

Информационные ресурсы России. 2006. № 1. С. 27-29.

5. Искусственный интеллект. В 3 кн. Кн. 1. Системы общения и экспертные системы: справочник / под ред. Э.В. Попова. М.: Радио и связь, 1990. 464 с.

6. Марчук Ю.Н. Компьютерная лингвистика. М.: АСТ; Восток-Запад, 2007. 317 с.

7. Фомичев В.А. Формализация проектирования лингвистических процессоров. М.: Макс Пресс, 2005. 368 с.

8. Пруцков А.В., Цыбулько Д.М. Анализ статистики использования Интернет-приложения

обработки количественных числительных естественных языков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 130-134.

9. Mapping the Latino Population, By State, County and City. II. Ranking Latino Populations in the States. URL: <http://www.pewhispanic.org/2013/08/29/ii-ranking-latino-populations-in-the-states>. Дата обращения 24.07.2014.

10. Total Hispanic Population (most recent) by state. URL: http://www.statemaster.com/graph/peo_tot_his_pop-people-total-hispanic-population. Дата обращения 24.07.2014.

УДК 681.3.06,658.512.2.011.56

К.С. Кульга, П.В. Меншиков

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МНОГОСВЯЗНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ПОЛИГОНА С ГРАНИЧНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ С УЧЁТОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований в области новых моделей и методов для создания автоматизированной информационной системы, предназначенной для решения прямой и обратной задачи оптимального геометрического покрытия многосвязного ортогонального полигона (обечайка) ёмкостного оборудования изготавливаемого на предприятиях нефтегазового и химического машиностроения.

Ключевые слова: обечайка, оптимальное геометрическое покрытие, конструкторско-технологические ограничения, автоматизированная информационная система, 2D/3D – карта раскроя.

Введение. Для эффективной работы в условиях рыночной экономики предприятиям нефтегазового и химического машиностроения необходимо принимать меры по повышению рентабельности выпускаемых изделий. Одна из этих мер – снижение себестоимости изделий и издержек, сокращение сроков технологической подготовки производства.

Одной из самых ответственных и дорогостоящих деталей ёмкостного оборудования (например, теплообменные и колонные аппараты), изготавливаемых предприятиями нефтегазового и химического машиностроения, является обечайка [1-3]. Обечайка – открытый с торцов цилиндрический или конический барабан (без днищ), являющийся заготовкой для паровых котлов, баков, резервуаров и других металлоконструкций из листового сортамента. Фрагмент чертежа обечайки колонного аппарата показан на рисунке 1. Обечайки колонного оборудования имеют значительные габаритные размеры (например, 60600x3200x18 мм), могут включать несколько

секций с разными размерами поперечного сечения, в том числе из разного материала. Эта деталь сваривается из группы листового сортамента (лент). Обечайки изготавливаются из дорогостоящих нержавеющей или биметаллических заготовок, и доля стоимости обечайки в плановой и фактической себестоимости изделия может достигать 70 %, а трудовые затраты на выполнение сварочных операций (кольцевые и продольные сварные швы обечайки – корпусные сварные швы) – до 50 % от суммарных норм времени на изготовление всего изделия.

В большинстве случаев (кроме самых простых изделий) требуется решать задачу расчёта карты раскроя обечайки. В этом случае определяется конфигурация корпусных сварных швов обечайки, при которой выполняются все конструкторско-технологические ограничения, учитываются технологические возможности оборудования и обеспечивается минимизация норм расхода основных и вспомогательных материалов, а также норм времени на заготовительные,

сварочные и сборочные операции.

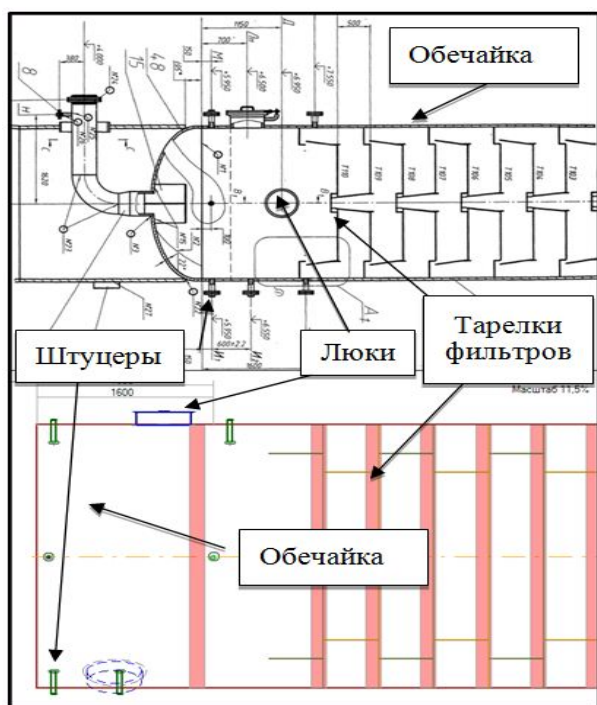


Рисунок 1 – Фрагменты чертежа и расчетной карты обечайки колонного аппарата

В дополнение к вышеуказанной задаче предприятия решают также следующие: предварительные расчёты плановой себестоимости изделий для принятия решения об участии в тендерах (на основе данных опросных листов); обоснование оптимальных размеров заготовки для изготовления изделия. Для решения этих задач требуется учёт деловых отходов заготовок на складах, соблюдение конструкторско-технологических требований, данные логистики поставок заготовок и себестоимости изделия.

Таким образом, для повышения рентабельности производства необходима автоматизация решения прямой и обратной (расчётное обоснование размера заготовок) задач оптимального раскроя обечайки. В общем случае эти задачи относятся к классу задач оптимального геометрического покрытия ортогонального многосвязного полигона (развертка обечайки) с препятствиями (технологические ограничения) набором прямоугольников заданных размеров (тип заготовки: лист или лента). Анализ публикаций [4-7] показал, что задача раскроя такой сложной детали, как обечайка, не может быть сведена к традиционной постановке задачи геометрического покрытия области с препятствиями по следующим причинам.

■ Препятствия в стандартной постановке рассматриваются только как зоны, исключенные из плана геометрического покрытия, в то время как при раскрое обечайки технологические огра-

ничения распространяются в основном на расположение корпусных сварных швов, т.е. границ покрываемых элементов, причем зоны этих ограничений тоже необходимо покрыть. Введём наименование такого вида препятствия – *границное препятствие*. Учёт граничных препятствий не рассматривался в опубликованных работах, посвященных решению задач геометрического покрытия [4-7].

■ Разнородность препятствий. Большая часть технологических ограничений относится к расположению только кольцевых или только продольных сварных швов, а некоторые ограничения дополнительно обладают условием «срабатывания». Например, запрещено размещение кольцевого сварного шва под укрепляющим кольцом люка (см. рисунок 1), если диаметр люка меньше 300 мм. В работах [4-7] все препятствия рассматриваются как однородные.

■ Существуют динамические препятствия, т.е. ограничения, создаваемые во время раскроя покрываемыми элементами. Например, не допускаются крестообразные сварные швы или параллельные сварные швы, расстояние между которыми меньше определенного значения Δ_{\min} .

■ Необходимо решение не только прямой, но и обратной задачи покрытия.

■ Необходимость раскроя многосекционных аппаратов, в которых каждая секция может иметь разное сечение (диаметр и толщину стенок) и материал. Наряду с этим, необходим учёт нераскраиваемых секций, имеющих разную геометрическую форму (конус, цилиндр).

■ Учёт типа и параметров заготовки, например, величины кропления листового сортамента, анизотропии материала заготовки.

■ В качестве критерия оптимальности выступает не единственный параметр (например, суммарная площадь использованных заготовок), а набор разнородных критериев, относящихся к технологичности изготовления и себестоимости изделия (расход основных и вспомогательных материалов, объемы деловых и технологических отходов, периметры корпусных швов, нормы времени и др.).

■ Необходим учёт групп ёмкостных аппаратов, имеющих различные технологические требования [1, 2], а также параметров точности технологического оборудования, ширины корпусных швов, особенностей конструкции изделия, в которую входят следующие детали и сборочные единицы (ДСЕ): штуцеры, люки, цапфы, опоры, укрепляющие кольца и др. Для каждой ДСЕ изделия существует свой набор конструкторско-технологических ограничений на расположения корпусных сварных швов.

▪ Влияние на результаты геометрического покрытия конструкции и расположения *внутренних* ДСЕ обечайки, например тарелок фильтров [2].

▪ Необходима программная взаимосвязь исходных и результирующих наборов данных предлагаемой автоматизированной информационной системы (АИС) с интегрированной АИС (ИАИС) предприятия (например, конструкторская и технологическая документация, результаты нормирования расхода материалов и труда, данные учёта остатков и деловых отходов заготовок). В опубликованных работах [4-7] не реализована программная интеграция наборов данных в едином информационном пространстве с ИАИС предприятия.

▪ Наряду с составлением двухмерного (2D) плана геометрического покрытия, необходима генерация трёхмерной (3D) твердотельной параметрической модели раскроенного аппарата (3D карта раскроя) для обеспечения правильности сборки и изготовления изделия.

Цель работы – разработка моделей и методов создания АИС оптимального геометрического покрытия многосвязного ортогонального полигона (развертки обечайки ёмкостного оборудования), включая программное взаимодействие на уровне наборов данных и управления в едином информационном пространстве (ЕИП) предприятия с ИАИС *Stalker PLM v7.x* [9].

Теоретическая часть. Результаты исследований, проведенные в работе [5], показали, что в общем случае задачи покрытия относятся к *NP*-трудным, т.е. алгоритм точного решения таких задач за полиномиальное время не найден. Практически на всех наборах исходных данных методы поиска точного решения потребуют слишком много времени. Таким образом, для решения практических задач раскроя листового сортамента (ленты) для изготовления обечайки целесообразно использовать эвристические методы поиска оптимального решения.

Создание программного обеспечения (ПО) АИС оптимального геометрического покрытия обечайки основывалось на методологии, разработанной в монографии [9]. Данная методология предусматривает поэтапное решение задачи создания АИС на основе реинжиниринга существующих бизнес-процессов (БП), разработку объектно-ориентированной функциональной, а затем информационно-математической модели с последующим созданием на их основе ПО базовых информационных технологий АИС.

Реинжиниринг БП и создание функциональной модели (ФМ) АИС. Анализ существующих

АИС оптимального раскроя листового сортамента и результатов их применения на предприятиях нефтегазового и химического машиностроения выявил отсутствие комплексного применения критериев для решения задачи геометрического покрытия многосвязного ортогонального полигона (обечайки). В свою очередь, решение этой задачи на основе опыта квалифицированных инженеров предприятия требует значительных затрат времени (от трёх до семи дней по данным фотографии дня), при этом не гарантируется оптимальность полученного решения и отсутствие ошибок. На основе результатов реинжиниринга БП заготовительного производства ёмкостного оборудования разработана ФМ, отличающаяся тем, что формализовано описывает взаимодействие БП технической подготовки производства обечайки, а также интегрирует этапы функционального моделирования и создания ПО АИС [3].

Объектно-ориентированная ФМ разработана с применением методологии *Rational Unified Process (RUP)* и платформенно-независимого объектно-ориентированного языка *UML (Unified Modeling Language)*. На рисунке 2 приведён пример одной из диаграмм ФМ АИС: реализация БП преобразования технологических ограничений, связанных с тарелками фильтров, в граничные препятствия на расчётной схеме карты раскроя обечайки колонного аппарата.

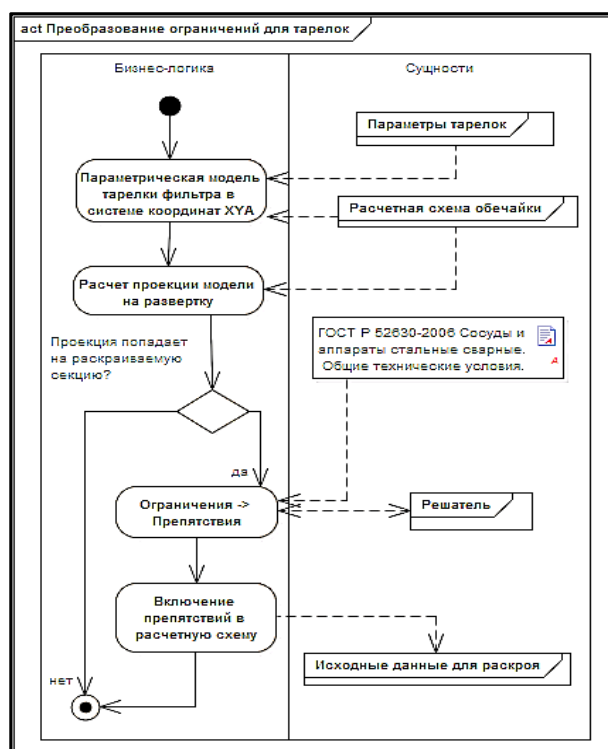


Рисунок 2 – Функциональная модель БП преобразования технологических ограничений для ДСЕ «Тарелка фильтра»

Единая информационно-математическая модель (ИММ) АИС. ИММ АИС отличается реализацией модифицированного метода ветвей и границ для решения прямой и обратной задач двумерного геометрического покрытия ортогонального многосвязного полигона с граничными препятствиями на основе определения конструкторско-технологических ограничений для размещения геометрических объектов, применением обобщенного критерия оптимальности, а также новым методом автоматического формирования параметрических 3D геометрических моделей карт раскроя обечайки с применением API (Application Programming Interface)-функций CAD (Computer Aided Designer)-систем [3].

Процессор АИС Stalker ROB. В качестве исходного набора данных для решения задачи оптимального геометрического покрытия ортогонального многосвязного полигона используется параметрическая 2D геометрическая модель карты обечайки. Для дополнительного контроля исходных данных реализована функция автоматического формирования 3D геометрической модели карты обечайки. Расположение ДСЕ задается визуально, а их параметры указываются с помощью интерактивных форм. Для уменьшения времени ввода реализованы функции привязки объектов к базовым поверхностям других объектов, ассоциативная связь активных полей формы с объектами сборочного чертежа колонного аппарата (см. рисунок 1) и операция копирования набора данных тарелок одинакового типа.

Группы ограничений относятся к расположению корпусных сварных швов, ортогональных по отношению друг к другу [1]. Это позволяет преобразовать любые ограничения независимо от их формы в прямоугольные боксы, стороны которых параллельны направлениям кольцевых и продольных сварных швов обечайки. У каждого бокса имеется условие «срабатывания» ограничения, например, ограничение только для кольцевых сварных швов, ограничение для сварных швов с катетом больше 20 мм или ограничение для Т-образных швов. На рисунке 1 показаны соответствующие фрагменты 2D геометрической модели карты обечайки и чертежа (на главном виде чертежа не показывается угловое положение ДСЕ). Представим обечайку колонного аппарата в виде развертки (рисунок 3).

В общем случае развертка будет представлять собой многосвязный ортогональный полигон. Каждой секции корпуса будет соответствовать прямоугольник с длиной L_s и шириной W_s , а также номенклатурным обозначением материала секции M_s , $s = \overline{1, n}$, где n – количество секций корпуса. Введем прямоугольную систему координат: оси Ox и Oy совпадают соответ-

ственно с нижней и боковой сторонами развертки первой секции, остальные секции также располагаются ортогонально по отношению к этой системе координат. Координаты нижнего и левого угла секции задаются параметрами X_s и Y_s ($X_1 = 0$, $Y_1 = 0$). Для каждой ДСЕ и геометрических объектов карты обечайки производится преобразование ограничений в прямоугольники, именуемые запретными зонами.

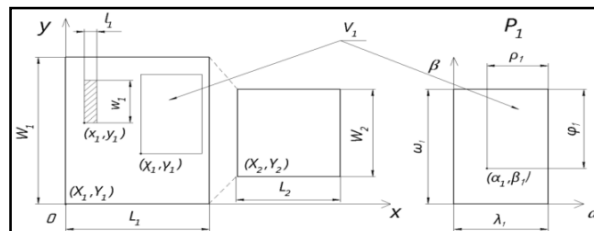


Рисунок 3 – Расчётная схема развертки обечайки

Классифицировано три типа запретных зон:

- ограничения на расположение кольцевых сварных швов Z_R ;
- ограничения на расположение продольных сварных швов Z_L ;
- ограничения на расположение Т-образных сварных швов Z_T , характеризующихся следующими параметрами:

$$(x_v, y_v), (l_v, w_v), v = \overline{1, \mu},$$

где x_v, y_v – координаты нижнего и левого угла ограничительной зоны, w_v – её ширина, l_v – её длина, μ – количество ограничительных зон этого типа.

При преобразовании рассчитывается точная проекция контуров ДСЕ на цилиндрическую поверхность обечайки, в том числе для случая с нерадиальным расположением ДСЕ.

К исходным данным относится информация о заготовке (группе заготовок), в том числе о деловых отходах, оставшихся от предыдущих сессий раскроя (ИАИС Stalker PLM v7.x. [9]).

Заготовки представляют собой множество прямоугольников:

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}, P_u = \langle (\omega_u, \lambda_u), \mu_u \rangle,$$

где (ω_u, λ_u) – ширина и длина листа с учётом величины кропления заготовки, μ_u – обозначение материала заготовки.

Процессор АИС Stalker ROB. В задаче требуется найти множество прямоугольных боксов V :

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_q\},$$

$$V_j = \langle (x_j, y_j), (r_j, \varphi_j), u_j, (\alpha_i, \beta_i) \rangle,$$

где (x_j, y_j) – координаты нижнего левого угла бокса на развертке корпуса, (r_j, φ_j) – его длина и ширина, u_j – индекс заготовки P_u , частью которой является этот бокс, (α_i, β_i) – координаты нижнего левого угла бокса на заготовке, q – мощность множества.

Множество V должно удовлетворять следующим условиям.

1. Ребра боксов параллельны ребрам области:

$$(r_x^i = \rho_i) \cap (r_y^i = \varphi_i), i = \overline{1, q},$$

где r_x^i, r_y^i – проекции прямоугольника V_i на оси координат Ox и Oy .

Неперекрывание боксов с гранями области заготовки: $\forall i = \overline{1, q}$

$$(\alpha_i \geq 0) \cap (\beta_i \geq 0) \cap (\alpha_i + \rho_i \leq \lambda_{ui}) \cap (\beta_i + \varphi_i \leq \omega_{ui}).$$

2. Взаимное неперекрывание боксов на заготовке: $\forall i \neq j; i, j = \overline{1, q}$

$$\left((\alpha_i \geq \alpha_j + \rho_j) \cup (\alpha_j \geq \alpha_i + \rho_i) \right) \cap \left((\beta_i \geq \beta_j + \varphi_j) \cup (\beta_j \geq \beta_i + \varphi_i) \right).$$

3. Неperекрывание боксов с гранями ции: $\forall i = \overline{1, q}$,

$$(\chi_i \geq X_j) \cap (\gamma_i \geq Y_j) \cap (\chi_i + \rho_i \leq X_j + L_j) \cap (\gamma_i + \varphi_i \leq Y_j + W_j),$$

где j – индекс секции, на которой располагается i -й бокс.

4. Взаимное неперекрывание боксов на развртке: $\forall i \neq j; i, j = \overline{1, q}$

$$\left((\chi_i \geq \chi_j + \varphi_j) \cup (\chi_j \geq \chi_i + \varphi_i) \right) \cap \left((\gamma_i \geq \gamma_j + \rho_j) \cup (\gamma_j \geq \gamma_i + \rho_i) \right).$$

5. Неperекрывание вертикальных граней боксов с ограничительными зонами на расположение кольцевых швов: $\forall i = \overline{1, q}, \forall j = \overline{1, \mu_R}$

Левая грань:

$$\left(\left(\chi_i - \frac{\tau_R}{2} - \delta \geq x_j + l_j \right) \cup \left(x_j \geq \chi_i + \frac{\tau_R}{2} + \delta \right) \right) \cap A$$

Правая грань:

$$\left(\left(\chi_i + \varphi_i - \frac{\tau_R}{2} - \delta \geq x_j + l_j \right) \cup \left(x_j \geq \chi_i + \varphi_i + \frac{\tau_R}{2} + \delta \right) \right) \cap A,$$

где $A = \left((\gamma_i \geq y_j + w_j) \cup (y_j \geq \gamma_i + \rho_i) \right)$, τ_R – катет кольцевых сварных швов, δ – минимальное допустимое расстояние между двумя швами.

6. Неperекрывание горизонтальных граней боксов с ограничительными зонами на расположение продольных сварных швов: $\forall i = \overline{1, q}, \forall j = \overline{1, \mu_L}$

Нижняя грань:

$$\left(\left(\gamma_i - \frac{\tau_L}{2} - \delta \geq y_j + w_j \right) \cup \left(y_j \geq \gamma_i + \frac{\tau_L}{2} + \delta \right) \right) \cap A$$

Верхняя грань:

$$\left(\left(\gamma_i + \rho_i - \frac{\tau_L}{2} - \delta \geq y_j + w_j \right) \cup \left(y_j \geq \gamma_i + \rho_i + \frac{\tau_L}{2} + \delta \right) \right) \cap A,$$

где $A = \left((\chi_i \geq x_j + l_j) \cup (x_j \geq \chi_i + \varphi_i) \right)$, τ_L – катет продольных сварных швов.

7. Непопадание углов боксов на ограничительные зоны на расположение Т-образных сварных швов: $\forall i = \overline{1, q}, \forall j = \overline{1, \mu_T}, \forall k = \overline{1, 4}$

$$\left((u_i^k \geq x_j + l_j) \cup (x_j \geq u_i^k) \right) \cap \left((v_i^k \geq y_j + w_j) \cup (y_j \geq v_i^k) \right),$$

где u_i^k, v_i^k – координаты по осям Ox и i -го угла бокса V_i .

8. Отсутствие крестообразных сварных швов, параллельные швы должны находиться на расстоянии не менее σ : $\forall i \neq j; i, j = \overline{1, q}, \forall k, m = \overline{1, 4}$

$$\left((u_i^1 - u_j^3) \geq \sigma \right) \cap \left((v_i^1 - v_j^3) \geq \sigma \right) \cap \left((u_i^2 - u_j^4) \geq \sigma \right) \cap \left((v_i^2 - v_j^4) \geq \sigma \right),$$

где u_i^k, v_i^k – координаты по осям Ox и i -го угла бокса V_i ,

u_j^m, v_j^m – координаты по осям Ox и i -го угла бокса V_j .

9. Обозначение заготовки и материала секции должно совпадать:

$$\forall i = \overline{1, q}, \mu_{ui} = M_j,$$

где j – индекс секции, на которой располагается i -й бокс.

10. Прямоугольные боксы должны покрывать все секции:

$$\sum_{i=1}^q \varphi_i \cdot \rho_i = \sum_{j=1}^n L_j \cdot W_j.$$

Разработанный эвристический алгоритм, основанный на предлагаемом методе, отличается тем, что на каждом шаге отбирается N лучших вариантов по локальному критерию оптимальности, и для каждого из них определяются все возможные варианты следующего шага. Производится отсечение заведомо неудачных вариантов, а также одинаковых вариантов раскроя, полученных разными путями. Оптимальность варианта оценивается значением целевой функции, которая является сверткой частных критериев оптимальности на основе метода относительного отклонения от идеальной точки [8]:

$$F_T = \sqrt{\sum \lambda_i \cdot R_i^2}, F_T \rightarrow \min,$$

$$R_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{F_i}{F_{iMAX}} \right), F_i \rightarrow \max \\ \left(1 - \frac{F_{iMIN}}{F_i} \right), F_i \rightarrow \min \\ 0, (F_i \rightarrow \min) \cap (F_i = 0), \end{cases}$$

где R_i – относительное отклонение i -го критерия от оптимального значения;

F_i – значение i -й целевой функции для данного варианта;

F_{iMIN}, F_{iMAX} – оптимальное значение i -го критерия целевой функции;

λ_i – весовой коэффициент для i -го критерия.

Использование безразмерных отношений типа $\frac{F_i}{F_{iMAX}}$ позволяет суммировать частные критерии разной природы в одном выражении.

К критериям оптимальности относятся следующие показатели.

1. Количество использованных в раскрое листов:

$$F_1 = |\{P_i | \exists V_j, u_j = i\}|, F_1 \rightarrow \min.$$

Для глобального критерия F_{1MIN} вычисляется, как количество листов максимальной площади среди доступных заготовок, полностью покрывающих развертку обечайки:

$$F_{1MIN} = \sum_{i=1}^n (L_i \cdot W_i) / S_{iMAX},$$

где L_i, W_i – длина и ширина i -й секции, S_{iMAX} – максимальное значение площади заготовки, подходящей по её свойствам (толщина и материал) для покрытия i -й секции:

$$S_{iMAX} = \max_{u=1}^m (\omega_u \cdot \lambda_u), (\mu_u = M_i).$$

Для локального критерия величина F_{1MIN} равна минимальному количеству использованных листов на данной итерации (но не менее единицы).

2. Количество использованных целых листов:

$$F_2 = |\{P_i | \exists V_j, (p_j = \lambda_i) \cap (\omega_j = \varphi_i)\}|, F_2 \rightarrow \max.$$

Значение F_{2MAX} равно общему количеству использованных в раскрое листов (F_1).

3. Суммарная длина кольцевых сварных швов (швы, проходящие по границам секции, не учитываются):

$$F_3 = \sum_{i=1}^q \varphi_i - \sum_{j=1}^n L_j, F_3 \rightarrow \min.$$

Для глобального критерия величина F_{3MIN} вычисляется как минимально возможная длина кольцевых сварных швов для заданного набора заготовок:

$$F_{3MIN} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{L_i}{\lambda_{iMAX}},$$

где λ_{iMAX} – максимальная ширина листа, подходящего по обозначению материала заготовки i -й секции.

Для локального критерия величина F_{3MIN} равна минимально достигнутому значению F_3 среди вариантов на данной итерации.

4. Суммарная длина продольных сварных швов:

$$F_4 = \sum_{i=1}^q \rho_i, F_4 \rightarrow \min.$$

Для глобального критерия величина F_{4MIN} равна сумме длин всех секций обечайки, так как

технологический процесс изготовления каждой секции обечайки включает операцию сварки как минимум одного продольного шва. Для локального критерия величина F_{4MIN} равна минимально достигнутому значению F_4 среди вариантов раскроя на данной итерации.

5. Суммарная площадь деловых и технологических отходов, например, величина последней площади рассчитывается по формуле:

$$F_5 = \sum_{i=1}^t S_{it}, F_5 \rightarrow \min$$

S_{it} – площадь i -го технологического отхода, t – общее количество технологических отходов.

Использование нескольких критериев оптимизации позволяет управлять решением задачи раскроя с помощью коэффициентов λ_i . Например, минимизировать количество используемого листового сортамента. Значения λ_i по умолчанию установлены методом экспертных оценок.

Для пользователя АИС *Stalker ROB* предлагаются следующие варианты настроек коэффициентов λ_i : сбалансированный; приоритет снижению технологической сложности; приоритет снижению нормы расхода материалов.

Постпроцессор АИС Stalker ROB. Основными функциями постпроцессора являются автоматическое построение геометрической модели 2D/3D – карты раскроя обечайки (рисунок 4), а также и формирование печатных форм отчетов с наборами данных для технологических операций резки и сварки секций.

Для апробации результатов научных исследований были проведены экспериментальные расчёты оптимального геометрического покрытия обечайки девяти видов ёмкостного оборудования (аппаратов) перед их запуском в производство. Результаты работы АИС *Stalker ROB* для аппарата №9 показаны на рисунке 4.

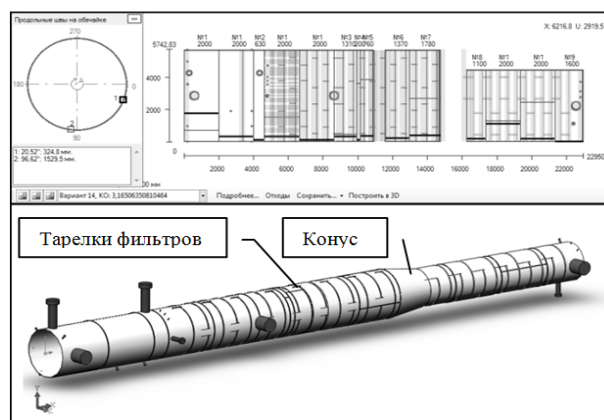
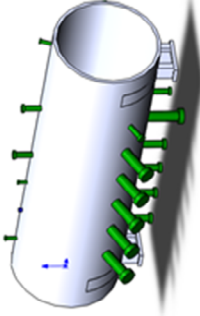
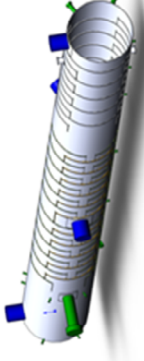
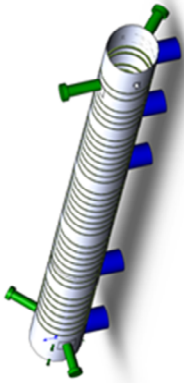



Рисунок 4 – 2D/3D – карты раскроя обечайки колонного аппарата

Исходные данные группы аппаратов для экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для экспериментальных исследований оптимального геометрического покрытия обечайки

№	Трёхмерная твердотельная геометрическая модель ёмкостного оборудования (аппарата)	Габаритные размеры аппарата, мм	Материал, типоразмер листового сортамента заготовок	Тип аппарата	Количество ДСЕ	Общее количество секций/нераскраиваемое количество секций	Наличие / тип тарелок фильтров
2		4840x1500x45	Биметалл 09Г2С и 08Х18Н10Т, 6000x1500x45 мм	Теплообменный (4256)	28	1/0	Нет
4		29500x2400x20	09Г2С, 8000x2000x20 мм	Колонна (2610)	82	1/0	Есть/Типы 1-3
5		19600x1400x8	09Г2С, 6000x1500x8 мм	Колонна (7986)	53	3/1	Есть/Тип 3
9		14700x1800x14, 8250x1400x12	09Г2С, 8000x2000x14 мм и 6000x1500x12 мм	Колонна (7935)	49	5/2	Есть/Типы 1 и 3

Результаты экспериментов для группы аппаратов, проведённые квалифицированным инженером как вручную, так и с помощью АИС *Stalker ROB*, оценивались по двум критериям:

1) время, затраченное на выполнение операций оптимального раскроя обечайки, включая подготовку расчетной схемы, непосредственно расчёт, формирование карт раскроя и отчётов;

2) качественные показатели раскроя, формализованные в виде обобщенного критерия оптимальности (значения коэффициентов λ_i были приняты по умолчанию).

Для сравнительной оценки результатов решения задачи оптимального раскроя обечайки были разработаны:

– коэффициент сложности расчетной схемы, учитывающий количество ДСЕ и секций обечайки с разным сечением;

– коэффициент сложности раскроя, учитывающий процент площади обечайки, покрытый запрещенными зонами.

Результаты экспериментальных исследований аппаратов приведены в таблицах 2-4.

Таблица 2 – Результаты экспериментов

№	Сложность расчетной схемы	Время раскроя, мин	
		Ручной	АИС <i>Stalker ROB</i>
1	0,67	20	15
2	1,20	120	25
3	1,00	90	20
4	2,73	240	50
5	3,53	300	55
6	1,80	190	45
7	1,07	120	25
8	0,87	100	30
9	4,9	320	50

Таблица 3 – Результаты экспериментов

№	Сложность раскроя	Целевая функция F_T	
		Ручной	АИС <i>Stalker ROB</i>
1	0,56	0,530	0,530
2	0,81	0,502	0,415
3	0,58	0,451	0,392
4	0,34	0,342	0,278
5	0,54	0,418	0,356
6	0,51	0,405	0,366
7	0,69	0,510	0,475
8	0,46	0,441	0,331
9	1,1	0,531	0,381

Таблица 4 – Средние значения критериев

Способ раскроя обечайки аппарата	Время раскроя, мин	Целевая функция F_T
Ручной	166,7	0,46
АИС <i>Stalker ROB</i>	35	0,39
Изменение значения критериев	476,19%	17,2%

Закключение. На основе предложенных моделей и методов разработано и экспериментально апробировано ПО АИС *Stalker ROB*, реализующее прямую и обратную задачи оптимального геометрического покрытия ортогонального многосвязного полигона с граничными препятствиями на основе определения конструкторско-технологических ограничений на стадиях предварительных расчётов, технической подготовки, а также информационную интеграцию в ЕИП предприятия с ИАИС *Stalker PLM v7.x* [9].

Библиографический список

- ГОСТ Р 52630-2006. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия – М.: Стандартинформ. – 2007. – 68 с.
- ОСТ 26-805-73.Тарелки сетчатые колонных аппаратов. Тип и параметры. Конструкция и размеры. – Введен 1-4-1976. –М.: Министерство химического и нефтяного машиностроения. –1976. – 23 с.
- Кульга К.С., Меньшиков П.В. Прямая и обратная задачи двумерного раскроя многосвязного ортогонального полигона (обечайка) на основе определения конструкторско-технологических ограничений для размещения геометрических объектов и обобщенного критерия оптимальности // CAD/CAM/CAE Observer. #7(83). –2013. – С.70-75.
- Мухачева Э.А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Применение АСУ. – М.: Машиностроение. –1984. – 176 с.
- Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования / Еремеев А.В., Заозерская Л.А., Колоколов А.А. // Дискретный анализ и исследование операций. – Сер. 2. – 2000. – Т. 7. – № 2. – С. 22-46.
- Хасанова Э.И. Проектирование размещения геометрических объектов на многосвязном ортогональном полигоне [Текст]: дис. ...канд. тех. наук: 05.13.12: Уфа. – 2010. – 188 с.
- Телицкий С.В. Оптимизация многокритериального геометрического покрытия полигона на основе условных оценок с учетом технологических ограничений [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01: Уфа. – 2013. – 179 с.
- Гольдштейн А.Л. Метод отклонений для многокритериальных задач – Пермь: Изд. ПГТУ. – 2010. – 27 с.
- Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством/ Кульга К.С., Кривошеев И.А. – М.: Машиностроение. – 2011. – 377 с.