ACOGA* приведены результаты работы алгоритмов.

При решении задач одновременного размещения кругов и прямоугольников в полубесконечную область алгоритму *ACOGA* удалось найти новые рекордные решения на классах задач: *CR3P02*; *CR5P01*; *CR5P02*; *CR5P03*; *CR6P03* (А.С. Руднев).

В результате проведения экспериментов на рассмотренных примерах было выявлено, что разработанные методы и алгоритмы позволяют повысить эффективность использования материала на 6–8% по сравнению с известными.

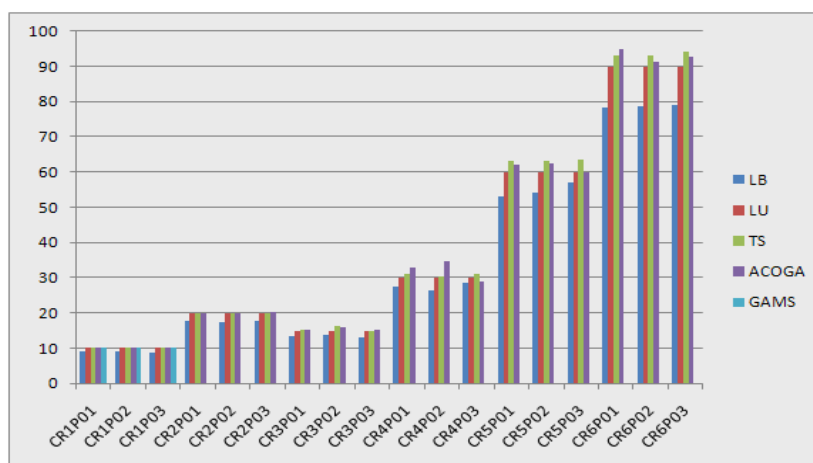


Рисунок 5 — Сравнение эффективности алгоритмов на задаче одновременного размещения кругов и прямоугольников

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках диссертационной работы разработаны модели и методы решения задач оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений. В ходе исследования и решения поставленной задачи получены следующие результаты:

1. Проведен системный анализ стадии предварительного раскроя промышленного материала на предприятиях металлообрабатывающей промышленности, существующих технологий раскройно-заготовительных работ, на его основе выявлены основные технологические ограничения. Сформулированы постановки задач раскроя листового и рулонного промышленных материалов с учетом технологических ограничений. Проведен анализ существующих методов и алгоритмов решения задач раскроя и выявлены их недостатки. Представлено обоснование необходимости разработки новых методов и алгоритмов, выработаны требования к их эффективности.

2. Разработаны математические модели задач раскроя промышленных материалов на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений, в отличие от известных работ позволяют учиты-

вать дефектные области, аппроксимируемые различными геометрическими фигурами.

3. Разработан метод размещения заготовок на рулонном и листовом промышленном материале с учетом технологических ограничений, в отличие от известных методов позволяет размещать заготовки различных геометрических форм и осуществлять обход дефектных областей материала аппроксимируемых различными геометрическими фигурами.

4. Разработана модификация алгоритма муравьиной колонии, основанная на процедурах генетического алгоритма. Он позволяет осуществлять обмен информацией о построенных картах раскроя для решения задач раскроя листового и рулонного материалов на заготовки различных геометрических форм при наличии технологических ограничений, характерных для реального производства.

5. Разработан рабочий вариант программного обеспечения на основе предложенных методов, алгоритмов и математического обеспечения оптимизации процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений. Анализ результатов численных экспериментов показал их эффективность. На его основе было выявлено, что разработанные методы и алгоритмы позволяют повысить эффективность использования материала на 6–8%. Для пяти примеров задачи размещения круглых и прямоугольных предметов в полубесконечную область получены новые улучшенные значения целевой функции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Конструктивный вероятностный алгоритм для размещения кругов и прямоугольников / Р. И. Файзрахманов // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2010. Т. 14, № 4 (39). С. 132–138.

2. Применение конструктивной метаэвристики «Муравьиная колония» к задаче гильотинного прямоугольного раскроя / А. Ф. Валеева, А. А. Петунин, Р. И. Файзрахманов // Вестник БГУ: науч. журн. Башкирск. гос. ун-та. 2007. Т. 12, № 3. С. 12–15.

В других изданиях

3. Применения алгоритма муравьиной колонии в задаче выбора пунктов измерения уровня загрязнения окружающей среды / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Научное и экологическое обеспечение современных технологий: мат. IV Респ. студ. науч.-практ. конф. Уфа: УГАЭС, 2007. С. 56–59.

4. Задача гильотинного прямоугольного раскроя на базе метаэвристики муравьиная колония / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Компьютерные науки и информационные технологии CSIT'2007: 9-я Междунар. конф. Уфа: УГАТУ, 2007. Т. 2. С. 234–236. (Статья на англ. яз.).

5. Применение метаэвристики муравьиной колонии к задаче двумерной упаковки / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Актуальные проблемы науки и техники: мат. 3-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2008. С. 98–104.

6. Применение метаэвристики муравьиная колония к задачам раскроя / Р. И. Файзрахманов // Компьютерные науки и информационные технологии CSIT'2008: 10-я Междунар. конф. Уфа: УГАТУ, 2008. Т. 3. С. 79–80 (Статья на англ. яз.).

7. Решение задачи прямоугольного раскроя на базе алгоритма муравьиной колонии / Р. И. Файзрахманов // Молодежь и наука на севере: матер. I Всерос. молодежн. науч. конф. Сыктывкар: Изд. Коми науч. центра УрО РАН, 2008. Т. I. С. 67–68.

8. Решение задачи упаковки прямоугольников и кругов на базе алгоритма муравьиной колонии / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Проблемы оптимизации и экономические приложения: матер. IV Всерос. конф. Омск: Полиграфический центр КАН, 2009. С. 115.

9. Применение метаэвристики «Муравьиная колония» к задаче упаковки / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Актуальные проблемы науки и техники: матер. 4-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 1. Информатика, управление и компьютерные науки. С. 456–459.

10. Применение конструктивного алгоритма муравьиной колонии к задаче упаковки кругов и прямоугольников в полосу / Р.И. Файзрахманов // Компьютерные науки и информационные технологии CSIT'2009: 11-я междунар. конф. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 2. С. 67-69. (Статья на англ. яз.).

11. Вероятностный алгоритм муравьиной колонии для задачи упаковки кругов и прямоугольников / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Применение информационных технологий и математических методов в экономике: матер. междунар. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 121–129. (Статья на английском языке).

12. Конструктивный вероятностный алгоритм муравьиной колонии для задачи упаковки кругов и прямоугольников / Р. И. Файзрахманов // Компьютерные науки и информационные технологии CSIT'2010: 12-я междунар. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 3. С. 90–92. (Статья на англ. яз.).

13. Решение задачи упаковки кругов и прямоугольников на базе алгоритма муравьиной колонии / А. Ф. Валеева, Р. И. Файзрахманов // Инновационные технологии – теория и практика: матер. междунар. конф. Германия, Дрезден, 2010. С. 41–45. (Статья на англ. яз.).

Диссертант



Р. И. Файзрахманов

ФАЙЗРАХМАНОВ Ришат Илшатович

ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССА РАСКРОЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ
ПРИ НАЛИЧИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 23.03.2011 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.- отт. 1,0. Уч.- изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 105

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