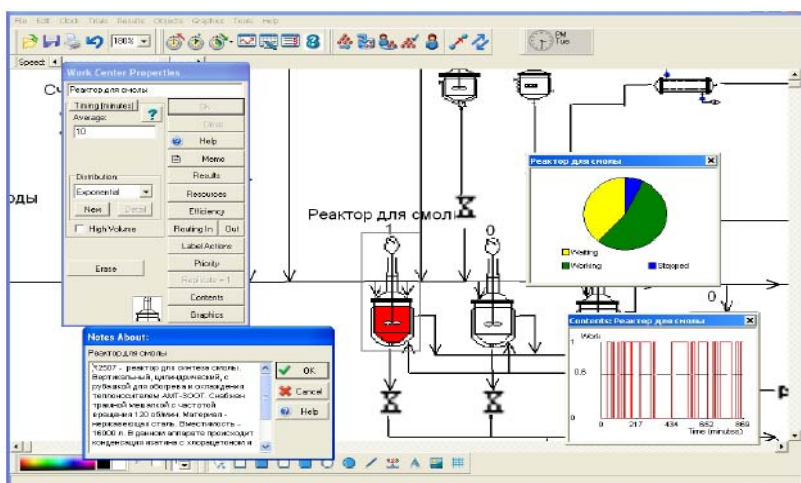


# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

В 4 частях

Часть 1



Тамбов

◆ Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» ◆

2016

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

**В 4 частях**

**Часть 1**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
Российской Федерации по университетскому политехническому  
образованию в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по направлению  
подготовки 15.04.01 «Машиностроение»*



---

Тамбов

◆ Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» ◆

2016

УДК 54.058(075)  
ББК Н76я73  
И73

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий в образовании ГОУ «Институт развития дополнительного профессионального образования»  
*Т. В. Истомина*

Доктор технических наук, профессор, директор Тамбовского областного центра новых информационных технологий  
*В. Е. Подольский*

Кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор ОАО «Тамбовский завод «Комсомолец»  
*М. П. Мариковская*

Авторский коллектив:

*В. А. Немтинов, М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. Я. Егоров, А. Б. Борисенко, Т. А. Фролова, Ю. В. Немтинова, А. Д. Обухов*

И73 **Интеллектуальные системы проектирования и управления техническими объектами** : учеб. пособие : в 4 ч. Ч. 1 / В. А. Немтинов, М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин и др. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – 180 с. – 100 экз.

ISBN 978-5-8265-1542-6

Учебное пособие охватывает широкий спектр задач математического и программного обеспечения различных подсистем автоматизированного проектирования и управления техническими системами. В частности описаны: математические методы в технических расчётах и программные среды, используемые при автоматизированном проектировании технологического оборудования; теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования; технология исследования химико-технологических объектов и создания виртуальных тренажёрных комплексов и др. Наличие разделов на английском языке позволяет использовать его при двуязычной подготовке.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 15.04.01 «Машиностроение», а также аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления техническими объектами.

УДК 54.058(075)  
ББК Н76я73

ISBN 978-5-8265-1542-6 (ч. 1)  
ISBN 978-5-8265-1543-3

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2016

## ВВЕДЕНИЕ

---

Современный уровень проектирования и управления техническими системами предполагает использование информационных технологий на всех этапах жизненного цикла.

Основными этапами жизненного цикла технических систем (ТС) являются проектирование, монтаж и эксплуатация, последующая реконструкция или утилизация системы. В процессе проектирования осуществляется поиск функциональных решений, представляемых и документируемых в виде функциональной структуры, которая затем может быть материализована с помощью определённых предписаний. Эти предписания служат для изготовления компонентов системы и составляются таким образом, чтобы все функциональные требования были выполнены. В этом смысле процесс проектирования предполагает получение не только всех необходимых чертежей изделия, но и разработку технологических процессов его изготовления. Целью проектирования является разработка и формирование функций технической системы путём переработки технологической и организационной информации.

Во всех отраслях промышленности установлены следующие стадии разработки конструкторской документации: техническое задание (ТЗ), техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация. Часто стадии разработки технического проекта и рабочей документации объединяют в одну. Все перечисленные стадии подготовки технической документации являются результатом выполнения определённых этапов проектирования.

Функционирование ТС требует наличия автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и системы оперативного управления производством (СОУ). Данные системы ориентированы на применение современной вычислительной техники и разрабатываются, как правило, на базе известных SCADA и ERP-систем. Они предназначены для решения задач оперативного контроля состояний технологического процесса и оборудования ТС; управления производственным процессом; формирования плана выпуска продукции и проведения планово-предупредительных ремонтов; решения организационных вопросов и др.

Современный уровень развития информационных и коммуникационных технологий на производстве позволяет активно использовать передовые системы автоматизации технологического процесса и управления выпуском продукции и предприятием в целом. Создание единой информационной системы промышленного предприятия позволяет осуществить комплексное решение задач управления выпус-

ком продукции, опираясь на взаимодействие интегрированных автоматизированных информационных систем.

Первая часть учебного пособия включает:

- общие сведения о системах автоматизированного проектирования технологического оборудования (ТО) и геоинформационных системах проектирования и эксплуатации технических объектов;
- представление структуры ТО и его типовых элементов в информационных системах;
- структуру, функции и приёмы работы с автоматизированными информационными системами (АИС) компоновок ТО, технологических расчётов теплообменного оборудования, автоматизированного составления месячных графиков ремонтов ТО;
- приёмы использования системы моделирования динамических процессов для оперативного управления промышленным производством;
- методики применения средств мультимедиа при создании АИС обучения персонала предприятий химического и машиностроительного профиля.

Авторы надеются, что данное учебное пособие будет полезно для:

- студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки специалистов 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов»;
- учащихся магистратуры по направлениям: 15.04.01 «Машиностроение», осваивающих программу «Информационное обеспечение машиностроительного производства»; 27.04.01 «Системный анализ и управление», осваивающих программу «Системный анализ проектно-технологических решений»;
- аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления ТО.

# Глава 1

## ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЗНАНИЙ В РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЕ ДАННЫХ

---

Графы широко используются в задачах структурного и параметрического синтеза технических систем. В работах [1, 2] подробно описано матричное и аналитическое представление простых, мульти-, ультра- и гиперграфов и операции над ними (добавление, удаление вершин и рёбер, стягивание и др.). В работе [3] приведён подробный анализ использования различных графов для моделирования структуры технических объектов. Результаты, описанные в указанных работах, независимы от программного обеспечения, которое может быть использовано для их практического применения в автоматизированных информационных системах (АИС).

Программная среда реализации АИС в свою очередь определяет предпочтения на формальное представление графовых структур. Так в [4] описывается представление структуры изделий в информационных системах управления машиностроительными предприятиями, построенных на основе реляционных баз данных, применение ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем представлено в [5]. Применение полихроматических множеств и графов для решения задач проектирования технологических процессов подробно описано в [6].

Существует множество задач, для решения которых необходимо одни объекты, обладающие определёнными свойствами, соотнести с другими объектами, которые обладают своими свойствами. К таким задачам относятся задачи классификации (когда объекты необходимо объединить по каким-либо признакам) [7, 8] или задачи размещения объектов (аппаратов в цехах химических предприятий [9, 10], зданий при разработке генплана города или деревьев на дачном участке) и др.

В современных условиях одним из направлений развития АИС является их интеллектуализация. В настоящее время активно развивается интеллектуализация АИС на основе онтологий представления знаний [11, 12]. Одним из способов построения онтологии является использование атрибутов (свойств) объектов предметной области. Например, в [13] описывается построение онтологии на основе отношений между атрибутами объектов предметной области, в [14] атрибуты используются для построения базы данных стандартных элементов технических объектов, способной подбирать необходимый элемент в зависимости от условий его эксплуатации, в [15] разработана модель онтологии структурных ограничений, которая позволяет описывать ограничения в виде логических формул над элементарными предикатами.

В представленных выше работах основное внимание при решении подобных задач уделяется общим вопросам представления знаний и не описывается, как представляются знания и как они обрабатываются в зависимости от запроса пользователя. Поясним сказанное на простом примере.

Создаётся АИС, которая предназначена для поддержки принятия решения при размещении объектов в пространстве, например, зданий в городе. Это размещение подчиняется определённым ограничениям, которые содержатся в нормативных документах: ГОСТ, СНиП (сборники нормативов и правил). Ограничения имеют вид «Если А, то В». Например, расстояние между домами в строительстве при наличии окон в противоположно расположенных зданиях не может быть меньше 15 м. Естественно, что это и подобные правила (ограничения) вводятся один раз, но в АИС они должны храниться и обрабатываться так, чтобы можно было отвечать на следующие вопросы (запросы):

- можно ли заданный объект располагать в заданном месте;
- в каких местах можно располагать заданный объект;
- какие объекты можно располагать в заданном месте и др.

Далее в качестве примера будем использовать АИС, предназначенную для размещения технологического оборудования в производственных помещениях предприятия, так как эта предметная область более известна авторам [9, 10].

Цель пособия – обзор способов хранения и обработки отношений (правил) между атрибутами информационных объектов в интеллектуальных АИС, которые предназначены для поддержки принятия решений на основе онтологии предметной области (или онтологии приложений). Поддержка принятия решений осуществляется в результате ответа АИС на запросы пользователя.

В качестве программно-независимого способа представления информационных объектов выбран N-ориентированный гиперграф. Отношения между атрибутами информационных объектов представляются продукционными правилами вида «Если А, то В». В качестве базового программного обеспечения использована реляционная база данных. Продукции (правила) представлены теоретико-множественным описанием и описанием на языке структурированных запросов Transact SQL (релиз SQL фирмы Microsoft).

## 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ N-ОРИЕНТИРОВАННОГО ГИПЕРГРАФА

Обозначим N-ориентированный гиперграф [5]  $G(X, U)$ , где  $X = \{x_i\}$ ,  $i = \overline{1, I}$  – множество вершин гиперграфа,  $x_i$  –  $i$ -я вершина;  $U = \{u_m(X1_m)\}$ ,  $m = \overline{1, M}$  – множество рёбер гиперграфа;  $u_m(X1_m)$  –

$m$ -е ребро гиперграфа,  $X1_m$  – множество вершин инцидентных  $m$ -му ребру  $X1_m \subseteq X$ ,  $X1_m = \{x_k\}$ ,  $\forall k \in K_m$ ,  $K_m \subseteq \overline{1, I}$ .

В задаче размещения оборудования  $X$  – это множество размещаемого оборудования, например  $X = \{\text{реактор P1, ёмкость O5, сушилка C3}\}$ , где P1, O5, C3 – номер оборудования на технологической схеме.  $U$  – множество помещений предприятия, например при размещении оборудования в четырёхэтажном цехе  $U = \{\text{этаж 1, этаж 2, этаж 3, этаж 4}\}$ . Соответственно, если на первом этаже находятся реактор P1 и ёмкость O5,  $X1_1 = \{\text{реактор P1, ёмкость O5}\}$ .

Если учитывать номер вершины в ребре, т.е. считать наборы вершин  $\{\text{реактор P1, ёмкость O5}\}$  и  $\{\text{ёмкость O5, реактор P1}\}$  разными, то получим ориентированный гиперграф. Если у каждой вершины таких номеров два, то граф считаем дважды ориентированным. Если каждая вершина имеет  $N$  номеров, то граф  $N$  – ориентированный.

В общем случае номер вершины в ребре не обязательно должен иметь значение номера по порядку и может отражать определённое свойство вершины, которое принимает конкретное значение при включении вершины в ребро. При этом предполагается, что все вершины в рёбрах имеют одинаковый набор свойств. Например, при решении задачи размещения объектов в пространстве элементы имеют одинаковые наборы свойств, а именно, координаты элементов.

Требование одинакового набора свойств элементов существенно сужает область прикладных задач. Каждый реальный элемент обладает собственным набором свойств, который отличается от наборов свойств других элементов.

Обозначим  $S = \{s_j\}$ ,  $j = \overline{1, J}$  – множество всех возможных свойств вершин и рёбер,  $SX_i = \{s_{r1}\} \subset S$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $r1 \in J1_i \subset \overline{1, J}$  – множество свойств  $i$ -й вершины,  $SU_m = \{s_{r2}\} \subset S$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $r2 \in J2_m \subset \overline{1, J}$  – множество свойств  $m$ -го ребра. Кроме того, каждому ребру  $u_m (X1_m)$  также ставится в соответствие свой набор свойств  $SU_m$ ,  $m = \overline{1, M}$ .

Каждое свойство может иметь значения из определённого множества, например масса технического объекта – это числовые значения больше нуля, а материал изготовления – это одно из значений, хранящихся в списке материалов. Обозначим  $Z_j = \{z_{j,t}\}$ ,  $t = \overline{1, T_j}$  – множество возможных значений свойства  $S_j$ ,  $z[s_j, x_i] \in Z_j$  – значение свойства  $s_j$  вершины  $x_i$ ,  $z[s_j, u_m] \in Z_j$  – значение свойства  $s_j$  ребра  $u_m$ .



## 1.2. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ АТРИБУТАМИ ВЕРШИН И РЁБЕР

Введём  $\Theta$  – логический оператор, один из элементов множества  $\Omega = \{=, \neq, <, >, \leq, \geq\}$ ,  $\Theta \in \Omega$ . Запись  $z[s_{j1}, x_{i1}] = z_{j1,t1}$  обозначает, что значение свойства  $s_{j1}$  для вершины  $x_{i1}$  равно  $z_{j1,t1}$  (или принимает значение  $z_{j1,t1}$ ). Запись  $z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta z_{j1,t1}$  означает, что значение свойства  $s_{j1}$  для вершины  $x_{i1}$  находится в определённом отношении со значением  $z_{j1,t1}$ , причём это отношение ограничено элементами множества  $\Omega = \{=, \neq, <, >, \leq, \geq\}$ . Будем называть  $z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta z_{j1,t1}$  элементарным ограничением на свойства вершины. Соответственно  $z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2,t2}$  – элементарное ограничение на свойство ребра.

Например, для элементарного ограничения «масса реактора P1 меньше 50 000 кг»  $s_j$  соответствует свойству «масса»,  $x_{i1}$  – вершине «реактор P1»,  $\Theta$  – знаку «<»,  $z_{j1,t1}$  – «50 000 кг».

В терминах введённых элементарных ограничений сформируем основные правила, определяющие принадлежность вершины ребру.

**Принадлежность вершины ребру определяется соотношением их атрибутов.** Пример правила «Если среда в аппарате взрывоопасна и токсична, то помещение, в котором стоит аппарат, должно быть оборудовано принудительной вентиляцией и иметь эвакуационный выход». Здесь на вершину и ребро установлено по два элементарных ограничения, соединённых логически «И».

Введём функцию конъюнкции элементарных ограничений вершины (1.1) и ребра (1.2).

$$F1() = \bigcap_{r1=1}^{R1} (z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1,t1}), \quad j1 \in J1 \subset J, \quad i1 \in I, \quad r1 = \overline{1, R1}, \quad z_{j1,t1} \in Z_{j1}, \\ t1 \in \overline{1, T_{j1}}, \quad (1.1)$$

где  $J1$  – множество свойств соединяемых ограничений;  $R1$  – количество соединяемых ограничений, для приведённого выше правила  $R1 = 2$ .

По аналогии с (1.1) введём конъюнктивную функцию элементарных ограничений ребра

$$F2() = \bigcap_{r2=1}^{R2} (z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2,t2}), \quad j2 \in J2 \subset J, \quad m1 \in M, \quad r2 = \overline{1, R2}, \\ z_{j2,t2} \in Z_{j2}, \quad (1.2) \\ t2 \in \overline{1, T_{j2}},$$

где  $J_2$  – множество свойств соединяемых ограничений;  $R_2$  – количество соединяемых ограничений, для приведённого выше правила  $R_2 = 2$ .

С учётом (1.1) и (1.2) правило, задающее принадлежность вершины  $x_{i1}$  ребру  $u_m$ , можно записать в виде

$$F1() \wedge (x_{i1} \in X1_m) \Rightarrow F2(). \quad (1.3)$$

**Принадлежность вершины ребру определяется принадлежностью ребру другой или других вершин с определёнными атрибутами.** Например, в задачах классификации, если определённый объект (вершина гиперграфа) принадлежит определённому классу (ребро гиперграфа), то и другой объект с определёнными свойствами должен принадлежать этому классу. При размещении станков в цехе машиностроительного предприятия их группируют по типу (участок токарных станков, участок фрезерных и т.д.), поэтому если мы решили, что токарный станок T1 будет стоять в помещении П1, то и другие токарные станки должны стоять в этом помещении.

Предположим, что ребру  $u_{m3}(X1_{m3})$  принадлежит вершина  $x_{i3} \in X1_{m3}$ ,  $m3 \in \overline{1, M}$ . По аналогии с (1.1) запишем функцию конъюнкции элементарных ограничений вершины  $x_{i3}$

$$F3() = \bigcap_{r3=1}^{R3} (z[s_{j3}, x_{i3}] \ominus_{r3} z_{j3, t3}), \quad j3 \in J3 \subset J, \quad i3 \in I, \quad r3 = \overline{1, R3},$$

$$z_{j3, t3} \in Z_{j3}, \quad t3 \in \overline{1, T_{j3}}, \quad (1.4)$$

где  $J_3$  – множество свойств соединяемых ограничений;  $R_3$  – количество соединяемых ограничений.

С учётом выражений (1.1) и (1.4) правило, определяющее принадлежность вершины  $x_{i1}$  ребру  $u_m$ , можно записать в виде

$$F3() \wedge (x_{x3} \in X1_{m1}) \wedge F1() \Rightarrow x_{i1} \in X_{m1}. \quad (1.5)$$

**Принадлежность вершины ребру определяется свойствами ребра и принадлежностью ему другой или других вершин с определёнными атрибутами.** Предположим, что ребру  $u_{m3}(X1_{m3})$  принадлежит вершина  $x_{i3} \in X1_{m3}$ ,  $m3 \in \overline{1, M}$ . С учётом выражений (1.1), (1.2) и (1.4) правило, определяющее принадлежность вершины  $x_{i1}$  ребру  $u_m$ , можно записать в виде

$$F3() \wedge (x_{x3} \in X1_{m1}) \wedge F1() \wedge F2() \Rightarrow x_{i1} \in X_{m1}. \quad (1.6)$$

### 1.3. ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ВНЕШНИХ ЗАПРОСОВ

Под внешним запросом будем понимать запрос (вопрос) к системе пользователя в процессе принятия решения.

Для каждого из рассмотренных выше правил (1.3), (1.5), (1.6) существуют следующие варианты внешних запросов.

Вариант 1. Исходные данные: вершина (свойства вершины) и ребро (свойства ребра). Результат – может ли вершина принадлежать ребру. Например, может ли заданный строительный объект быть размещён на заданной строительной площадке.

Вариант 2. Исходные данные: вершина (свойства вершины) и все рёбра (свойства всех ребер). Результат – список рёбер, которым может принадлежать вершина. Например, список площадок, на которых может быть размещён заданный строительный объект.

Вариант 3. Исходные данные: ребро (свойства ребра) и все вершины (свойства всех вершин). Результат – все вершины, которые могут принадлежать ребру. Например, список всех строительных объектов, которые могут быть размещены на заданной строительной площадке.

Вариант 4. Исходные данные: ребро (свойства ребра). Результат – свойства вершин, которые должны принадлежать ребру. Например, список свойств строительных объектов, которые можно разместить на заданной строительной площадке.

Вариант 5. Исходные данные: вершина (свойства вершины). Результат – свойства ребер, которым может принадлежать вершина. Например, список свойств строительных площадок, на которых может быть размещён заданный строительный объект.

### 1.4. СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ N-ОРИЕНТИРОВАННОГО ГИПЕРГРАФА И ОГРАНИЧЕНИЙ

Имена таблиц соответствуют именам введённых ранее множеств  $X, U, G, S, SX, SU, Z$ . Текст в именах таблиц после подчёркивания следует рассматривать как комментарий, например, действительное имя таблицы  $G$  (Граф) будет  $G$ . Поля  $Z\_Значение\_свойства$  и  $ZN\_знак$  в приведённых ниже примерах обозначены, как  $Z$  и  $ZN$ .

Поле  $S$ . Тип позволяет различать два типа свойств:

– Тип 1. Свойства, которые могут иметь бесконечное множество значений. Они вводятся вручную, например масса объекта. Таблица  $Z$

для них будет содержать ограничение на допустимое значение свойства, например, значение массы объекта всегда больше нуля;

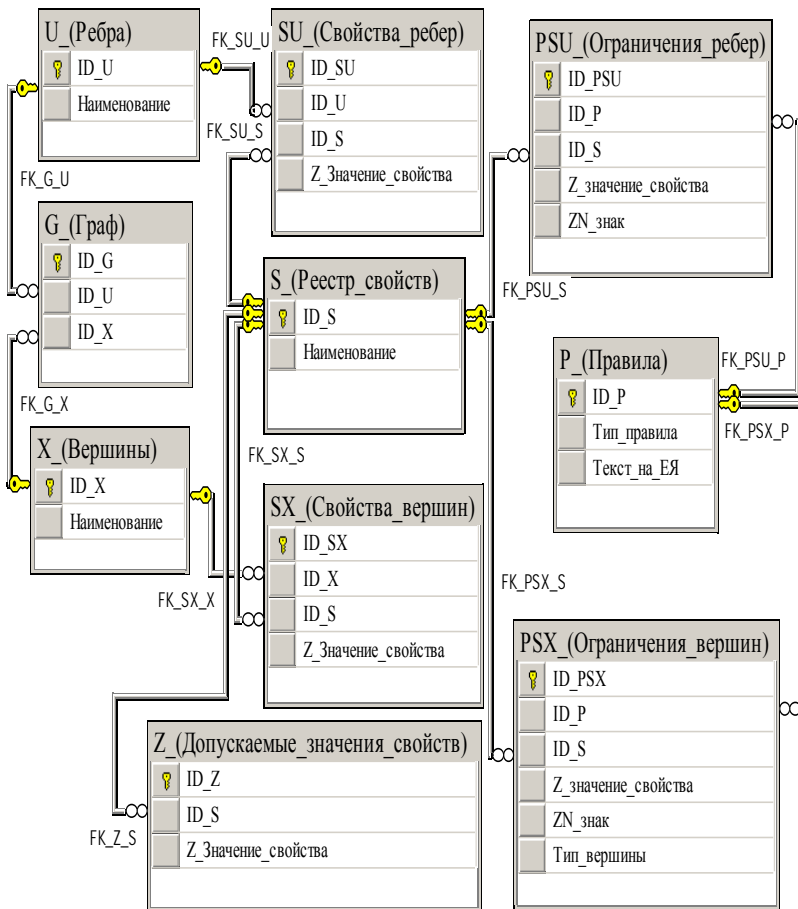
– Тип 2. Свойства, значения которых ограничены конечным списком, например, свойство материал изготовления объекта. Этот список будет содержаться в таблице Z.

Таблица Z позволяет поддерживать доменную целостность базы. Ссылочная целостность поддерживается первичными ключами по полям X.ID\_X, U.ID\_U, S.ID\_S, Z.ID\_Z, SU.ID\_SU, SX.ID\_SX и внешними ключами, наименование которых на рис. 1.1 имеет префикс FK. Кроме того, для сохранения доменной целостности базы необходимо создать уникальные индексы по полям:

- SX.ID\_X, SX.ID\_S и SU.ID\_U, SU.ID\_S, конкретное свойство вершины или ребра присутствует в таблице SX или SU один раз;
- G.ID\_U, конкретное ребро в графе может быть один раз;
- G.ID\_X, если вершина может принадлежать только одному ребру.

Представленная на рис. 1.1 структура базы данных упрощена. Строго говоря, таблицы SX и SU следует дополнить полем ID\_Z для хранения первичного ключа свойств типа 2 (поле Z.ID\_Z). Это усложнит приведенное ниже изложение, но никак не повлияет на суть предлагаемого подхода. Так же с целью упрощения изложения в этой структуре не представлен механизм определения типа значения свойства (число, строка и др.). Опущена и другая несущественная для данной работы информация. Например, объекты дополнительно классифицируются по типам, каждому типу соответствует определённый набор свойств, который добавляется автоматически для каждого вводимого в таблицу X объекта, что существенно упрощает интерфейс и сокращает время на подготовку к решению задачи.

Правила (1.3), (1.5), (1.6) хранятся в таблицах P, PSX, PSU. Поле P.Тип\_правила принимает одно из значений 1, 2, 3, что соответствует выражениям (1.3), (1.5), (1.6) соответственно. Поле P.Текст\_на\_ЕЯ содержит описание правила на естественном языке, которое используется для обоснования полученного результата запроса. Каждая строка таблиц PSX и PSU содержит элементарные ограничения на свойство вершины  $z[s_{j1}, x_{i1}] \ominus z_{j1, i1}$  или свойство ребра  $z[s_{j2}, u_{m1}] \ominus z_{j2, i2}$ . Значение поля PSX. Тип\_вершины равно нулю для правил типа 1 (выражение (1.3)). Для правил типа 2 и 3 (выражения (1.5) и (1.6)) поле PSX. Тип\_вершины равно 1 для вершины, принадлежащей ребру (вершина  $x_{i3}$  в выражениях (1.5) и (1.6)), и 0 для вершины  $x_{i1}$ .



**Рис. 1.1. Структура базы данных для хранения N-ориентированного гиперграфа и ограничений**

Последовательность выполнения запроса в формате диаграммы активности (Activity Diagramm UML) представлена на рис. 1.2. После определения типа запроса осуществляется последовательное чтение и выполнение всех правил. Так как все правила хранятся в виде элементарных ограничений, конкретный вид правила формируется динамически в зависимости от вида запроса и типа правила. Выше представлены пять видов запросов и три типа правил, следовательно, для обработки внешних запросов надо сформировать пятнадцать внутренних запросов.

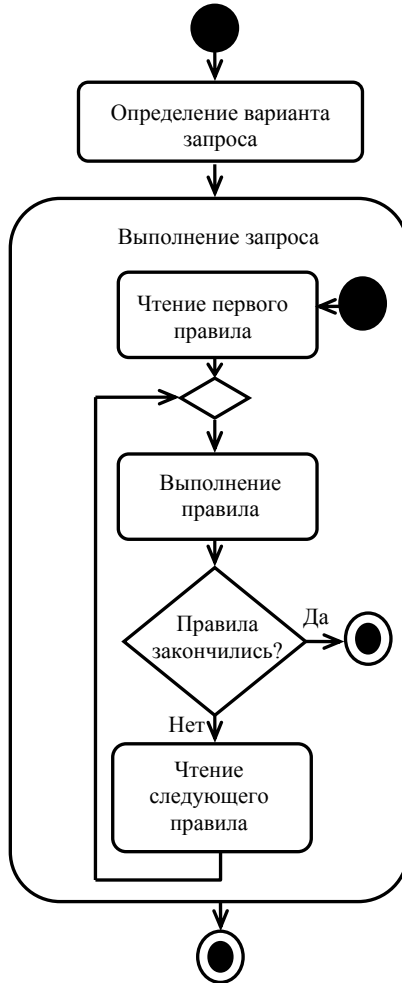


Рис. 1.2. Последовательность выполнения запроса

## 1.5. СИНТАКСИС ВНУТРЕННИХ ЗАПРОСОВ В SQL-НОТАЦИИ

Обозначим  $@ID\_X$ ,  $@ID\_S1$ ,  $@Z1$  (соответствуют  $x_{i1}, s_{j1}, z_{j1, l1}$ ) значения первичного ключа вершины, первичного ключа свойства и значение свойства соответственно. Тогда проверка элементарного ограничения на свойство вершины, например, когда значение свойства вершины равно  $z_{j1, l1}$ ,  $z[s_{j1}, x_{i1}] = z_{j1, l1}$ , в нотации SQL запишется как

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=@ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_S1 and SX.Z=@Z1 ).

Проверка выполнения конъюнкции элементарных ограничений (1.1) для вершины @ID\_X, когда  $\Theta$  соответствует знаку =, запишется как

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=@ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_S1 and SX.Z=@Z1) and (1.7)

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=@ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_S2 and SX.Z=@Z2) and

.....

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=@ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_SR1 and SX.Z=@ZR1),

где @ID\_S1, @ID\_S2, ..., @ID\_SR1 – первичные ключи свойств ограничения; @Z1, @Z2, ...@ZR1 – значения ограничений.

По аналогии с (1.7) выражения (1.8) осуществляют проверку ограничения (1.1) для всех вершин (@ID\_X не задано):

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=X.ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_S1 and SX.Z=@Z1) and (1.8)

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=X.ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_S2 and SX.Z=@Z2) and

.....

exists (select \* from SX where SX.ID\_X=X.ID\_X and SX.ID\_S=@ID\_SR1 and SX.Z=@ZR1).

Проверка выполнения конъюнкции элементарных ограничений (1.2) для ребра @ID\_U, когда  $\Theta$  соответствует знаку =, запишется как

exists (select \* from SU where SU.ID\_U=@ID\_U and SU.ID\_S=@ID\_S1 and SU.Z=@Z1) and (1.9)

exists (select \* from SU where SX.ID\_U=@ID\_U and SU.ID\_S=@ID\_S2 and SU.Z=@Z2) and

.....

exists (select \* from SU where SU.ID\_X=@ID\_U and SU.ID\_S=@ID\_SR1 and SU.Z=@ZR2).

По аналогии с (1.9) выражения (1.10) осуществляют проверку ограничения (1.2) для всех ребер (@ID\_U не задано):

exists (select \* from SU where SU.ID\_U=U.ID\_U and SU.ID\_S=@ID\_S1 and SU.Z=@Z1) and (1.10)

exists (select \* from SU where SX.ID\_U=U.ID\_U and SU.ID\_S=@ID\_S2 and SU.Z=@Z2) and

exists (select \* from SU where SU.ID\_X=U.ID\_U and SU.ID\_S=@ID\_SR1 and SU.Z=@ZR2).

Запишем процедуру-функцию, которая для заданного правила @ID\_P и типа вершины по таблице PSX составляет выражения (1.7) или (1.8). @ID\_P – значение первичного ключа таблицы P.

```
create function OX(@ID_P int, @ID_X nchar(6), @Тип_вершины int)
returns nvarchar(max)
as
begin
declare @result nvarchar(max)
set @result = ''
select @result = @result + (case when @result <> '' then ' and ' else '' end) +
N' exists (select * from SX ' + N' where SX.ID_X=' + @ID_X + ' and
SX.ID_S=
' + cast(ID_S as nvarchar(10)) + N' and SX.Z ' + ZN + Z + N')'
from PSX where ID_P = @ID_P and
Тип_вершины=@Тип_вершины
return @result
end
```

Обозначим OU(@ID\_P, @ID\_U) процедуру-функцию, которая для заданного правила @ID\_P по таблице PSU составляет выражения (1.9) и (1.10).

**Первый вариант внешнего запроса.** Может ли вершина @ID\_X принадлежать ребру @ID\_U.

С учётом функций OX и OU запишем обработку всех типов правил (выражения (1.3, 1.6, 1.7))

Здесь и далее выражения OX(@ID\_P, '@ID\_X',0), OX(@ID\_P, '@ID\_X',0), OU(@ID\_P, '@ID\_U'), OU (@ID\_P, 'U.ID\_U') следует рассматривать как тектовую строку, которая возвращается процедурой-функцией OX или OU и вставляется в тело запроса. Сцепление строк для упрощения опущено.

Введём переменную @ret. Если вершина может принадлежать ребру, @ret=1, иначе @ret=0.

Тип правила 1.

```
set @ret=1 if OX(@ID_P, '@ID_X',0) and not OU (@ID_P, '@ID_U')
set @ret=0
```



Тип правила 2.

set @ret=1 if OX(@ID\_P, '@ID\_X',0) and not exists (select ID\_X from G,X where

G.ID\_U=@ID\_U and X.ID\_X=G.ID\_X and OX(@ID\_P, 'X.ID\_X' , 1))  
set @ret=0

Тип правила 3.

set @ret=1 if OX(@ID\_P, '@ID\_X',0) and not exists (select ID\_X from G,X where

ID\_U=@ID\_U and X.ID\_X=G.ID\_X and OX(@ID\_P, 'X.ID\_X' , 1))  
or not OU (@ID\_P,  
'@ID\_U') set @ret=0

**Второй вариант внешнего запроса.** Все рёбра, которым может принадлежать заданная вершина @ID\_X.

Тип правила 1.

select ID\_U from U where OU(@ID\_P, 'U.ID\_U') and OX(@ID\_P, '@ID\_X', 0)

Тип правила 2.

select ID\_U from U where OX(@ID\_P, '@ID\_X',0) and exists (select X.ID\_X from G,X where

G.ID\_U=U.ID\_U and X.ID\_X=G.ID\_X and OX(@ID\_P, 'X.ID\_X' , 1))

Тип правила 3.

select ID\_U from U where OU(@ID\_P, 'U.ID\_U') and OX(@ID\_P, '@ID\_X', 0) and

exists (select X.ID\_X from G,X where G.ID\_U=U.ID\_U and X.ID\_X=G.ID\_X and

OX(@ID\_P, 'X.ID\_X' , 1))

**Третий вариант внешнего запроса.** Все вершины, которые должны принадлежать заданному ребру @ID\_U.

Тип правила 1.

select ID\_X from X where OU(@ID\_P, '@ID\_U') and OX(@ID\_P, 'X.ID\_X', 0)

Тип правила 2.

select ID\_X from X where OX(@ID\_P, 'X.ID\_X', 0) and exists (select ID\_X from G,X where

G.ID\_U=@ID\_U and X.ID\_X=G.ID\_X and OX(@ID\_P, 'X.ID\_X' , 1)

Тип правила 3.

select ID\_X from X where OU(@ID\_P, '@ID\_U') and OX(@ID\_P, 'X.ID\_X', 0) and

exists (select ID\_X from G,X where G.ID\_U=@ID\_U and X.ID\_X=G.ID\_X and

OX(@ID\_P, 'X.ID\_X' , 1)

**Четвёртый вариант внешнего запроса.** Свойства вершин, которые должны принадлежать заданному ребру @ID\_U.

Тип правила 1.

```
select ID_S, ZN_знак, Z_значение_свойства from PSX  
where ID_P=@ID_P and OU(@ID_P, '@ID_U')
```

Тип правила 2.

```
select ID_S, ZN_знак, Z_значение_свойства from PSX where  
ID_P=@ID_P and exists (select  
G.ID_X from G,X where G.ID_U=@ID_U and X.ID_X=G.ID_X and  
OX(@ID_P, 'X.ID_X', 1))
```

Тип правила 3.

```
select ID_S, ZN_знак, Z_значение_свойства from PSX where  
ID_P=@ID_P and exists (select  
G.ID_X from G,X where G.ID_U=@ID_U and X.ID_X=G.ID_X and  
OX(@ID_P, 'X.ID_X', 1)  
and OU(@ID_P, '@ID_U'))
```

**Пятый вариант внешнего запроса.** Свойства рёбер, которым может принадлежать заданная вершина @ID\_X.

Тип правила 1.

```
select ID_S, ZN_знак, Z_значение_свойства from PSU where  
ID_P=@ID_P and OX(@ID_P, '@ID_X', 0)
```

Тип правила 2.

Согласно выражению (1.5) свойства ребер не влияют на принадлежность вершины ребру.

Тип правила 3.

Аналогично для правил типа 1.

## 1.6. ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАПРОСА

Представленные выше SQL-выражения для каждого варианта внешнего запроса являются основой для создания хранимой процедуры выполнения запроса. Ниже представлена хранимая процедура выполнения запроса второго вида, а именно, выбрать все рёбра, которым может принадлежать заданная вершина.

```
create table #T (ID_U int) – таблица результата запроса  
create procedure PP_2 @ID_X1 int – заданная вершина  
as  
declare @str nvarchar(max), – строка внутреннего запроса  
@ID_P int, – текущее правило  
@Тип_правила int, – тип текущего правила  
@param nvarchar(max) – параметры внутреннего запроса  
set @param=N'@ID_X int'  
declare cursor_P cursor for select ID_P, Тип_правила from P;  
open cursor_P
```

```

fetch next from cursor_P into @ID_P, @Тип_правила -- чтение
первого правила
while @@fetch_status=0 -- выполнение пока не закончатся
правила в таблице P
begin
if @Тип_правила=1
set @str= N'insert #Т (ID_U) select ID_U from U where ' +
dbo.OU(@ID_P, 'U.ID_U)' + ' and ' + dbo.OX(@ID_P,
'@ID_X', 0)
if @Тип_правила=2
.....
if @Тип_правила=3
.....
-- Выполнение правила. Выбор всех рёбер, удовлетворяющих
текущему правилу.
execute sp_executesql @str, @param, @ID_X=@ID_X1
Fetch Next from cursor_P into @ID_P, @Тип_правила – чтение
следующего правила
end
close cursor_P; deallocate cursor_P;
select distinct * from #Т – возврат результата

```

Подобные процедуры составляются для каждого варианта запроса.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений должны быть интегрированы в имеющиеся на предприятии АИС. Реляционные базы данных в настоящее время являются самым используемым программным средством при создании автоматизированных систем управления и проектирования. Предложенный в работе подход к созданию интеллектуальных АИС на основе реляционных баз данных позволяет без дополнительных затрат на приобретение базового программного обеспечения создавать интеллектуальные АИС поддержки принятия решений с использованием онтологии предметной области.

### Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение N-ориентированного гиперграфа.
2. Какие возможны варианты соотношений между атрибутами вершин и рёбер?
3. Какие возможные варианты внешних запросов?
4. Перечислите таблицы базы данных для представления N-ориентированного гиперграфа и ограничений.
5. Опишите последовательность выполнения внешнего запроса.
6. Опишите синтаксис одного внутреннего запроса формате SQL.
7. Опишите синтаксис программы выполнения запроса.

## Список литературы к главе 1

1. **Овчинников, В. А.** Математические модели объектов задач структурного синтеза [Электронный ресурс] / В. А. Овчинников // Электронный журнал: Наука и образование. – 2009. – № 3. – Режим доступа : <http://technomag.edu.ru/doc/115712.html>. – Загл. с экрана.
2. **Овчинников, В. А.** Операции над ультра- и гиперграфами для реализации процедур анализа и синтеза структур сложных систем [Электронный ресурс] / В. А. Овчинников // Электронный журнал: Наука и образование. – 2009. – № 10. – Режим доступа : <http://technomag.edu.ru/doc/132769.html>. – Загл. с экрана.
3. **Иванова, Г. С.** Способы представления структурных моделей [Электронный ресурс] / Г. С. Иванова // Электронный журнал: Наука и образование. – 2007. – № 1. – Режим доступа : <http://technomag.edu.ru/doc/62742.html>. – Загл. с экрана.
4. **Мокрозуб, В. Г.** Представление структуры изделий в информационных системах управления машиностроительными предприятиями [Текст] / В. Г. Мокрозуб // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 10. – С. 30 – 34.
5. **Применение N-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем [Текст]** / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115 – 122.
6. **Павлов, В. В.** Структурное моделирование в CALS-технологиях [Текст] / В. В. Павлов ; отв. ред. Ю. М. Соломенцев ; Ин-т конструкторско-технологической информатики РАН. – М. : Наука, 2006. – 307 с.
7. **Гаврилова, Т. А.** Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы [Текст] : учеб. пособие / Т. А. Гаврилова, Д. И. Муромцев ; Высшая школа менеджмента СПбГУ. – 2-е изд. – СПб. : Изд-во «Высшая школа менеджмента» ; Изд. дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2008. – 488 с.
8. **Норенков, И. П.** Интеллектуальные технологии на базе онтологий [Текст] / И. П. Норенков // Информационные технологии. – 2010. – № 1. – С. 17 – 23.
9. **Пронина, В. А.** Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области [Текст] / В. А. Пронина, Л. Б. Шипилина // Проблемы управления. – 2009. – № 1. – С. 27 – 32.
10. **Мокрозуб, В. Г.** Таксономия в базе данных стандартных элементов технических объектов [Текст] / В. Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – 2009. – № 11. – С. 18 – 22.
11. **Зуенко, А. А.** Контекстный подход в системах сопровождения открытых концептуальных моделей предметной области [Текст] / А. А. Зуенко, А. Я. Фридман // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 3. – С. 41 – 51.

## Глава 2

# ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРАВИЛ КОМПОНОВКИ

---

При компоновке промышленных объектов должна соблюдаться система ограничений, обусловленная стандартами проектирования, а также опытом проектировщика. Эти ограничения, кроме того, с одной стороны, усложняют её решение, а с другой, уменьшают количество допустимых вариантов. Это позволяет лицу, принимающему решение, выбрать наиболее оптимальный с точки зрения критерия вариант решения, сравнив несколько решений с лучшим значением критерия.

Целью данной главы является разработка метода формирования и контроля ограничений при компоновке промышленных объектов, заданных в виде правил. При этом необходимо обеспечение динамичной модификации приложений пользователем, а не программистом, за счёт задания ограничений в естественном виде (на естественном языке).

Постановка задачи компоновки промышленных объектов имеет следующий вид.

Необходимо определить пространственное расположение технологического оборудования на заданном промышленном объекте, при котором стоимость полученного решения будет минимальной, с учётом набора физических, технологических и других ограничений, накладываемых на получаемое решение особенностями производств, отраслевыми стандартами, требованиями охраны труда и другими требованиями к решению.

Различные постановки задачи компоновки приведены в работах [1 – 5]. Данные постановки задачи учитывают различные критерии и наборы ограничений, зависящие от специфики предметной области и конкретных решаемых задач. Недостатком существующих моделей является ограниченный набор правил компоновки, а также ограниченный набор свойств объектов и помещений. Подсистема формирования и контроля ограничений приведена в работе [6]. Таким образом, актуальной является задача разработки модели, позволяющей гибко задавать набор правил компоновки, а также метода задания этих правил и их проверки.

Приведём математическую постановку задачи.

Пусть задано некоторое пространство  $R$  в прямоугольной системе координат  $(x, y, z)$ , в котором требуется разместить  $N_0$  объектов.

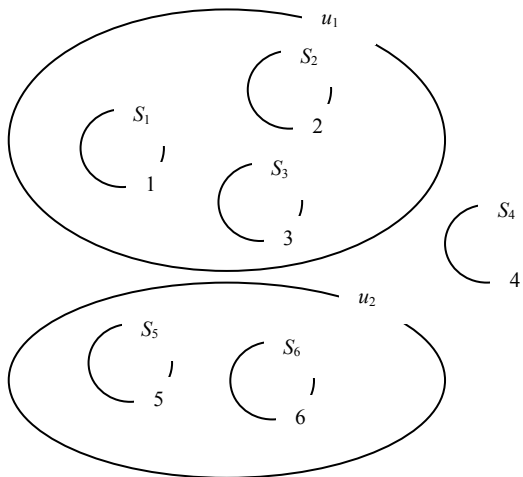
Примем допущения:

- 1) объекты имеют одинаковую природу (набор свойств);
- 2) объекты аппроксимируются прямоугольными параллелепипедами.

Обозначим N-ориентированный гиперграф [7]  $G(X, U, U^L)$ , где  $X = \{x_i | i = \overline{1, N_0}\}$  – множество вершин гиперграфа,  $x_i$  –  $i$ -я вершина;  $U = \{u_m(X'_m) | m = \overline{1, M}\}$  – множество гиперрёбер гиперграфа,  $u_m(X'_m)$  –  $m$ -е ребро гиперграфа,  $X'_m$  – множество вершин инцидентных  $m$ -му ребру  $X'_m \subseteq X$ ,  $X'_m = \{x_k^{\overline{V}}\}$ ,  $\forall k \in K_m$ ,  $K_m \subseteq \overline{1, I}$ ,  $\overline{V}$  – номер вершины в ребре ориентированного гиперграфа представляет собой вектор,  $\overline{V} = \{v_n | n = \overline{1, N}\}$ . В общем случае номер вершины в ребре отражает определённое свойство вершины, которое принимает конкретное значение.  $U^L = \{< x_{p_1}; x_{p_2} >_l | l = \overline{1, N_l}\}$  – множество рёбер, задающее систему связей между объектами;  $N_l$  – количество связей;  $< x_{p_1}; x_{p_2} >_l$  – пара вершин, инцидентных  $l$ -му ребру. Матрица смежности подграфа имеет вид

$$L = \{l_{p_1, p_2}\}, \text{ где } l_{p_1, p_2} = \begin{cases} 0, & \text{если вершины } p_1, p_2 \text{ не связаны;} \\ k, & \text{если связь } p_1 \rightarrow p_2 \text{ имеет кратность } k. \end{cases}$$

Графически N-ориентированный гиперграф представлен на рис. 2.1.



$S_i = \{s_1, \dots, s_n\}$  – множество свойств вершины

Рис. 2.1. N-ориентированный гиперграф

Обозначим  $S = \{s_j \mid j = \overline{1, J}\}$  – множество всех возможных свойств вершин и рёбер,  $SX_i = \{s_j \mid j \in J1_i \subset \overline{1, J}\} \subset S$  – множество свойств  $i$ -й вершины,  $SU_m = \{s_j \mid j \in J2_m \subset \overline{1, J}\} \subset S$  – множество свойств  $m$ -го ребра. Таким образом, для каждой вершины множество её номеров  $\overline{V} = \{v_n \mid n = \overline{1, N}\}$  заменяется множеством свойств  $SX_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ . Кроме того, каждому ребру  $u_m(X1_m)$  также ставится в соответствие свой набор свойств  $SU_m$ ,  $m = \overline{1, M}$ .

Физический смысл гиперграфа заключается в следующем. Вершины гиперграфа представляют собой объекты (аппараты), размещённые в помещениях. Помещения заданы гиперрёбрами  $N$ -ориентированного гиперграфа. Множества свойств вершин и рёбер отражают физические, технико-технологические свойства аппаратов.

Обозначим  $z[s_j, x_i] \in Z_j$  – значение свойства  $s_j$  вершины  $x_i$ . Значение свойства  $s_j$  ребра  $u_m$  обозначим  $z[s_j, u_m] \in Z_j$ . Введём понятие элементарного ограничения вершины или ребра. Пусть  $\Theta$  – логический оператор, один из элементов множества  $\Omega = \{=, \neq, <, >, \leq, \geq\}$ ,  $\Theta \in \Omega$ . Тогда запись  $z[s_j, x_i] \Theta z_{j,t}$ , означающая, что значение свойства  $s_j$  для вершины  $x_i$  находится в определённом отношении со значением  $z_{j,t}$ , является элементарным ограничением. По аналогии элементарное ограничение ребра имеет вид  $z[s_j, u_m] \Theta z_{j,t}$ .

В соответствии с введёнными обозначениями определим основные свойства вершины:

1. Геометрические размеры:
  - а) длина  $a = z[s_a, x_i]$ ;
  - б) ширина  $b = z[s_b, x_i]$ ;
  - в) высота  $h = z[s_h, x_i]$ .
2. Параметры местоположения:
  - а) вдоль оси  $x$   $x = z[s_x, x_i]$ ;
  - б) вдоль оси  $y$   $y = z[s_y, x_i]$ ;
  - в) вдоль оси  $z$   $z = z[s_z, x_i]$ ;
  - г) угол поворота  $\alpha = z[s_\alpha, x_i]$ .

Определим основные свойства ребра в соответствии с введёнными обозначениями:

1. Геометрические размеры:

а) длина  $a = z[s_a, u_m]$ ;

б) ширина  $b = z[s_b, u_m]$ ;

в) высота  $h = z[s_h, u_m]$ .

Ограничения заданы в виде правил «Если А, то В». Для решения задачи необходимы методы контроля ограничений. Основной задачей здесь является обеспечение возможности контроля ограничений в различных алгоритмах компоновки.

Рассмотрим правила вида «Если А, то В». В данной записи события А и В являются в общем случае комбинациями элементарных ограничений на значения свойств вершин и рёбер гиперграфа  $G(X,U)$ . Введём понятия ограничения на значение свойства  $s_j$  вершины  $x_i$  (например, ограничение на массу аппарата) и ограничения на значение свойства  $s_j$  ребра  $u_m$  (например, ограничение на номер этажа помещения). Ограничение на значение свойства вершины

$$z[s_{j1}, x_i] \Theta z_{j1,t1}, z_{j1,t1} \in Z_j, j1 \in J1 \subset J, i \in I, t1 \in \overline{1, T_{j1}}. \quad (2.1)$$

Ограничение на значение свойства ребра

$$z[s_{j2}, u_m] \Theta z_{j2,t2}, z_{j2,t2} \in Z_j, j2 \in J2 \subset J, m \in M, t2 \in \overline{1, T_{j2}}. \quad (2.2)$$

Теперь определим правила построения комбинации ограничений:

- объединение нескольких свойств одной вершины логическими операциями;
- объединение нескольких свойств одного ребра логическими операциями;
- объединение группы свойств группы различных вершин логическими операциями;
- объединение группы свойств группы рёбер логическими операциями.

Зададим логическую операцию  $\gamma$  как элемент множества  $\Gamma = \{\wedge, \vee\}$ .

Введём функцию  $F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R})$ , соединяющую логическими операциями несколько элементарных ограничений одной вершины:

$$F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}) = (z[s_{j_1}, x_i] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \quad (2.3)$$

$$\gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r}), j_r \in J1 \subset J,$$



где  $J1$  – множество свойств, соединяемых ограничений;  $t_r = \overline{1, T}$  – номер значения свойства  $s_{j_r}$  в ограничении  $r$ . Для упрощения в дальнейшем  $F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R})$  будем обозначать  $F_1()$ .

Рассмотрим пример комбинации двух ограничений вершины – «среда в аппарате взрывоопасна и токсична». Для удобного представления в базе данных запишем эти ограничения в виде «свойство вершины взрывоопасность среды=Да И свойство вершины токсичность среды=Да».

Пусть для свойств «взрывоопасность среды в аппарате»  $j_1 = 10$ , «токсичность среды в аппарате»  $j_2 = 11$ , тогда в выражении (2.3)  $J1 = \{10, 11\}$ ,  $R1 = 2$ ,  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  соответствуют знаку =. Таким образом, для рассматриваемого примера

$$F_1() = (z[s_{10}, x_{i1}] = "Да") \text{ И } (z[s_{11}, x_{i1}] = "Да"), i1 \in I. \quad (2.4)$$

По аналогии с  $F_1()$  введём функцию  $F_2(z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R})$ , соединяющую логическими операциями несколько элементарных ограничений одного ребра:

$$F_2(z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}) = (z[s_{j_r}, u_m] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma_1 \dots \gamma_r (z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r}), j_r \in J1 \subset J, \quad (2.5)$$

где  $J2$  – множество свойств, соединяемых ограничений.

Введём функцию  $F_3(F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}))$ , соединяющую логическими операциями группы ограничений разных вершин:

$$\begin{aligned} F_3(F_1()) &= F_1^{1,r}() \gamma_1 \dots \gamma_i F_1^{i,r}(), = \\ &= [(z[s_{j_1}, x_{1,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma_1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, x_{1,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})] \gamma_{1,r} \dots \\ &\gamma_{i,r} [(z[s_{j_1}, x_{i,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma_1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, x_{i,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})], j_r \in J_{i_r} \subset J, \forall i \in I_r, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $I_r$  – множество соединяемых вершин;  $J_{i_r}$  – множество соединяемых свойств вершины  $i_r$ ;  $R_{i_r}$  – количество соединяемых ограничений вершины  $i_r$ .

Например, если среда в одном аппарате взрывоопасна, а в другом токсична и для свойства взрывоопасность  $j_1 = 10$ , для свойства токсичность  $j_2 = 11$ ,  $R_{i1} = 1$ ,  $R_{i2} = 1$  выражение (2.6) примет вид

$$F_3(F_1()) = (z[s_{10}, x_{i1}] = "Да") \text{ И } (z[s_{11}, x_{i2}] = "Да"), i1 \neq i2, i1, i2 \in I1 \subset I. \quad (2.7)$$

В реальных практических задачах (по крайней мере, в предметной области компоновки химического оборудования) авторам не известны ограничения, которые объединяли бы свойства нескольких рёбер, несмотря на это, для общности введём по аналогии с  $F_3(F_1())$  функцию  $F_4(F_2())$ , которая логически связывает группы свойств разных рёбер:

$$\begin{aligned} F_4(F_2()) &= F_{2,r}^1() \gamma_1 \dots \gamma_{m,r} F_2^{m,r}(), = \\ &= [(z[s_{j_1}, u_{1,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, u_{1,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})] \gamma_{1,r} \dots \\ &\gamma_{m,r} [(z[s_{j_1}, u_{m,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, u_{m,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})], \\ &j_r \in J_{m_r} \subset J, \forall m_r \in M_r, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $M_r$  – множество соединяемых рёбер;  $J_{m_r}$  – множество соединяемых свойств ребра  $m_r$ ;  $R_{m,r}$  – количество соединяемых ограничений ребра  $m_r$ .

В качестве критерия обычно используют либо площадь (объём), занимаемую объектами, либо суммарную длину связей между ними.

С использованием N-ориентированных гиперграфов запись критерия суммарной длины связи примет вид:

$$\begin{aligned} R_L &= \sum [ (|z[s_x, x_i] - z[s_x, x_j]| + |z[s_y, x_i] - z[s_y, x_j]| + \\ &+ |z[s_z, x_i] - z[s_z, x_j]|) \cdot k ], \\ &\forall i, j | l_{i,j} = k. \end{aligned}$$

Критерий оптимальной компоновки по площади тогда примет вид:

$$\begin{aligned} R_S &= \max(z[s_x, x_i] + z[s_a, x_i]/2) \max(z[s_y, x_i] + z[s_b, x_i]/2) \\ &\max(z[s_y, x_i] + z[s_h, x_i]/2). \end{aligned}$$

Зачастую этого достаточно, так как стоимость получаемого решения зависит в большей степени от стоимости технологических соединений, но часто имеется потребность в иной оценке оптимальности

проекта. Более точным и полным критерием являются приведённые затраты. Они включают в себя капитальные, связанные с монтажом объектов, их соединений и вспомогательных объектов, и эксплуатационные затраты, отражающие стоимость эксплуатации объекта. Оценка значений различных критериев возможна при использовании библиотеки критериев. Библиотека критериев представляет собой набор функций для расчёта различных критериев и функции обобщения критерия, представляющей собой сумму значений выбранных критериев с весовыми коэффициентами. Выбор ограничений внутри библиотеки осуществляется управляющим вектором, представляющим собой вектор весовых коэффициентов. Ненулевое значение коэффициента  $i$ -го компонента вектора означает выбор  $i$ -й функции расчёта критерия.

Для решения задачи применим декомпозицию на два уровня: первый – компоновка объектов по группам (помещениям или областям общего монтажного пространства); второй – компоновка внутри групп.

Задачу второго уровня можно свести к задаче первого уровня, разбив области на более мелкие (например, стандартные строительные модули, в которых располагается не более одного объекта). При этом объекты являются вершинами заданного  $N$ -ориентированного гиперграфа  $G(X, U, U^L)$ , а группы – его гиперрёбрами. Таким образом, процесс решения сводится к нахождению возможных допустимых вариантов структуры  $N$ -ориентированного гиперграфа. Оптимальное решение выбирается из полученных вариантов согласно критерию максимального веса дуг связей внутри каждого гиперребра или максимального числа внутренних дуг гиперребра. Внутренней дугой назовем дугу, соединяющую две вершины гиперграфа, входящие в одно и то же гиперребро.

Для определения принадлежности вершины ребру согласно заданной системе правил используются следующие виды запросов:

- Тип 1. Исходные данные – ребро и вершина. Ответ – может ли вершина входить в ребро;
- Тип 2. Исходные данные – вершина. Ответ – список рёбер, в которые может входить вершина;
- Тип 3. Исходные данные – ребро. Ответ – список вершин, которые могут входить в ребро;
- Тип 4. Исходные данные – вершина. Ответ – список рёбер, в которые вершина входить не может;
- Тип 5. Исходные данные – ребро. Ответ – список вершин, которые не могут входить в данное ребро.

Ответом на данные вопросы являются множества вершин или рёбер, обращающие в истину выражения, соответствующие правилам типа 1 – 4. В соответствии с полученными множествами определяется принадлежность вершин рёбрам. На этапе построения начальной компоновки каждая вершина может принадлежать нескольким гиперрёбрам. Окончательно принадлежность определяется исходя из критерия минимального числа внешних связей. Дальнейшее решение сводится к декомпозиции задачи и рассмотрению каждого гиперребра как отдельного N-ориентированного гиперграфа. При этом каждая такая подзадача может решаться параллельно, что существенно ускоряет её решение. Необходимым условием в данном случае является фиксированное расположение точек входа внешних связей.

При решении данной задачи необходимо решить задачу разбиения оборудования по группам, например, распределения оборудования по этажам, цехам, помещениям в цехах. Решение этой задачи может быть получено также с использованием экспертных систем, описанных далее.

## 2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРАВИЛ

Приведём классификацию правил компоновки (рис. 2.2).

### 2.1.1. ПРАВИЛА, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ ВЕРШИНЫ РЕБРУ

Правила, которые определяют принадлежность вершины ребру, можно разделить на три группы:

- принадлежность вершины ребру определяется одним свойством вершины и одним свойством ребра;
- принадлежность вершины ребру определяется группой свойств вершины и группой свойств ребра;
- принадлежность одной вершины ребру определяется принадлежностью ребру другой вершины.

**Принадлежность вершины  $x_i$  ребру  $u_m$ ,  $x_i \in X'_m$  определяется одним свойством  $s_{j1}$  вершины  $x_i$  и свойством  $s_{j2}$  ребра.** Представляет собой правило: Если значение свойства  $s_{j1}$  вершины  $x_i$  ограничено заданным значением, то вершина может входить в ребро  $u_m$  со значением свойства  $s_{j2}$ , ограниченным заданным. В математической форме это правило примет следующий вид:

$$z[s_{j1}, x_i] \Theta_1 z_{j1, t1} \wedge z[s_{j2}, u_m] \Theta_2 z_{j2, t2} \Rightarrow x_i \in X'_m . \quad (2.9)$$

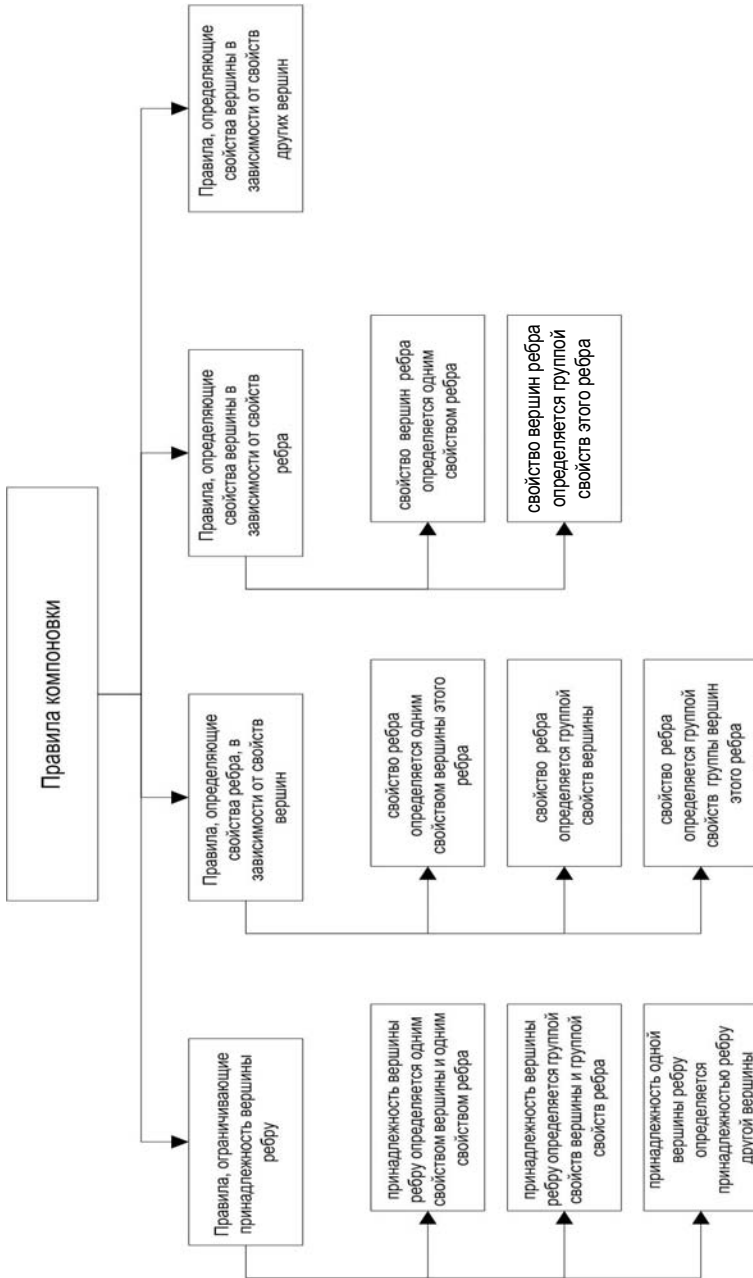


Рис. 2.2. Классификация правил компоновки

**Принадлежность вершины  $x_i$  ребру  $u_m, x_i \in X'_m$  определяется группой свойств вершины  $\{s_{j_{r1}}\} \subset S, j_{r1} \in J1 \subset J$ , соединённых логическими условиями «И» и группой свойств ребра  $\{s_{j_{r2}}\} \subset S, j_{r2} \in J2 \subset J$ , соединённых логическими условиями «И».**

Представляет собой правило: если значения группы свойств  $\{s_{j_{r1}}\} \subset S, j_{r1} \in J1 \subset J$  вершины  $x_i$  ограничены заданными значениями, то вершина может входить в ребро  $u_m$  со значениями группы свойств  $\{s_{j_{r2}}\} \subset S, j_{r2} \in J2 \subset J$ , ограниченными заданными. В математической форме это правило примет следующий вид:

$$F_1(z[s_{j_{r1}}, x_i] \Theta_{r1} z_{j_{r1}, t_{r1}}) \wedge F_1(z[s_{j_{r2}}, u_m] \Theta_{r2} z_{j_{r2}, t_{r2}}) \Rightarrow x_i \in X''_m. \quad (2.10)$$

**Принадлежность вершины  $x_i$  ребру  $u_m, x_{i1} \in X'_m$  определяется принадлежностью этому ребру другой вершины  $x_{i2}, x_{i2} \in X'_m$ .** Вершина  $x_{i1}$  обладает свойствами  $\{s_{j_{r1}}\} \subset S, j_{r1} \in J1 \subset J$ , вершина  $x_{i2}$  – свойствами  $\{s_{j_{r2}}\} \subset S, j_{r2} \in J2 \subset J$ , для которых выполняются ограничения типа  $F_1()$ , выражение (2.4). Пример правила: «Токарные станки следует располагать в одном помещении». По-другому это правило можно сформулировать так: «Если имеется станок, тип которого токарный, и он расположен в помещении  $u_m$ , то другие станки с типом токарный следует располагать в помещении  $u_m$ ». Функция  $F_1()$  в этом случае ограничивает свойство «тип станка» значением «токарный».

$$F_1(z[s_{j_{r1}}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j_{r1}, t_{r1}}) \wedge F_1(z[s_{j_{r2}}, x_{i2}] \Theta'_m z_{j_{r2}, t_{r2}}) \wedge (x_{i2} \in X'_m) \Rightarrow x_{i1} \in X. \quad (2.11)$$

### 2.1.2. ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА РЕБРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ ВЕРШИНЫ

Это правила, позволяющие по известным определённым свойствам вершины  $x_i$ , принадлежащей ребру  $u_m$ , найти определённые свойства этого ребра. Например, «Если взрывоопасный аппарат находится в помещении, то помещение категории А».

В практических задачах существуют следующие группы правил, определяющих свойства ребра в зависимости от свойств вершин.

**Свойство  $s_{j_2}$  ребра  $u_m$  определяется одним свойством  $s_{j_1}$  вершины  $x_i$  этого ребра  $x_i \in X'_m$ .** Правило имеет вид: если значение свойства  $s_{j_1}$  вершины  $x_i$ , входящей в ребро  $u_m$ , ограничено заданным значением, то свойство  $s_{j_2}$  этого ребра ограничено заданным значением. Или

$$z[s_{j_1}, x_i] \Theta z_{j_1, t_1} \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_2}, u_m] = z_{j_2, t_2}. \quad (2.12)$$

**Свойство  $s_{j_2}$  ребра  $u_m$  определяется группой свойств  $\{s_{j_r}\} \subset S, j_r \in J_1 \subset J$  вершины  $x_i$ .** Правило имеет вид: если значения группы свойств  $\{s_{j_r}\} \subset S, j_r \in J_1 \subset J$  вершины  $x_i$ , входящей в ребро  $u_m$ , ограничены заданными значениями, то свойство  $s_{j_2}$  этого ребра ограничено заданным значением. Или

$$F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r}) \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_2}, u_m] = z_{j_2, t_2}. \quad (2.13)$$

**Свойство  $s_{j_2}$  ребра  $u_m$  определяется группой свойств  $\{s_{j_{r_1}}\} \subset S, j_{r_1} \in J_1 \subset J$  группы вершин  $X_1 = \{x_{i_{r_1}}\}, i_{r_1} \in I_1 \subset I$  этого ребра** (т.е. свойства могут принадлежать разным вершинам ребра).

$$F_3(F_1()) = \bigwedge_{\forall i_{r_1} \in I_1} [F_1^{i_{r_1}}(z[s_{j_{r_1}}, x_{i_{r_1}}] \Theta_{r_1} z_{j_{r_1}, t_{r_1}})] \wedge \bigwedge_{\forall i_{r_1} \in I_1} [x_{i_{r_1}} \in X'_m] \Rightarrow z[s_{j_2}, u_m] = z_{j_2, t_2}. \quad (2.14)$$

### 2.1.3. ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА ВЕРШИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ РЕБРА

Данные правила позволяют по известным определённым свойствам ребра  $u_{m_1}$  найти определённые свойства принадлежащих ему вершин  $x_{i_1} \in X_m$ . В практических задачах существуют следующие группы правил, определяющих свойства вершин в зависимости от свойств ребра.

**Свойство  $s_{j_1}$  вершин  $x_i \in X'_m$  ребра  $u_m$  определяется одним свойством ребра  $s_{j_2}$ .**

$$z[s_{j_2}, u_m] \Theta z_{j_2, t_2} \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_1}, x_i] = z_{j_1, t_1}. \quad (2.15)$$

**Свойство  $s_{j_1}$  вершин  $x_i \in X'_m$  ребра  $u_m$  определяется группой свойств  $\{s_{j_r}\} \subset S, j_r \in J_2 \subset J$  этого ребра.**

$$F_2(z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r}) \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_1}, x_i] = z_{j_1, t_1}. \quad (2.16)$$

#### 2.1.4. ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА ВЕРШИНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ ДРУГИХ ВЕРШИН

Данные правила позволяют найти значение свойства  $j3$  одной вершины  $x_{i3}$  по известным свойствам  $\{s_{j_{r1}}\} \subset S, j_{r1} \in J1 \subset J$  другой вершины  $x_{i1}$ , причём вершины принадлежат одному ребру  $x_{i1}, x_{i3} \in X'_m$ . В общем случае может быть, что  $i1 = i3$ , т.е. некоторое свойство вершины определяется через другие ее свойства, тогда определяемое свойство  $j3$  не должно принадлежать множеству определяющих свойств  $J1$ ,  $j3 \notin J1$ . Пример правила: Однотипные аппараты следует располагать в ряд. Это означает, что если аппараты располагаются в ряд по оси  $y$  и найдена (предложена) координата  $x$  одного аппарата, то и другие аппараты этого типа будут иметь такую же координату  $x$ .

$$F_1(z[s_{j_{r1}}, x_{i1}] \oplus_{r1} z_{j_{r1}, t_{r1}}) \wedge x_{i1} \in X'_m \wedge x_{i3} \in X'_m \Rightarrow z[s_{j3}, x_{i3}] = z_{j3, t3}, \quad (2.17)$$

если  $i3 = i1, j3 \notin J1$ .

## 2.2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим процесс проверки ограничений данного типа при компоновке промышленных объектов.

Для контроля ограничений в процессе проектирования компоновки промышленных объектов применимы механизмы экспертных систем. Ограничения в данной задаче обусловлены, во-первых, техническими, технологическими требованиями и требованиями стандартов, а также собственным опытом проектировщика, являющегося экспертом в данной предметной области. В зависимости от особенностей конкретной решаемой задачи набор ограничений может быть различен, а задание их с применением традиционных технологий программирования может быть затруднено необходимостью внесения изменений в исходный код программы разработчиком либо использования сложных команд. Таким образом, для получения решения с помощью таких систем кроме эксперта предметной области необходим специалист в области программирования. Использование же механизмов экспертных систем совместно с традиционными методами позволяет решить задачу гибкого формирования системы ограничений самим экспертом, так как правила в таком случае представляются в естественном виде.

Тогда, переходя на терминологию экспертных систем, свойства аппаратов и рёбер представляют собой факты базы знаний, а ограничения, формализованные в виде правил «Если А, то В» – правила получения новых знаний.



Главной частью экспертной системы является механизм логического вывода. Его можно представить в виде четвёрки  $\langle V, S, K, W \rangle$ , где  $V$  – это процедура выбора из базы знаний правил и фактов;  $S$  – процедура сопоставления правил и фактов, в результате которой определяется множество фактов, к которым применимы правила для присвоения значений;  $K$  – процедура разрешения конфликтов, определяющая порядок использования правил, если в заключении правила указаны одинаковые имена фактов с разными значениями;  $W$  – процедура, осуществляющая выполнение действий, соответствующих полученному значению факта (заключению правила). Рассмотрим более подробно механизм вывода.

Проверка ограничений начинается с определения принадлежности аппаратов помещению. Для определения принадлежности аппарата помещению применим обратный механизм вывода. Из базы знаний последовательно будем выбирать все правила, определяющие принадлежность аппарата помещению. Для каждого правила из базы знаний выбираются факты, соответствующие свойствам аппаратов и помещений. Эти свойства в свою очередь могут определяться правилами, заданными в базе знаний.

Введём ряд вспомогательных множеств.

- Список логических выводов. В список заносятся последовательно номера всех правил базы знаний и свойства, расположенные в части «То» соответствующих правил. Список – это упорядоченное множество пар  $\langle p, s_{j,p} \rangle$ , где  $p$  – порядковый номер правила базы знаний;  $s_{j,p} \in S_3$  – свойства аппаратов и рёбер, определяемые правилами.

- Стек логических выводов. Стек представляет собой упорядоченное множество пар  $\langle p, f_p \rangle$ , где  $p$  – номер правила;  $f_p$  – функция-условие вида (2.3, 2.5, 2.6, 2.8).

В стек заносятся номера всех правил, содержащих в части вывода искомое свойство, и свойства-условия.

- Список ограничений условия ставит в соответствие каждому элементарному ограничению в правиле номер. Это позволяет упростить проверку элементарных ограничений и исключить повторное установление одного и того же факта.

Рассмотрим процесс определения принадлежности аппарата помещению (рис. 2.3). Последовательно рассматривается принадлежность каждого аппарата соответствующим помещениям. Выбирается аппарат и для него выдвигается гипотеза о принадлежности его помещению. Последовательно рассматриваются все правила и в стек логических выводов заносятся все правила типа 1, определяющие принадлежность аппарата этому помещению. В список ограничений условия записываются соответственно элементарные ограничения, стоящие в условной части этих правил.

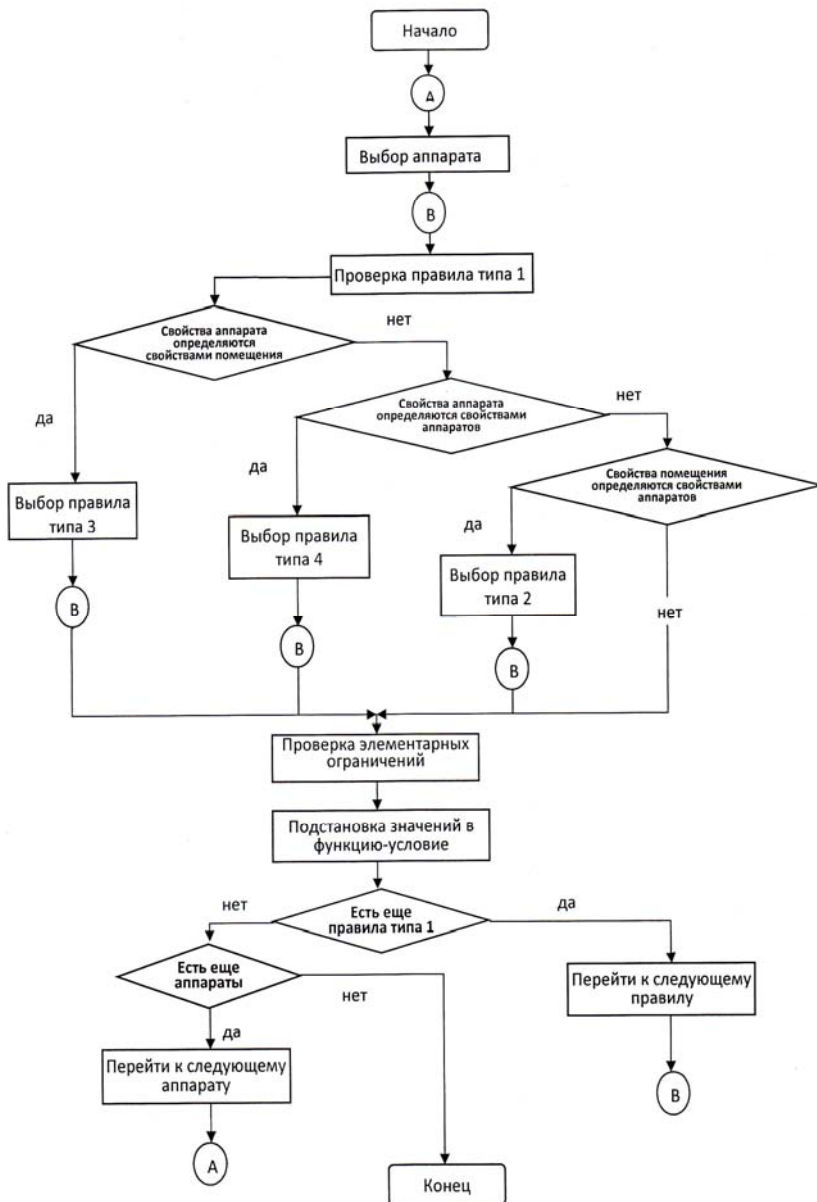


Рис. 2.3. Схема проверки правил

Далее последовательно рассматриваются все правила. Из стека извлекается последнее правило. Проверка правила начинается с выбора из списка ограничений условия соответствующих элементарных ограничений, после чего определяем их выполнение.

Свойства аппаратов и помещений, ограниченные условиями, также могут определяться правилами. Тогда дальнейшая проверка определяется следующим образом. Согласно приведённой классификации, возможны три случая: свойства аппарата зависят от свойств помещения; свойства аппарата зависят от свойств других аппаратов; свойства помещения зависят от свойств аппаратов. Для первого случая проверяются правила типа 3, для второго и третьего – типов 4 и 2 соответственно. Для каждого элементарного ограничения выполняется поиск в списке логических выводов правил соответствующего типа, определяющих эти свойства. Если для свойства нет таких правил, то проверяется соответствие фактического значения свойства условию. Иначе правило заносится в стек логических выводов и процесс проверки переходит к нему. Полученные значения элементарных ограничений подставляются в функцию-условие (2.3, 2.5, 2.6, 2.8). Правило считается доказанным, если функция-условие имеет значение истины (логической 1).

После доказательства первого правила процесс доказательства переходит к следующему. Гипотеза считается доказанной, если доказаны все правила, определяющие размещение аппарата в помещении.

Так как в процессе установления возможности размещения аппаратов в помещении необходимо определять их свойства согласно правилам, данная процедура позволяет достичь выполнения всех заданных правил.

Использование механизмов экспертных систем позволяет получать варианты компоновки технологического оборудования по группам в соответствии с физическими, технологическими, эксплуатационными параметрами, особенностями технологической схемы, соображениями техники безопасности и охраны труда, а также соображениями проектировщика. При этом правила компоновки задаются в «естественном» виде на этапе решения задачи без необходимости изменения самой системы.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Каково назначение экспертных систем?
2. Расскажите об основных понятиях теории графов и её применении.
3. Перечислите основные правила, используемые при компоновке промышленных объектов.
4. Основные признаки, по которым производится классификация правил компоновки.

5. Сформулируйте словесную постановку задачи компоновки.
6. В чем отличие различных постановок задач компоновки?
7. Что такое N-ориентированных гиперграф? Его физический смысл.
8. Раскройте смысл свойств рёбер гиперграфа применительно к задаче компоновки.
9. Методы решения задач компоновки.
10. Опишите механизм логического вывода в экспертных системах.
11. Множества и элементы множеств в задачах компоновки.

## Список литературы к главе 2

1. **Автоматизированная** информационная система поддержки принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов. Часть 1. Аналитические и процедурные модели / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, И. В. Милованов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 4. – С. 3 – 11.
2. **Автоматизированная** информационная система поддержки принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов. Часть 2. Структура и функционирование системы / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, М. С. Громов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 1. – С. 33 – 38.
3. **Егоров, С. Я.** Информационно-логическая модель компоновки промышленных объектов / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, М. С. Громов // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2006. – № 4. – С. 19 – 23.
4. **Мешалкин, В. П.** Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения / В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1995. – 368 с.
5. **Amon, С. Н.** Optimal three-dimensional placement of heat generating electronic components / С. Н. Amon, М. I. Campbell, J. Cagan // Journal of Electronic Packaging. – 1997. – Vol. 2. – P. 106 – 113.
6. **Егоров, С. Я.** Автоматизированная информационная система поддержки принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов. Часть 3. Подсистема формирования и контроля ограничений / С. Я. Егоров, К. А. Шаронин, К. В. Немтинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 4. – С. 17 – 20.
7. **Мокрозуб, В. Г.** Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве, инвариантное к предметной области / В. Г. Мокрозуб, К. А. Шаронин, К. В. Немтинов // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2012. – № 3. – С. 11 – 20.

### Глава 3

## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

---

Выбор аппаратурного оформления (АО) химико-технологических систем (ХТС) – одна из основных задач, возникающих как при проектировании новых [1], так и при модернизации существующих [2] многоассортиментных химических производств (МХП). К особенностям таких производств можно отнести сравнительно невысокие объёмы производства и высокие цены на производимые продукты, широкий ассортимент выпускаемой продукции, возможность быстрого перехода с выпуска одного продукта на другой (высокая гибкость), большое число технологических стадий производства, функционирование оборудования в периодическом или полунепрерывном режиме. Примерами таких производств являются производства химических реактивов, фармацевтических препаратов, красителей и полупродуктов [3].

Решением этой задачи является вариант АО ХТС – число основных аппаратов каждой стадии системы и определяющий размер (рабочий объём или площадь рабочей поверхности) каждого аппарата, а также параметры режима функционирования (размеры партий продуктов и периоды их выпуска), обеспечивающие заданную производительность системы по продуктам. Определяющий размер обычно выбирается из множества стандартных значений. Требуется найти оптимальную комбинацию числа и определяющих размеров аппаратов стадий ХТС из множества возможных вариантов и параметры режима функционирования системы заданной производительности, при этом критерием оптимальности могут служить, например, суммарные капитальные затраты на оборудование [1, 4, 5]. Результаты решения этой задачи во многом определяют качество проектных решений по компоновке оборудования и календарному планированию выпуска продукции.

Рассматриваемая задача относится к классу задач частично-целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer Nonlinear Programming – MINLP) [7, 8]. В литературе предложены различные подходы к решению этой задачи, например методы Монте-Карло, генетические алгоритмы, эвристические методы, сведение исходной задачи к задаче нелинейного либо линейного программирования, которые позволяют получить лишь субоптимальные решения [7 – 11]. До настоящего времени не предложена общепризнанная методика решения этой проблемы.

Для каждого работоспособного варианта АО ХТС параметры режима функционирования системы определяются однозначно. Таким образом, задачу поиска оптимального варианта АО ХТС можно рассматривать как задачу дискретной оптимизации. Применение полного перебора вариантов для получения глобального оптимального решения затруднительно из-за большой размерности задачи. Например, в работе [10] представлена ХТС, состоящая из 16 аппаратных стадий. На каждой стадии может быть установлено 5 – 12 типоразмеров стандартного оборудования. Если допустить, что на каждой стадии может быть установлен единственный аппарат, то полное количество вариантов перебора составит  $5^{16} \dots 12^{16}$  (что примерно равно  $10^{11} \dots 10^{17}$ ).

Одним из популярных методов, используемых для решения подобных оптимизационных задач в различных областях наряду с такими, как комбинаторная оптимизация, искусственный интеллект и т.д., является метод ветвей и границ. В основе метода лежит идея последовательного разбиения множества допустимых решений на подмножества [13]. Затем определяется нижняя оценка для целевой функции на каждом подмножестве. Если нижняя оценка не меньше наилучшего из найденных решений, то подмножество отбрасывается и т.д., пока не будет получено одно конкретное решение.

Подобный подход для решения задачи выбора АО ХТС предлагался в работе [14], в которой авторы использовали упрощённую математическую модель функционирования ХТС, эвристический подход для вычисления оценочной функции и рассматривали в качестве тестовых примеров задачи небольшой размерности. Вычислительные возможности на момент написания работы (1975 г.) были весьма ограничены.

В работе [6] представлен основанный на схеме ветвей и границ последовательный алгоритм оптимального выбора аппаратного оформления химико-технологических систем. Авторами было проведено исследование быстродействия отдельных фрагментов алгоритма, на основании которого осуществлена его оптимизация. Эксперименты проводились на компьютере следующей конфигурации: процессор Intel Pentium 4 с тактовой частотой 3000 МГц, объём оперативной памяти 2048 Мб, операционная система Scientific Linux 5.3. Для компиляции программы использовался GCC 4.1.2. Для тестового примера (ХТС, состоящая из 16 стадий, производятся 3 продукта, для каждой стадии имеется 5 типоразмеров стандартного оборудования) время расчёта составило  $\approx 46$  часов.

Таким образом, несмотря на проведённую оптимизацию последовательного алгоритма и на существенно возросшие за более чем 35 лет по сравнению с [14] возможности вычислительной техники, время вы-

полнения программы для решения задачи сравнительно небольшой размерности остаётся значительным.

В настоящее время одним из наиболее перспективных способов повышения производительности алгоритмов является их параллелизация [15], а также применение высокопроизводительных вычислительных систем.

Применение параллельных модификаций метода ветвей и границ при решении различных задач широко представлено в литературе. В работе [16] приводится описание библиотеки BNB-Solver, позволяющей разрабатывать последовательные и параллельные приложения, основанные на методе ветвей и границ. Библиотека была использована при создании программ, предназначенных для решения задач о ранце с одним и несколькими ограничениями и задачи коммивояжёра.

Решение задачи о ранце с одним ограничением с использованием параллельной реализации комбинированного алгоритма метода ветвей и границ рассматривается в работе [17]. Предлагается подход, в котором комбинируется параллельная реализации метода ветвей и границ и эвристического поиска.

В работе [18] предлагается общий подход к использованию парадигмы мастер-работник как во вновь разрабатываемых, так и в существующих моделях программных компонентов (Software Component Models). Приводятся результаты вычислительных экспериментов на синтетических тестах с использованием программы, реализующей предлагаемый подход.

Использование распределённых вычислительных систем для решения задачи размещения стандартных элементов (Standard Cell Placement Problem) представлено в [19]. Авторы решают задачу с использованием модели смешанного целочисленного программирования и параллельного метода ветвей с отсечением (Branch-and-Cut Method).

В работе [20] представлен параллельный алгоритм перечисления комбинаций химических элементов (Chemical Compound Inference), что является основной процедурой химио- и биоинформатики. Эту процедуру используют, например, для определения структуры, синтеза новых молекул и пр.

Мы предлагаем параллельный алгоритм решения задачи выбора АО ХТС МХП, основанный на методе ветвей границ [12], исследуем возможности его применения для поиска оптимального решения.

### 3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ХТС МХП представляет собой совокупность аппаратных стадий, оснащённых реакторами, ёмкостями, фильтрами, сушилками и другим технологическим оборудованием, которые предназначены для

реализации технологических стадий производства фиксированного ассортимента продуктов. При допущении, что число аппаратов на каждой аппаратурной стадии ХТС фиксировано, задача может быть сформулирована следующим образом.

ХТС представляет собой последовательность  $I$  аппаратурных стадий. Каждая  $i$ -я стадия системы может быть оборудована основным аппаратом, выбранным из некоторого конечного множества  $X_i$ , количество элементов которого равно  $J_i$ . Множество  $X_i$  представляет собой все возможные варианты определяющих размеров аппаратов стадии  $i$ :  $X_i = \{x_{i,j}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J_i}$ , где  $x_{i,j}$  – определяющий размер (рабочий объём, площадь рабочей поверхности)  $j$ -го аппарата, которым может быть оборудована  $i$ -я стадия ХТС.

Каждый вариант АО ХТС  $\Omega_e$ ,  $e = \overline{1, E}$ , где  $E = \prod_{i=1}^I J_i$  представляет собой упорядоченную совокупность определяющих размеров аппаратов, выбранных из соответствующих множеств. Например, существует ХТС, состоящая из 3 стадий ( $I = 3$ ). Первая стадия системы может быть оборудована аппаратом, определяющий размер которого выбирается из двух вариантов, т.е.  $J_1 = 2$ ,  $X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}\}$ , вторая стадия – из трёх вариантов, т.е.  $J_2 = 3$ ,  $X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}\}$ , и третья – из двух вариантов, т.е.  $J_3 = 2$ ,  $X_3 = \{x_{3,1}, x_{3,2}\}$ . Общее количество всех возможных вариантов АО ХТС  $E = J_1 \cdot J_2 \cdot J_3 = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$ .

Порядок переработки партий продуктов основными аппаратами стадий ХТС фиксирован (заранее определён при разработке структуры её материальных потоков), поэтому, например, варианты  $\{x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,2}\}$ ,  $\{x_{1,2}, x_{2,1}, x_{3,1}\}$  могут быть допустимыми, а варианты  $\{x_{3,1}, x_{2,1}, x_{1,2}\}$ ,  $\{x_{2,2}, x_{3,1}, x_{1,1}\}$  – явно недопустимы.

Для каждого работоспособного варианта АО ХТС должны выполняться условия совместного функционирования оборудования различных её стадий:

$$S(\Omega_e) = 0 \text{ (ограничение на работоспособность ХТС).}$$

Вариант АО ХТС является работоспособным, если аппараты всех её аппаратурных стадий без исключения способны переработать объём партии выпускаемого продукта с учётом максимальных и минимальных степеней заполнения аппаратов.

Кроме того, работоспособный вариант АО ХТС должен обеспечивать выпуск продукции заданного ассортимента и объёма за заданный промежуток времени, т.е.  $T(\Omega_e) \leq T_{\max}$  (ограничение на длительность).



ность функционирования ХТС), где  $T_{\max}$  – заданное максимальное время выпуска продукции.

Таким образом, задачу выбора аппаратурного оформления химико-технологической системы можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такой вариант  $\Omega_e^* \in \Omega_e, e = \overline{1, E}$ , АО ХТС, при котором критерий оптимальности – капитальные затраты  $\text{Cost}(\Omega_e^*)$  – достигает минимума и выполняются ограничения на работоспособность и длительность функционирования ХТС:

$$\Omega_e^* = \operatorname{argmax} \text{Cost}(\Omega_e), e = \overline{1, E}; \quad (3.1)$$

$$\Omega_e = \{x_{1,j_1}, x_{2,j_2}, \dots, x_{I,j_I} \mid j_i = \overline{1, J_i}, i = \overline{1, I}\}, e = \overline{1, E}; \quad (3.2)$$

$$x_{i,j} \in X_i, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J_i}; \quad (3.3)$$

$$S(\Omega_e) = 0, e = \overline{1, E}; \quad (3.4)$$

$$T(\Omega_e) \leq T_{\max}, e = \overline{1, E}. \quad (3.5)$$

Подробно математическая модель функционирования ХТС, включающая в том числе выражения для проверки ограничений, вычисления критерия оптимизации и т.д., представлена в [21].

### 3.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

Все множество вариантов АО ХТС, состоящей из  $I$  стадий, может быть представлено в виде дерева, состоящего из  $I$  ярусов (рис. 3.1). Каждый ярус дерева соответствует стадии ХТС. Каждое ребро дерева сопоставляется одному выбранному элементу множества  $X_i = \{x_{i,j}\}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J_i}$ . Например, рёбра, исходящие из корневой вершины (нулевой ярус), соответствуют элементам множества  $X_1$ .

Каждый узел  $n_{i,k}$  яруса  $N_i = \{n_{i,1}, n_{i,2}, \dots, n_{i,k}\}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K_i}$ ,  $K_i = \prod_{l=1}^i J_l$  соответствует фрагменту ХТС, состоящему из стадий  $1 - i$  (из  $i$  начальных стадий). Каждый полный путь от корня дерева к одному из его листьев (конечному узлу) представляет собой вариант АО ХТС.

Перебор возможных вариантов АО ХТС осуществляется с использованием обхода дерева в глубину [22, 23].

На каждом ярусе дерева осуществляется перебор определяющих размеров аппаратов, доступных для оборудования этой стадии. Выбранный размер добавляется к начальному фрагменту АО ХТС, полученному на предыдущих ярусах дерева. Процесс продолжается рекур-

сивно для всех работоспособных начальных фрагментов АО системы. Таким образом, на последнем ярусе дерева получается полный работоспособный вариант АО ХТС, рекурсивный процесс останавливается и полученный вариант сравнивается с текущим оптимальным. Если получен лучший вариант, то он заменяет текущее оптимальное решение.

Полный обход дерева вариантов (фиксация на каждой стадии ХТС размера аппарата, выбранного из соответствующего этой стадии ряда стандартных размеров, и формирование полного варианта АО ХТС) и дальнейшая проверка ограничений (3.4) и (3.5) приведёт к значительным вычислительным затратам. Для сокращения числа перебираемых вариантов используется алгоритм, основанный на методе ветвей и границ, псевдокод которого представлен в листинге 1 (имена большинства переменных соответствуют именам, используемым в постановке задачи).

Обход дерева вариантов начинается с вызова процедуры EnumerateVariants() для нулевого яруса (строка 1). Эта процедура вызывается рекурсивно вплоть до яруса  $I - 1$  (строка 4). Затем текущий оптимальный вариант ХТС сохраняется в векторе Wopt с числом элементов  $I$ , каждый из которых хранит выбранный определяющий размер аппарата для каждой стадии. Рабочий вариант ХТС хранится в аналогичном векторе W.

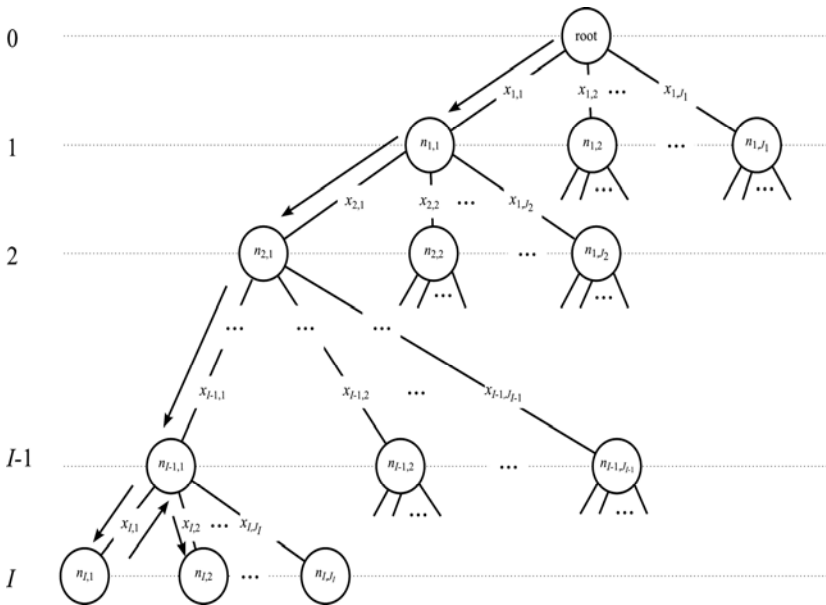


Рис. 3.1. Обход в глубину дерева вариантов

```

1 FindSolution () { EnumerateVariants (0); }
2 /* рекурсивный обход дерева */
3 EnumerateVariants (i) {
4 if (i < I) {
5 for (j = 1; j <= J[i]; j++) {
6 /* создание начального фрагмента ХТС (стадии 1 - i) */
7 W[i] = X[i, j];
8 /* проверка работоспособности и стоимости начального
фрагмента ХТС */
9 if (PartS(W) == 0 && PartCost (W, i) < minCost ) {
10 /* рекурсивный поиск */
11 EnumerateVariants (i + 1); } } }
12 else { /* достигнут конечный ярус дерева */
13 /* проверка критерия оптимизации */
14 if (Cost (W) < minCost) {
15 /*проверка ограничения (3.5) на длительность функц-ния ХТС*/
16 if (T(W) <= Tmax ) {
17 /* сохранение нового оптимального решения */
18 Wopt = W;
19 minCost = Cost(Wopt ); } } }
20 }

```

Листинг 1. Псевдокод последовательного варианта алгоритма

Для сокращения вариантов перебора в оригинальном варианте алгоритма применялась следующая схема. На каждом ярусе  $i$  дерева проверяется ограничение (3.4) (процедура PartS(), строка 9) условия совместного функционирования оборудования ХТС, но не для всей ХТС целиком, а только для её начального фрагмента, состоящего из уже пройденных вышележащих ярусов и текущего (фрагмент ХТС, состоящий из стадий  $1 - i$ ). Если часть схемы уже неработоспособна, то нет смысла перебирать аппараты на нижележащих ярусах. Кроме того, сравнивается стоимость начального фрагмента АО ХТС (процедура PartCost(), строка 9) со стоимостью текущего оптимального варианта АО ХТС minCost. В результате количество вариантов перебора будет сокращено, причём тем сильнее, чем на более высоких ярусах дерева будет найдено такое несоответствие.

Переход на следующий уровень рекурсии (вызов процедуры EnumerateVariants() на уровне  $i + 1$ , строка 11) происходит лишь в том случае, если начальный фрагмент ХТС, состоящий из стадий  $1 - i$ , работоспособен, иначе происходит возврат на предыдущий ярус дерева. Таким образом, переход на следующий уровень рекурсии (вызов процедуры EnumerateVariants() для следующего уровня  $i + 1$ , строка 11)

осуществляется лишь в том случае, если начальный фрагмент ХТС, состоящий из стадий  $1 - i$ , во-первых, работоспособен, и, во-вторых, его стоимость не превышает стоимости наилучшего на текущий момент варианта АО ХТС. В противном случае происходит возврат на предыдущий ярус дерева.

Если достигнут конечный ярус дерева ( $i=I$ , строка 12), т.е. рассматриваемый вариант АО ХТС работоспособен, то его стоимость (результат выполнения процедуры  $Cost()$ ) сравнивается со стоимостью текущего наилучшего варианта АО ХТС  $minCost$  (строка 14).

Если найдено лучшее решение, проверяется ограничение (3.5) на длительность функционирования ХТС (процедура  $T()$ , строка 16). Если ограничение (3.5) выполняется, то найден новый оптимальный вариант АО ХТС, и он заменяет текущее оптимальное решение  $Wopt$  (строка 18), а его стоимость сохраняется в переменной  $minCost$  (строка 19).

Инициализация переменной  $minCost$  осуществляется как сумма максимальных стоимостей аппаратов каждой стадии.

### 3.3. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ВАРИАНТ АЛГОРИТМА

Древовидная организация пространства поиска в методе ветвей и границ обеспечивает хорошие предпосылки для распараллеливания алгоритма, так как различные ветви дерева могут обрабатываться одновременно [25]. Параллельная формулировка метода ветвей и границ представлена в [24]. Основная сложность распараллеливания метода ветвей и границ заключается в том, что структура дерева поиска заранее не известна: невозможно предсказать заранее, где произойдет выполнение или невыполнение условия перехода на более глубокие ярусы дерева. Структура дерева формируется динамически в процессе работы алгоритма. Существующие методы параллельного обхода дерева поиска в глубину можно классифицировать по способам разбиения дерева на поддеревья (статический подход, динамический подход) и распределения последних между процессами [26]. Статический подход к разбиению дерева может использоваться только для деревьев со строго определённой структурой, что неприемлемо для метода ветвей и границ. Высокую эффективность в условиях нерегулярности и непредсказуемости структуры дерева может обеспечить динамическое разбиение. Предлагаемая параллельная реализация алгоритма основана на использовании парадигмы мастер-работник (*Master-Worker Paradigm, Master-Slave Paradigm*) и метода назначаемых поддеревьев [27].

К основным особенностям парадигмы мастер-работник можно отнести следующие:

- управляющий процесс (*Master*) генерирует задачи и управляет их равномерным распределением между рабочими процессами (*Worker*);

- каждый рабочий процесс после решения полученной задачи возвращает результаты управляющему процессу и запрашивает новую задачу;
- рабочие процессы не обмениваются данными между собой – только с управляющим процессом;
- после получения результатов решения задачи управляющий процесс динамически генерирует новую задачу для освободившегося рабочего процесса или, если задач больше нет, посылает сигнал на завершение работы.

Псевдокод для рабочего и управляющего процессов представлены в листинге 2 и 3 соответственно.

### 3.3.1. УПРАВЛЯЮЩИЙ ПРОЦЕСС

Управляющий процесс с помощью рекурсивной процедуры MasterEnumerateVariants() осуществляет последовательный обход дерева в глубину только до некоторого яруса  $G$  (*granularity – гранулярность*),  $1 \leq G \leq I$ , при этом формируются начальные фрагменты АО ХТС  $W[i], i = \overline{1, G}$  (строки 26 – 33).

Параметр гранулярности  $G$  используется для изменения степени параллелизма: поддерева ниже этого уровня не разделяются на параллельные задачи, а обрабатываются последовательно. Значение параметра должно быть таким, чтобы количество образующихся подзадач было как минимум не меньше числа используемых процессорных элементов. На нижнем уровне рекурсии управляющий процесс ожидает сообщений от рабочего процесса (строка 37), при этом сообщения могут быть двух типов: *решение* (SOLUTION) или *запрос задания* (REQUEST\_WORK).

```

1 Master() {
2 /* количество рабочих процессов (один из процессов управляю-
ций) */
3 num_workers = NUM_PROCESSORS - 1;
4
5 /* запуск процедуры обхода дерева */
6 MasterEnumerateVariants(0);
7
8 /* пока есть запущенные рабочие процессы */
9 while (num_workers > 0) {
10 msg = ReceiveWorkerMessage ();
11 /* рабочий процесс получил новое решение */
12 if (msg.type == SOLUTION) {
13 /* проверка критерия оптимизации */
14 if (Cost(msg.W) < minCost) {

```

```

15 /* сохранение нового оптимального решения */
16 Wopt = msg.W;
17 minCost = Cost(msg.W); } }
18 /* рабочий процесс запрашивает новое задание */
19 elseif (msg.type == REQUEST_WORK ) {
20 /* остановка рабочего процесса */
21 SendWorkerMessage (msg.workerID , QUIT );
22 num_workers --; } }
23 }
24
25 MasterEnumerateVariants(level) {
26 if (level < G) { /* если текущая глубина поиска меньше G */ {
27 for (j=1; j <= J[level]; j++) {
28 /* создание начального фрагмента ХТС (стадии I - j) */
29 W[level] = X[level , j];
30 /* проверка работоспособности и стоимости начального фраг-
мента ХТС */
31 if (S(W) == 0 && PartCost(W,level) < minCost) {
32 /* рекурсивный поиск */
33 MasterEnumerateVariants(level + 1); } } } {
34 else { /* глубина поиска равна G */
35 while (true) {
36 /* получение сообщений от рабочего процесса */
37 msg = ReceiveWorkerMessage ();{
38 /* получено решение */
39 if (msg.type == SOLUTION) { {
40 /* проверка критерия оптимизации */
41 if (Cost(msg.W) < minCost) {
42 /* сохранение нового оптимального решения */
43 Wopt = msg.W;
44 minCost = Cost(msg.W); } }
45 /* запрос нового задания */
46 elseif (msg.type == REQUEST_WORK ) {
47 /* передача начального фрагмента ХТС и текущего значение
критерия */
48 SendWorkerMessage (msg.workerID , W, minCost);
49 break; } } }
50 }

```

Листинг 2. Псевдокод параллельного варианта алгоритма (управляющий процесс)

Если управляющий процесс получает от рабочего процесса новый полный вариант АО ХТС (строка 39), то его стоимость сравнивается со стоимостью текущего глобального оптимального варианта АО ХТС

(строка 41). Если найден новый оптимальный вариант АО ХТС, то он заменяет текущее оптимальное решение  $Wopt$  (строка 43), а его стоимость сохраняется в переменной  $minCost$  (строка 44).

Если управляющий процесс получает от свободного рабочего процесса запрос нового задания (строка 46), то ему передаётся сообщение типа *задание* ( $DO\_WORK$ ), в котором содержится начальный фрагмент АО ХТС и стоимость текущего оптимального варианта АО ХТС (строка 48).

### 3.3.2. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС

Рабочий процесс запрашивает задание от управляющего процесса (строка 4) и ожидает ответного сообщения. Ответное сообщение может быть двух типов: *задание* ( $DO\_WORK$ ) или *завершение работы* ( $QUIT$ ). Если от управляющего процесса получено сообщение с новым заданием (строка 7), содержащим начальный фрагмент АО ХТС и стоимость текущего оптимального варианта АО ХТС, осуществляется вызов рекурсивной процедуры  $WorkerEnumerateVariants()$  (строка 10). С помощью этой процедуры рабочий процесс осуществляет последовательный обход назначенных ему поддеревьев в глубину, начиная с яруса  $G + 1$  и до самого нижнего яруса  $I$ , при этом полученный от управляющего процесса начальный фрагмент АО ХТС достраивается до полного варианта АО ХТС  $W[i], i = \overline{G+1, I}$  (строки 20 – 27).

```
1 Worker() {
2 while (true) {
3 /* запрос нового задания */
4 SendMasterMessage (workerID , REQUEST_WORK );
5 msg = ReceiveMasterMessage ();
6 /* получено новое задание */
7 if (msg.type == DO_WORK) {
8 minCost = msg.minCost;
9 foundNewSolution = false;
10 WorkerEnumerateVariants(G + 1);
11 if (foundNewSolution ) { /* найдено новое решение */
12 /* отправка решения управляющему процессу */
13 SendMasterMessage (workerID , SOLUTION , Wopt); } }
14 /* получено сообщение о завершении работы */
15 elseif (msg.type == QUIT) {
16 break; } }
17 }
18
19 WorkerEnumerateVariants(level) {
```

```

20 if (level < I) { {
21 for (j=1; j <= J[level]; j++) {
22 /* формирование полного варианта АО ХТС */
23 W[level] = X[level , j];
24 /* проверка работоспособности и стоимости АО ХТС */
25 if (S(W) == 0 && PartCost(W, level) < minCost) {
26 /* рекурсивный поиск */
27 WorkerEnumerateVariants(level + 1); } } } {
28 else { /* достигнут конечный узел дерева */
29 /* проверка критерия оптимизации */
30 if (Cost(W) < minCost) {
31 /* проверка ограничения (3.5) на длительность функци-ния ХТС */
32 if (T(W) <= Tmax) {
33 /* сохранение нового оптимального решения */
34 Wopt = W;
35 minCost = Cost(Wopt );
36 foundNewSolution = true; } } }
37 }

```

Листинг 3. Псевдокод параллельного варианта алгоритма (рабочий процесс)

Переход на следующий уровень рекурсии осуществляется аналогично последовательному варианту алгоритма: если начальный фрагмент ХТС, состоящий из стадий  $1 - level$ , во-первых, работоспособен и, во-вторых, его стоимость не превышает стоимости наилучшего на текущий момент варианта АО ХТС (строка 25).

В противном случае происходит возврат на предыдущий ярус дерева.

При достижении конечного узла дерева ( $i=I$ , строка 28) его стоимость сравнивается со стоимостью текущего локального наилучшего варианта АО ХТС (строка 30). Если найдено лучшее решение, проверяется ограничение (3.5) на длительность функционирования ХТС (процедура  $T()$ , строка 32). Если ограничение (3.5) выполняется, то найден новый оптимальный вариант АО ХТС, и он заменяет текущее локальное оптимальное решение  $Wopt$  (строка 34), а его стоимость сохраняется в переменной  $minCost$  (строка 35). После завершения работы рекурсивной процедуры рабочий процесс осуществляет передачу локального оптимального варианта АО ХТС управляющему процессу (строка 13). Далее рабочий процесс освобождается и осуществляет запрос нового задания. При получении от управляющего процесса сообщения о завершении работы (строка 15), рабочий процесс завершает свою работу (строка 13).



### 3.3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

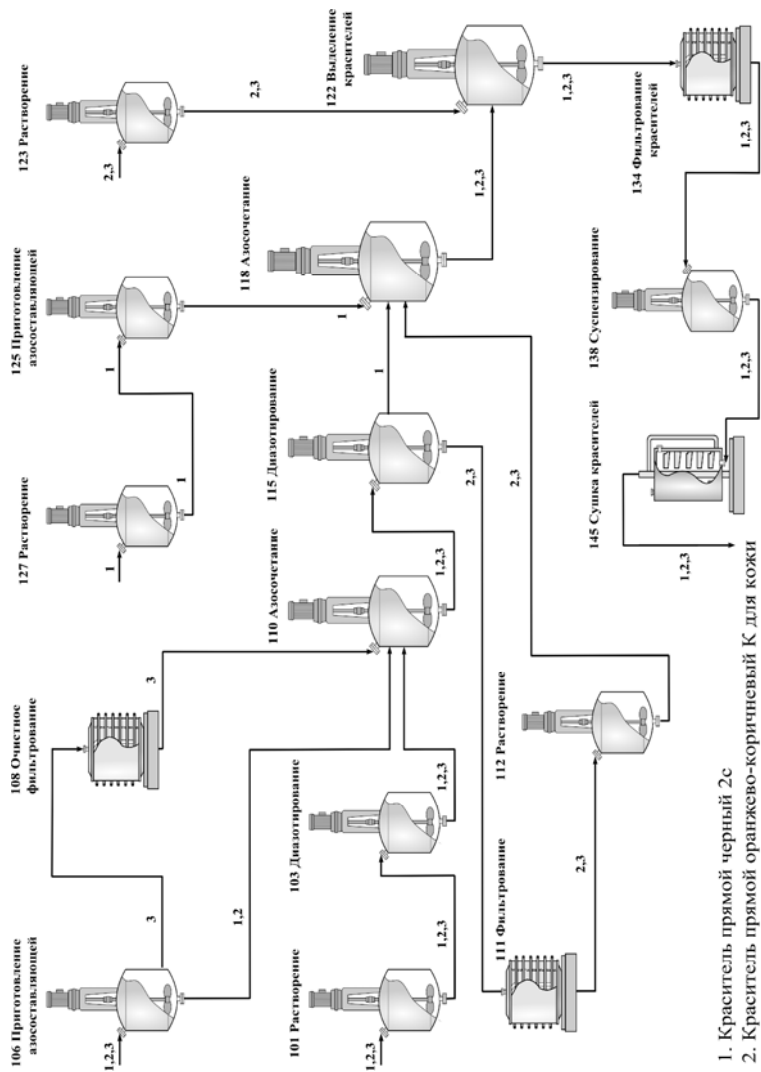
Для проведения численных экспериментов разработана программа на языке программирования C++ с использованием библиотеки Message Passing Interface (MPI) [28]. В качестве тестового примера использовался расчёт аппаратурного оформления для ХТС, состоящей из 16 аппаратурных стадий (см. рис. 3.2), для каждой из которых доступно 5 стандартных типоразмеров оборудования. ХТС должна в течение 7400 часов обеспечить выпуск трёх красителей объёмами 2250, 100 и 50 тонн соответственно.

Эксперименты проводились на кластере Тамбовского государственного технического университета, состоящем из 8 компьютеров (nodes) на базе процессоров Intel Pentium 4 3.0 ГГц и 2 Гб ОЗУ, один из которых (headnode) является сервером, на базе процессора Intel Pentium 4 3.2 ГГц и 4 Гб ОЗУ, операционная система Scientific Linux 5.3. Все компьютеры кластера объединены в локальную вычислительную сеть Fast Ethernet. Для компиляции программы использовался GCC 4.1.2.

Результат решения задачи выбора АО для тестовой ХТС представлен в табл. 3.1.

#### 3.1. Решение задачи выбора АО для тестовой ХТС

№ по схеме	Наименование стадии	Основной размер оборудования
101	Растворение	6,3 м <sup>3</sup>
103	Диазотирование	10 м <sup>3</sup>
106	Приготовление азосоставляющей	5 м <sup>3</sup>
108	Очистное фильтрование	5 м <sup>2</sup>
110	Азосочетание	16 м <sup>3</sup>
115	Диазотирование	20 м <sup>3</sup>
127	Растворение	0,4 м <sup>3</sup>
125	Приготовление азосоставляющей	3,2 м <sup>3</sup>
111	Фильтрование	25 м <sup>2</sup>
112	Растворение	10 м <sup>3</sup>
118	Азосочетание	32 м <sup>3</sup>
122	Выделение красителей	32 м <sup>3</sup>
123	Растворение	3,2 м <sup>3</sup>
134	Фильтрование красителей	50 м <sup>2</sup>
138	Суспензирование	10 м <sup>3</sup>
145	Сушка красителей	20 м <sup>3</sup>



1. Краситель прямой черный 2с
2. Краситель прямой оранжево-коричневый К для кожи
3. Краситель прямой коричневый

Рис. 3.2. Тестовый пример химико-технологической системы

### 3.2. Значения ускорений и эффективности использования процессоров

Количество процессоров	1	2	3	4	5	6	7	8
Время, ч:мин	45:56	46:55	23:14	15:42	11:51	9:30	8:01	6:49
Ускорение	1	0,98	1,98	2,93	3,88	4,83	5,73	6,74
Эффективность	1	0,49	0,66	0,73	0,78	0,81	0,82	0,84

Было проведено исследование ускорения и эффективности использования процессоров. Результаты представлены в таблице 3.2. Значение параметра  $G$  при этом было равно 5.

В данной главе предложен основанный на схеме ветвей и границ параллельный алгоритм оптимального выбора АО ХТС. Алгоритм был реализован в виде параллельной программы на языке программирования C++ с использованием библиотеки MPI. Разработанная программа показала ускорение, близкое к линейному, обладает достаточно высокой масштабируемостью, что хорошо соотносится с экспериментальными результатами, полученными другими авторами при решении аналогичных задач (например, [29]). Известным недостатком применения парадигмы мастер-работник является то, что мастер-процесс становится «узким» местом программы при большом числе обслуживаемых им рабочих процессов. Однако в данном случае этого не происходит из-за небольшого числа узлов на кластере (как видно из табл. 3.2, эффективность использования процессоров возрастает). Таким образом, параллельный вариант алгоритма выбора оптимального аппаратного оформления позволяет значительно сократить время расчёта по сравнению с последовательным вариантом и повысить качество проектных решений за счёт получения глобального оптимального решения. Планируется провести исследования, связанные с анализом масштабируемости алгоритма, на вычислительном кластере с большим количеством процессоров.

#### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные особенности многоассортиментных химических производств (МХП).
2. Сформулируйте задачу выбора аппаратного оформления (АО) химико-технологических систем (ХТС).

3. К какому классу оптимизационных задач относится задача выбора АО ХТС?
4. Сформулируйте общую идею метода ветвей и границ.
5. Назовите области применения метода ветвей и границ.
6. Какой структурой обладает дерево поиска при использовании метода ветвей и границ: строго определённой или нерегулярной и заранее непредсказуемой?
7. Каковы основные отличия между статическим и динамическим подходами к разбиению дерева на поддеревья при параллельном обходе дерева поиска?
8. Назовите основные особенности парадигмы мастер-работник (*Master-Worker Paradigm, Master-Slave Paradigm*).
9. Каким известным недостатком обладает парадигма мастер-работник?
10. Что характеризуют термины «ускорение работы параллельной программы» и «эффективность использования процессоров»?

### Список литературы к главе 3

1. **Мальгин, Е. Н.** Методика определения аппаратного оформления многопродуктовых химико-технологических систем / Е. Н. Мальгин, С. В. Карпушкин, А. Б. Борисенко // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 5. – С. 43 – 50.
2. **Карпушкин, С. В.** Модернизация химико-технологических систем действующего многоассортиментного производства при изменении планов выпуска продукции / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – № 1. – С.26–32.
3. **Кафаров, В. В.** Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности / В. В. Кафаров, В. В. Макаров. – М. : Химия, 1990. – 320 с.
4. **Мальгин, Е. Н.** Проектирование многоассортиментных химических производств: определение аппаратного оформления химико-технологических схем / Е. Н. Мальгин, С. В. Карпушкин, А. Б. Борисенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 272 – 282.
5. **Карпушкин, С. В.** Методика оценки эффективности аппаратного оформления химико-технологических систем многоассортиментного производства / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 5(67). – С. 96 – 105.

6. **Борисенко, А. Б.** Применение метода ветвей и границ для оптимального выбора аппаратурного оформления химико-технологических систем / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Вычислительные технологии. – 2012. – № 5. – С. 35 – 43.

7. **Search** for Optimal Design of Multiproduct Batch Plants under Uncertain Demand using Gaussian Process Modeling Solved by Heuristics Methods / Y. E. Hamzaoui, J. A. Hernandez, M. A. Cruz-Chavez, A. Bassam // Chemical Product and Process Modeling. – 2010. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 1934 – 2659.

8. **Mixed-integer** nonlinear programming optimization strategies for batch plant design problems / A. Ponsich, C. Azzaro-Pantel, S. Domenech, L. Pibouleau // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2007. – Vol. 46, N 3. – P. 854 – 863.

9. **Lin, X.** Synthesis and Scheduling of Multipurpose Batch Plants via an Effective Continuous-Time Formulation / X. Lin, C. A. Floudas // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2001. – Vol. 25. – P. 665 – 674.

10. **Борисенко, А. Б.** Синтез аппаратурного оформления многоассортиментных химико-технологических систем : дис. ... канд. техн. наук. / А. Б. Борисенко. – Тамбов, 2000. – 157 с.

11. **Voudouris, V. T.** MILP model for scheduling and design of a special class of multipurpose batch plants / V. T. Voudouris, I. E. Grossmann // Computers & Chemical Engineering. – 1996. – Vol. 20, N 11. – P. 1335 – 1360.

12. **Applications** and algorithms for mixed integer nonlinear programming / S. Leyffer, J. Linderoth, J. Luedtke, A. Miller, T. Munson // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. – Vol. 180, N 1. – P. 12 – 14.

13. **Brassard, G.** Fundamentals of Algorithmics / G. Brassard, P. Bratley. – London : Prentice Hall, 1996.

14. **Sparrow, Robert E.** The Choice of Equipment Sizes for Multiproduct Batch Plants. Heuristics vs. Branch and Bound / Robert E. Sparrow, Graham J. Forster, David W. T. Rippin // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 1975. – Vol. 14, N 3. – P. 197 – 203.

15. **Воеводин, В. В.** Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

16. **Посыпкин, М. А.** Архитектура и программная организация библиотеки для решения задач оптимизации методом ветвей и границ на многопроцессорных вычислительных комплексах / М. А. Посыпкин // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2006. – Т. 25, № 4. – С. 18 – 25.

17. **Посыпкин, М. А.** Комбинированный параллельный алгоритм решения задачи о ранце / М. А. Посыпкин, И. Х. Сигал // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 4. – С. 50 – 58.

18. **Bouziane Hinde Lilia.** Extending software component models with the master-worker paradigm / Bouziane Hinde Lilia, Christian P'erez and Thierry Priol // Parallel Computing. – 2010. – Vol. 36. – Issue 2-3. – P. 86 – 103.

19. **A parallel branch-and-cut approach for detailed placement** / Stephen Cauley, Venkataramanan Balakrishnan, Y. Charlie Hu and Northwestern Ave // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES). – 2011. – Vol. 16. – Issue 2. – P. 18:1–18:19.

20. **Balanced Multi-process Parallel Algorithm for Chemical Compound Inference with Given Path Frequencies** / Jiayi Zhou, Kun-Ming Yu, Chun Yuan Lin, Kuei-Chung Shih and Chuan Yi Tang // Lecture Notes in Computer Science. – 2010. – Vol. 6082. – P. 178 – 187.

21. **Малыгин, Е. Н.** Математическая модель функционирования многопродуктовых химико-технологических систем / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, А. Б. Борисенко // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – Т. 39, № 4. – С. 455 – 465.

22. **Алгоритмы: построение и анализ** / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2011. – 1296 с.

23. **Кнут, Д. Э.** Искусство программирования. Т. 1. Основные алгоритмы / Д. Э. Кнут. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2009. – 720 с.

24. **Introduction to Parallel Computing, Design and Analysis of Algorithms** / Grama A., Gupta A., Karypis G. and Kumar V. Addison-Wesley, 2003. – 856 p.

25. **Посыпкин, М. А.** Исследование алгоритмов параллельных вычислений в задачах дискретной оптимизации ранцевого типа / М. А. Посыпкин, И. Х. Сигал // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – Т. 45, № 10. – С. 1801 – 1809.

26. **Тимошевская, Н. Е.** Параллельные методы обхода дерева / Н. Е. Тимошевская // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16, № 1. – С. 105 – 114.

27. **Тимошевская, Н. Е.** Разработка и исследование параллельных комбинаторных алгоритмов / Н. Е. Тимошевская // Вычислительные методы в дискретной математике. – 2009. – № 2. – С. 96 – 103.

28. **Message Passing Interface Forum Official MPI (Message Passing Interface) standards documents, errata.** – <http://www.mpi-forum.org/>.

29. **Gendron, B.** Parallel branch-and-bound algorithms: Survey and synthesis / B. Gendron, T. G. Crainic // Operations Research. – 1994. – Vol. 42, N. 6. – P. 1042 – 1066.

## Глава 4

# AUTOMATED SYNTHESIS OF WATER TREATMENT STAGES IN SYSTEMS OF CIRCULATING WATER SUPPLY AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

---

Many industrial branches nowadays use water in manufacturing the target product. After utilization in technological processes or household and practical use, it loses its original quality and adversely affects the sanitary state of the natural water bodies where the wastewater is discharged. One of the most water-intensive industries in the economy and the greatest "generator" of polluted wastewater is the chemical industry. In order to exclude the pollution of water bodies with the discharge of contaminating agents in industrial wastewater, closed water utilization schemes must be developed and phased in. The establishment of such schemes will make it possible to drastically reduce the industrial consumption of fresh water, using it only for drinking and household purposes and for the resupply and replacement of losses in circulating water systems, and in order to decrease or even exclude the losses of valuable material and material with sewage. At the same time, the effective and faultless operation of such systems is only possible when the equipment set is properly selected with allowance made for all the production and environmental requirements. The analysis of relevant publications [1 – 9] shows that they mostly focus on the issues connected with the hardware implementation of the well-known process flow schemes, and pay much less attention to the choice of the process flow scheme of water treatment most suitable to the specific operating conditions and user-defined criteria.

In this connection, the purpose of this work is to develop a procedure of automatic synthesis for water treatment stages, which determine the operation efficiency of the system of circulating water supply (CWS) of an industrial enterprise.

The CWS system is a two-part assembly. The first part comprises output stages of the target product whose processing procedures use water for heating or cooling of the equipment (the reaction mass in it). The second part comprises the rehabilitation of water consumer characteristics and its supply to the basic process flow scheme.

The water treatment stages include the stages of purification, cooling (heating), addition (whenever necessary), and pumping of water. Fig. 4.1 shows the possible design variants of water treatment stages implementing various technological processes; fig. 4.2 presents possible variants of a water treatment scheme for the CWS system.

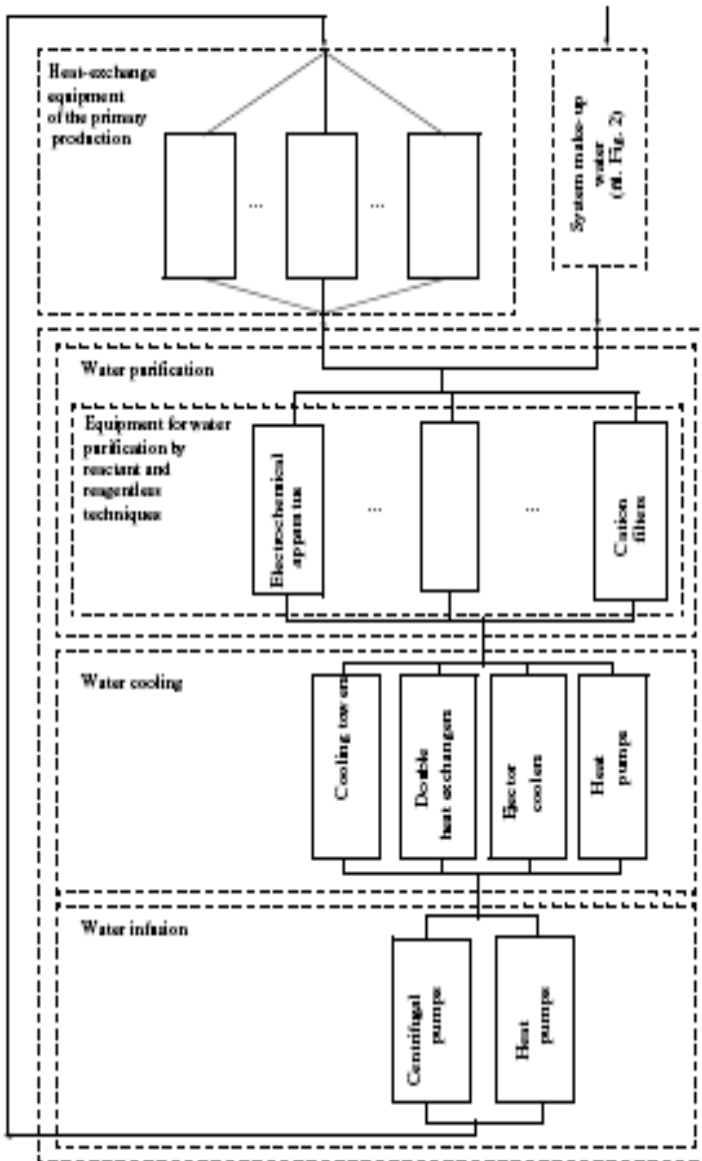


Fig. 4.1. Possible configuration variants of the system of circulating water supply



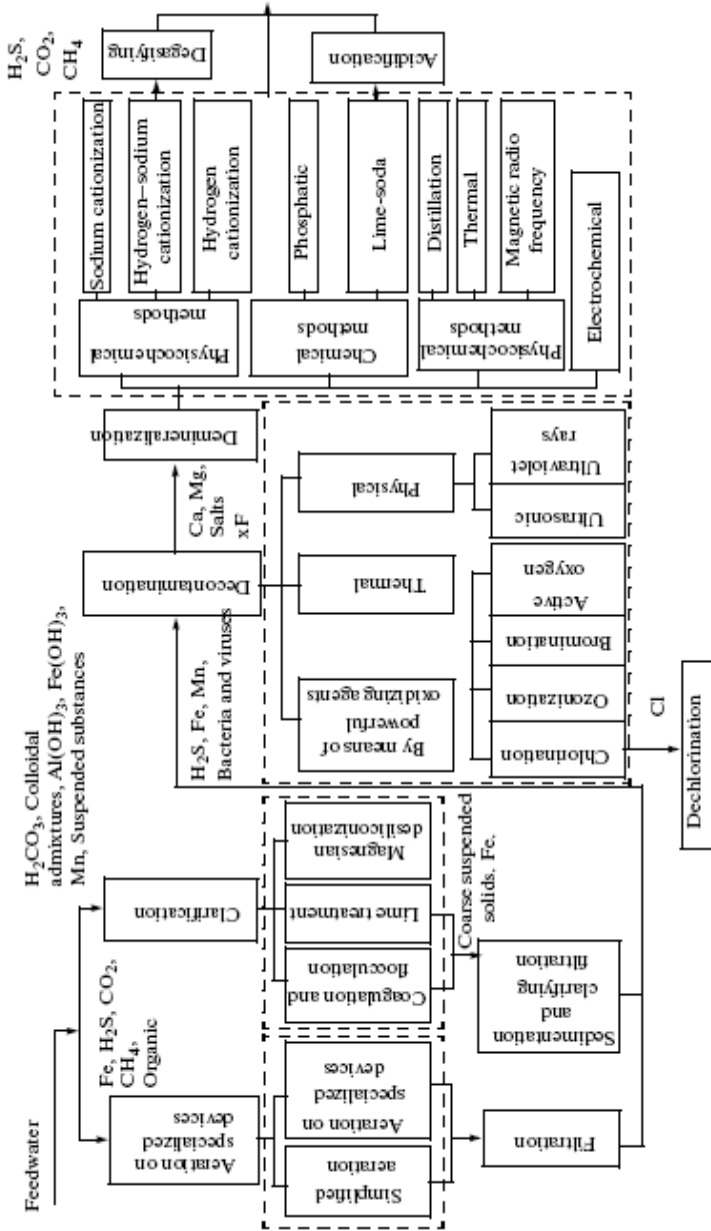


Fig. 4.2. Possible variants of a water treatment configuration for the system of circulating water supply

## 4.1. PROBLEM STATEMENT

Generally, the problem about the automated synthesis of water treatment stages for closed CWS systems implies structuring the process flow scheme, and selecting the type, quantity, and principal geometrical dimensions of the equipment for every stage of the selected configuration.

The input data, therefore, are the productivity of the process flow scheme for the output of the target product, pressure head in the scheme, initial and outlet temperature of the target product and of the circulating water, heat exchange surface, characteristic of the base apparatus, target (original) products and circulating water (viscosity, density, coefficient of heat conductivity, specific heat capacity, pH, total hardness, alkalinity, content of calcium, iron, sulphates, total salt content), the configuration of the basic part of the CWS system, and diameters of the pipelines.

In a formalized form, the problem consists in obtaining the minimum of the objective function

$$I_{\text{opt}} = \min_{w \in W} F_w \quad (4.1)$$

subject to the satisfaction of the constraints

$$T_{\text{out}} \leq T^{\text{lim}}; \quad C_{\text{out}} \leq C^{\text{lim}} \quad (4.2)$$

and operators representing the following mathematical models for the decision support in developing the variants of

- structural arrangement of the supporting unit of the CWS system:

$$\Psi : G \times T_{\text{in}} \times T_{\text{out}} \times T^{\text{lim}} \times C_{\text{in}} \times C_{\text{out}} \times C^{\text{lim}} \rightarrow K, \quad (4.3)$$

- apparatus implementation of the structural arrangement of the supporting unit of the CWS system

$$\Omega : G \times T_{\text{in}} \times T_{\text{out}} \times T^{\text{lim}} \times C_{\text{in}} \times C_{\text{out}} \times C^{\text{lim}} \times k_{\text{opt}} \rightarrow R. \quad (4.4)$$

Problem (4.1) – (4.4) is combinatorial. With such a statement, its solution cannot be obtained, because the space of the system variables is high-dimensional, it is very difficult to construct mathematical models of technological processes for each stage, etc. Therefore, structurally, the synthesis of the CWS system consists in the successive consideration of the following two subproblems of lower dimensionality, which, in addition, are of independent significance in the design process:

- developing structural variants of the process flow schemes for the supporting unit of the CWS system and selection of the optimal variant;
- calculation of the apparatus implementation for the selected process flow scheme.

If no decision is made at the second stage, the decision-maker selects another variant for solving the problem of the first stage. The selection is based on the rules considered below.

#### 4.1.1. PROBLEM OF SELECTING THE STRUCTURE OF THE PROCESS FLOW SCHEME

The problem of selecting the process flow scheme of the supporting unit of the CWS system out of a set of variants on the basis of mathematical optimality criteria is seldom successfully solved due to the complexity of conditions imposed on the system and a great number of evaluation criteria. The most advanced method for the solution of this problem is the application of expert systems [1]. In order to select an optimal variant of the process structure out of numerous available ones, evaluation criteria must be clearly defined, which should be arranged in three groups, i.e., costs, reliability, and safety. It is recommended in this case to use the integrated assessment implying the weight distribution between these summing groups, taking into account the specific conditions.

In this work, the following problem statement is proposed for the development of a structural variant of the process flow scheme: such a succession of process stages must be obtained that when the conditions are fulfilled

$$T_{\text{out}} \leq T^{\text{lim}}; \quad C_{\text{out}} \leq C^{\text{lim}} \quad (4.5)$$

of the operator representing the mathematical model of decision support in developing variants of structural arrangement of the supporting unit of the CWS system (4.3), the following statement will hold true:

$$k_{\text{opt}} = \arg \min_{k \in K} Q_1(k). \quad (4.6)$$

Since it is proposed to use a multicriteria choice of the optimum structural variant of the process flow scheme, the problem arises of selection of methods for the normalization of the set of criteria and their ranking, as well as the technique for multicriteria choice. In the present study, the optimality criterion  $Q_1$  is a sum of weighted relative losses with respect to the criterion of the reduced COGS for the supporting CWS unit, the criterion of the system's operating reliability, processability criterion, and the safety criterion of the process [2]. The integral criterion  $Q_1$  is

$$Q_1(k) = \sum_{i=1}^4 (\rho_i \omega_{1i}(k)). \quad (4.7)$$

Here,  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  are the weighting coefficients

$$\rho = \{\rho_i\} = \{\rho_i : \rho_i > 0, i = 1, \dots, 4, \sum_{i=1}^4 \rho_i = 1\}, \quad (4.8)$$

where  $\rho_i \omega_{1i}(k)$  are the weighted losses by the  $i$ -th criterion;  $\omega_{1i}(k) = \omega_{1i}(F_{1i}(k))$  ( $i = 1, \dots, 4, k \in K$ ), are monotonic functions trans-

forming every objective function  $F_{1i}(k)$  into the dimensionless form;  $F_{11}(k)$  are economic criteria including the system's aggregate reduced costs of goods sold (COGD);  $F_{12}(k)$  is the criterion of the system's operating reliability; and  $F_{13}(k)$ , and  $F_{14}(k)$  are the processability criterion and safety criterion, respectively. Here, we find the minimum for the function  $F_{11}(k)$  and the maximum for the functions  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$  and  $F_{14}(k)$ .

The functions  $\omega_{1i}(k)$  ( $k \in K$ ) have the form

$$\omega_{11}(k) = \frac{F_{11}(k) - F_{11}^0}{F_{11}^{\max} - F_{11}^0}; \quad (4.9)$$

$$\omega_{12}(k) = \frac{F_{12}(k) - F_{12}^0}{F_{12}^0 - F_{12}^{\min}}; \quad (4.10)$$

$$\omega_{13}(k) = \frac{F_{13}(k) - F_{13}^0}{F_{13}^0 - F_{13}^{\min}}; \quad (4.11)$$

$$\omega_{14}(k) = \frac{F_{14}(k) - F_{14}^0}{F_{14}^0 - F_{14}^{\min}}. \quad (4.12)$$

Here,  $F_{11}^{\max}$  is the maximum value of the minimized function  $F_{11}(k)$  ( $k \in K$ ) on the set of admissible  $K$ ;  $F_{12}^{\min}$ ,  $F_{13}^{\min}$ ,  $F_{14}^{\min}$  is the minimum value of the maximized functions  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$  ( $k \in K$ ) on the set of admissible  $K$ ;  $F_{11}^0$ ,  $F_{12}^0$ ,  $F_{13}^0$ ,  $F_{14}^0$  are the optimum values of the objective functions of  $F_{11}(k)$ ,  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$  ( $k \in K$ ) respectively, on the set of admissible  $K$ . The values  $\omega_{1i}(k)$  ( $i=1, \dots, 4, k \in K$ ) are in the range from 0 to 1.

A trade-off alternative ( $k \in K$ ), is to be found, which would not be an optimum for any of the objective functions  $F_{11}(k)$ ,  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$ , but will be acceptable for the integral criterion  $Q_1(k)$ . The trade-off solution in a classical variant implies the equality of irreducible weighted losses

$$\rho_i \omega_{1i}(k) = d_0^{\min}, \quad i = \overline{1, 4}.$$

Since in this study the optimum solution is sought by means of an exhaustive search method, it is not necessary to attain the equality of the weighted losses  $\rho_i \omega_{1i}(k)$ . In order to choose the unique solution of a

problem, which involves making a complex decision, it is necessary to specify the weighting coefficients  $\rho_i (i=1,4)$  satisfying relation (4.8) and reflecting the relative importance of the objective functions,  $F_{11}(k)$ ,  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$ , ( $k \in K$ ) The most efficient in this case are ranking and score methods [3] (the latter one is used in this work).

**Economic Criterion.** In building a database on water treatment methods, the implementation of every stage is given an (aggregate) estimate of the reduced costs. This criterion does not yield an accurate value of costs, because at this stage of the design, information is only available about the water treatment stages, on the basis of which (with the help of expert evaluation) it is possible to approximately assess the implementation cost of a particular configuration of the supporting unit of the CWS system. The components of the criterion  $F_{11}(k)$ : are

$$F_{11} = \sum_{i=1}^{N_k} S_{ik}(G) + \sum_{i=1}^{N_k} S'_{ik}(G, m_{ik}), \quad k \in K. \quad (4.13)$$

It should be noted that in implementing individual process stages, different consumable materials can be used. For example, in using chelation water treatment, the following chelates (complexones) can be used: oxyethylidenediphosphonic acid, nitrile-trimethyl-phosphonic acid, etc.

**Criterion of Equipment Reliability.** The reliability indicator is defined as the ability of equipment to perform its designed functions maintaining with time the values of the prescribed performance indicators within the established range corresponding to the modes and conditions of the equipment operation, servicing, and maintenance. Reliability is a complex property, depending on the intended use and operating conditions, which can include faultless (failure-free) operation, maintainability, and storageability separately or in a certain combination of these properties both for the equipment as a whole or its separate parts

$$F_{12} = \max_K \prod_{i=1}^{N_k} Pt_{ik}, \quad k \in K. \quad (4.14)$$

Data on the reliability indicators for particular types of equipment for individual types of equipment are presented in table 4.1.

**Processability Criterion.** Processability is convenience and ease of process implementation is the possibility to execute a process (i.e., to get the targeted result) with the least labor input

$$F_{13} = \max_K \prod_{i=1}^{N_k} Te_{ik}, \quad k \in K. \quad (4.15)$$

The data on processability indicators for individual types of equipment are presented in table 4.1.

**Safety Criterion.** This indicator is estimated on the basis of other object components, making it possible to calculate the probability of the equipment causing fire or dangerously explosive events and is

$$F_{14} = \max_K \prod_{i=1}^{N_k} (1 - Pb_{ik}), \quad k \in K. \quad (4.16)$$

#### 4.1. A fragment of a database on water treatment processes

Stage	Method	Equipment	Equipment reliability (0 – 1)	Processability, score (0 – 10)	@Пожаро-взрыво-опасность (0 – 1)
Water purification	Electrochemical	APU-150	0,78	6,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$
	Acoustic	"Water King 1"	0,68	5,2	$2,6 \cdot 10^{-4}$
		@ "Акустик-Т2"	0,73	5,3	$3,1 \cdot 10^{-4}$
		"Есоаoustic"	0,7	5,3	$3,0 \cdot 10^{-4}$
		"USP-300"	0,63	4,8	$2,7 \cdot 10^{-4}$
	Magnetic	"ActiMAG C156"	0,86	8,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$
	Chelation	"Complexone-6"	0,82	4,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$
		"ADK-08 (07)"	0,6	7,8	$2,3 \cdot 10^{-4}$
		"IZh-25"	0,83	4,9	$2,7 \cdot 10^{-4}$
		"Impulse-2"	0,78	6,8	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Cation filters (units)	"D-V4450"	0,86	5,8	$1,7 \cdot 10^{-4}$	
Water cooling	Cooling towers	"Rosinka-5"	0,80	8,5	$2,5 \cdot 10^{-4}$
		electric-contact manometer	0,85	7,9	$2,3 \cdot 10^{-4}$
		"GMVB-10"	0,79	8,7	$2,4 \cdot 10^{-4}$
		"VODEH-700"	0,81	7,4	$3,1 \cdot 10^{-4}$
		"GM-2"	0,84	7,9	$2,2 \cdot 10^{-4}$
	Double heat exchangers		0,84	8,3	$2,7 \cdot 10^{-4}$
	Ejector coolers	"OVE-25-03-13"	0,79	7,9	$2,6 \cdot 10^{-4}$
		"ROSA"	0,83	8,1	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Heat pumps		0,87	7,4	$1,5 \cdot 10^{-4}$	
Pumping	Pumps	Centrifugal pumps	0,82	6,0	$4,8 \cdot 10^{-4}$
		Turbine pumps	0,81	6,0	$4,5 \cdot 10^{-4}$

The data on the probability of fire (explosion) risk occurrence for individual types of equipment are presented in table 4.1.

Using the experience accumulated in designing processes of purification, cooling (heating) of water, etc., in the form of a database, and setting targets such as, for instance, a high quality of water in the system, we can find a combination of process stages securing the achievement of this target by means of the decision-making mechanism. A fragment of such a database is presented in table 4.1. The base includes rules, empirical knowledge, and general data, which specialists must have.

The formalized descriptions of information arrays, including data required for the solution of the problems mentioned above call for the creation of a structured database. The data structure (format) for the considered object domain is represented by a set of information-logical models (ILM) and production models (PM) of decision support. In the construction of such models, data normalization requirements must be satisfied and the models themselves must be represented in a canonical form.

In the general form, an ILM of decision support for selecting a process flow configuration of water treatment stages and the choice of a suitable apparatus implementation is a union of data sets and links between them written in the form of rules. A separate production rule (PM) contained in the knowledge base consists of two parts, i.e., an antecedent and a consequent. An antecedent is a hypothesis of a rule (condition part) and consists of elementary clauses connected with logical gates "and/or". The consequent (conclusion) comprises one or more clauses expressing either a certain fact or specification of a certain action to be executed.

Therefore, ILM can be represented by the following tuple:

$$M = \langle D, P \rangle, D = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_N), P = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_S),$$

where M is the ILM operator,  $d_1, \dots, d_N$  is a set of ILM data, and  $p_1, \dots, p_S$  is a set of rules.

In turn, the rules in the model are structures of the type "if...condition then ... consequence," have the following formalized description:

$$p^k : \left\{ \begin{array}{l} \text{if} \left\{ \left( \left( d_1^{k'} A_1 z_1^{k'} \right) \Lambda_1 \left( d_2^{k'} A_2 z_2^{k'} \right) \Lambda_2 \dots \Lambda_{n-1} \right) \right. \\ \left. \left( d_n^{k'} A_n z_n^{k'} \right) \right\} \\ \text{then} \left( d_{1M}^k A_1' z_{1M}^k \right) \end{array} \right\},$$

where *if* designates the "if" condition; *then* denotes the consequence "then";

$A_i', A_i \in \{=, >, \geq, <, \leq\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  is an arithmetical operator;  $\Lambda_i \in \{\wedge, \vee\}$  is a

logical operator;  $d_n', d_{1m}''$  are data input and output of the model, respectively;  $Z^{k'} = \{z_1^{k'}, \dots, z_n^{k'}\}$  is the value range of the input data,  $d_n^{k'}$ ;  $z_1^{k''} \in \{z_{11}^{k''}, \dots, z_{1M}^{k''}\}$  is the value of the output data  $d_{1k}''$ ;  $n$  is the number of conditions, and  $k$  is the index of the PM rule.

We will consider a particular form of an ILM using the example of the selection of water treatment stages depending on the initial composition of water, i.e., "original water composition" and "water treatment technique." For this purpose, we will use a set of data about the state of the original (source) water  $S_{\text{water}}$  and possible purification techniques

$$S_{\text{water}} = \{S_{\text{water},1}, \dots, S_{\text{water},i}, \dots, S_{\text{water},I}\};$$

$$PR_{\text{water}} = \{pr_{\text{water},1}, \dots, pr_{\text{water},i}, \dots, pr_{\text{water},I}\}, i = \overline{1, I}.$$

Examples of such data are presented in tables 4.2, 4.3 and the examples of rules for the selection of a water treatment method depending on the original water composition are shown in table 4.4. By way of example, we will give here the content of rules 4, 5, and 6.

Rule 4: If  $S_{\text{water},9}$  = "total hardness not exceeding 40 mmol/L" and  $S_{\text{water},10}$  = "suspended solids 1,5 mg/l," and  $S_{\text{water},11}$  = "water color not exceeding 20 color degrees," and  $S_{\text{water},12}$  = "total iron not exceeding 0,05 mg/l" and  $S_{\text{water},13}$  = "total manganese not exceeding 0,05 mg/l" and  $S_{\text{water},14}$  = "borates (by  $\text{BO}_2$ ) not exceeding 3 mg/l" and  $S_{\text{water},15}$  = "bromine not exceeding 0,4 mg/l" and  $S_{\text{water},16}$  = "aluminum not exceeding 0,05 mg/l," then the water treatment technique  $pr_{\text{water},4}$  = "electrochemical method."

Rule 5: If  $S_{\text{water},17}$  = "alkalinity not exceeding 7 mmol/L" and  $S_{\text{water},18}$  = "pH not exceeding 8,5" and  $S_{\text{water},19}$  = "temperature not exceeding 130°C" and  $S_{\text{water},20}$  = "iron content not exceeding 0,5 mg/l," then the water treatment technique  $pr_{\text{water},5}$  = "chelation (phosphonates)."

Rule 6: If  $S_{\text{water},20}$  = "alkalinity of the additional (make-up) water not exceeding 3,5 mg meq/l" and  $S_{\text{water},21}$  = "evaporation coefficients not exceeding 1,5," then the water treatment technique  $pr_{\text{water},6}$  = "recarbonization by combustion gases."

By combining several processes stages characterized by different efficiency (for example, of water purification), an integrated system can be developed. First of all, feasible variants of the system's structure are selected using information about the parameters of the water fed to every process stage and about the connected stages. Then the optimum configuration of the supporting unit of the CWS system is selected on the basis of the estimated aggregate reduced costs, taking into account reliability, processability, and safety.



## 4.2. Water qualitative characteristics

No.	Qualitative characteristic of water
1	$S_{\text{water},1}$ = "content of suspended solids up to 100 mg/l"
2	$S_{\text{water},2}$ = "water color not exceeding 30 color degrees"
3	$S_{\text{water},3}$ = "permanganate oxygen consumed not exceeding 15 mg oxygen per liter"
4	$S_{\text{water},4}$ = "iron concentration in the water higher than 10 mg/l"
5	$S_{\text{water},5}$ = "increase pH value to make it higher than 6,8"
6	$S_{\text{water},6}$ = "permanganate oxygen consumed not exceeding 5 mg oxygen per liter"
7	$S_{\text{water},7}$ = "content of suspended solids not exceeding 8 mg/l"
8	$S_{\text{water},8}$ = "iron content not exceeding 0,3 mg/l"
9	$S_{\text{water},9}$ = "total hardness not exceeding 40 mmol/l"
10	$S_{\text{water},10}$ = "suspended solids not exceeding 1,5 mg/l"
11	$S_{\text{water},11}$ = "water color not exceeding 20 color degrees"
12	$S_{\text{water},12}$ = "total iron not exceeding 0,05 mg/l"
13	$S_{\text{water},13}$ = "total manganese not exceeding 0,05 mg/l"
14	$S_{\text{water},14}$ = "borates (by $\text{BO}_2$ ) not exceeding 3 mg/l"
15	$S_{\text{water},15}$ = "bromine not exceeding 0,4 mg/l"
16	$S_{\text{water},16}$ = "aluminium not exceeding 0,05 mg/l"
17	$S_{\text{water},17}$ = "alcalinity not exceeding 7 mmol/l"
18	$S_{\text{water},18}$ = "pH not exceeding 8,5"
19	$S_{\text{water},19}$ = "temperature not exceeding 130 degrees Celcius"
20	$S_{\text{water},20}$ = "alcalinity of the additional water not exceeding 3,5 mg meq/l"
21	$S_{\text{water},21}$ = "evaporation coefficients not exceeding 1,5"
22	$S_{\text{water},22}$ = "content of suspended solids not exceeding 50 mg/l"
23	$S_{\text{water},23}$ = "permanganate oxygen consumed not exceeding 8 mg/l"
24	$S_{\text{water},24}$ = "carbonate hardness not exceeding 7 mmol/l"
25	$S_{\text{water},25}$ = "total of chlorides and sulphates not exceeding 50 mg/l"
26	$S_{\text{water},26}$ = "iron content not exceeding 0,5mg/l"

A set of admissible variants of the process flow schemes of the CWS system can be developed on the basis of a heuristic algorithm. At first, the connection between the process stages capable of providing the required water characteristics is expressed in the form of rules as well as the connection between them at the input and output of the main equipment of the par-

tical stage and connections between the selected process stage, with its preceding stage and other similar dependences.

Since the dimensionality of the combinations set does not exceed 104, taking into account the operating speed of modern personal computers, the solution is reduced to the sequential search of all the possible combinations of configurations.

In developing the software for the solution of this subproblem, a provision is made for the decision-maker enabling him to preserve for the further consideration variants, for which the criterion  $Q_1$  satisfies the condition

$$Q_1^o \tilde{k}_1 \leq Q_1^{\text{opt}}, \quad \tilde{k}_1 < 1, \quad o = 1, \overline{\tilde{O}_1}, \quad (4.17)$$

where  $\tilde{k}_1$  is the coefficient expanding the set of the problem solutions used in the further consideration (set by the decision-maker);  $Q_1^o$  is the value of the problem criterion for the  $o$ -th variant of the solution, and  $\tilde{O}_1$  is the set of admissible solutions.

#### 4.1.2. PROBLEM OF EQUIPMENT SELECTION

The next step in synthesizing water treatment stages of the CWS system is the calculation and selecting the normal sizes of equipment for the chosen process flow scheme.

The apparatus sizes of most equipment types are standardized (for instance cooling towers, pumps, etc.). Ejector coolers, double heat exchangers, and heat pumps are made to order by manufacturing plants.

This problem is formulated in the following way: for each stage of the supporting unit of the CWS system a special type, geometrical dimensions, and a number of devices must be determined for every type of equipment providing the system's normal functioning mode

$$r_{\text{opt}} = \underset{r \in R}{\operatorname{argmin}} Q_2(r), \quad (4.18)$$

subject to the fulfillment of the conditions

$$T_{\text{out}} \leq T^{\text{lim}}, \quad C_{\text{out}} \leq C^{\text{lim}}, \quad (4.19)$$

of the operator representing the mathematical model for the decision support in developing variants of the apparatus implementation of the process flow configuration for the supporting unit of the CWS system (4.4). The criterion components are

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{Nt} n_i \alpha_i V_i^{\beta_i} + \sum_{i=1}^{Nt} \sum_{l=1}^{Nl} m'_{il} s t_l. \quad (4.20)$$

The mathematical model of decision-making about the choice of the system's apparatus implementation for individual types of equipment includes the dependences of the calculation of the apparatus volume and the obtained parameters of the equipment based on the set-up [5 – 9, etc.]. In developing the software for the solution of the problem on the design of a CWS system, all the methods for the calculation of individual equipment types are formulated as bases on axial modules.

Since there are but a few numbers of nominal sizes for standard apparatuses of every type (e.g., there are only five standard sizes for cooling towers "Rosinka"), in calculating the required number of apparatuses at each stage of the CWS system it is feasible to use the exhaustive search method. Thereby, the global minimum of the problem criterion (reduced cost) is achieved.

### 4.3. Water treatment methods

No.	Operation
1	$pr_{\text{water},1}$ = "filtering through two-layer clarifying filters"
2	$pr_{\text{water},2}$ = "aeration by means of special facilities"
3	$pr_{\text{water},3}$ = "Sodium cycle"
4	$pr_{\text{water},4}$ = "electrochemical method"
5	$pr_{\text{water},5}$ = "chelation (phosphonates)"
6	$pr_{\text{water},6}$ "recarbonization by combustion gases"
7	$pr_{\text{water},7}$ = "filtering through one-layer filters"
8	$pr_{\text{water},8}$ = "magnetic method"
9	$pr_{\text{water},9}$ = "simplified aeration"
10	$pr_{\text{water},10}$ = "acoustic method"

### 4.4. Examples of rules for selecting a water treatment method depending on the original water content

No.	Condition	Consequence
1	$S_{\text{water},1} \& S_{\text{water},2} \& S_{\text{water},3}$	$pr_{\text{water},1}$
2	$S_{\text{water},4} \& S_{\text{water},5}$	$pr_{\text{water},2}$
3	$S_{\text{water},6} \& S_{\text{water},7} \& S_{\text{water},8} \& S_{\text{water},9}$	$pr_{\text{water},3}$
4	$S_{\text{water},6} \& S_{\text{water},10} \& S_{\text{water},11} \& S_{\text{water},12} \& S_{\text{water},13} \& S_{\text{water},14} \& S_{\text{water},15} \& S_{\text{water},16} \& S_{\text{water},17}$	$pr_{\text{water},4}$
5	$S_{\text{water},17} \& S_{\text{water},18} \& S_{\text{water},19} \& S_{\text{water},26}$	$pr_{\text{water},5}$
6	$S_{\text{water},20} \& S_{\text{water},21}$	$pr_{\text{water},6}$
7	$S_{\text{water},11} \& S_{\text{water},22} \& S_{\text{water},23}$	$pr_{\text{water},7}$
8	$S_{\text{water},8} \& S_{\text{water},24} \& S_{\text{water},25}$	$pr_{\text{water},8}$

## 4.2. EXAMPLE OF A PROBLEM SOLUTION

An information system has been developed for the solution of problems (4.5) – (4.16) and (4.18) – (4.21), which includes a database of equipment used for CWS systems and software enabling the optimal choice of the CWS system configuration and equipment with the specified characteristics.

The procedure for the automated synthesis of water treatment stages of a CWS system for industrial enterprises was tested during the modernization of CWS systems for several industrial enterprises of the Tambov region, and demonstrated high efficiency based on the analysis of numerous possible solutions, and the resulting choice of the variant optimum from the viewpoint of the selected criteria. In particular, on its basis, a configuration was selected for OJSC "Pigment" (Tambov) including the following equipment: an apparatus for electrochemical water purification "AGTU-150," cooling tower "Rosinka," centrifugal pump 150-125-315 (pump discharge of 200 m<sup>3</sup>/h, pressure head of 32 m completed with a motor with the capacity of 30 kW/1500) with the following original water characteristics: pH – 7,8, chlorides – 269 mg/l, sulphates – 332 mg/l, hardness – 9,2 meq/l, iron – 3,2 mg/l, suspended solids – 16 mg/l, and water transparency – 20 cm.

The procedure proposed here of the automated synthesis of the process flow scheme for water treatment stages of the systems of circulating water supply at industrial enterprises using the theory of expert systems construction under a great number of possible configurations makes it possible to choose a suitable water treatment system for specific operating conditions and criteria prespecified by the consumer.

## 4.3. NOTATION

$C_{in}, C_{out}$  and  $C^{lim}$  is a set of concentrations of the impurity content in water at the inlet and outlet of the production scheme of the target product and their maximum permissible levels;

$F_w$  is the integral criterion for the  $w$ -th variant of the CWS system;

$G$  is the water consumption;

$K$  is the set of variants of structural arrangement of the CWS system;

$k_{opt}$  is the optimal variant of the process flow scheme of the supporting unit of the CWS system;

$m_{ik}$  is the unit consumption of materials required for implementing water treatment processes at the  $I$ -th stage for the  $ITH$  variant of the CWS system;

$m'_{il}$  is the unit consumption of the  $L$ -th material required for the implementation of water treatment processes at the  $I$ -th stage;

$N_k$  is the number of stages for the  $k$ -th variant of the CWS system;

$Nt$  is the number of scheme stages;

$N_l$  is the number of types of consumable materials;

$n_i$  is the number of basic apparatuses at the  $I$ -th stage;

$Pb_{ki}$  is the statistical probability of fire (explosion) risk at the  $i$ th stage of  $k$ th variant of the CWS system;

$Pt_{ki}$  is the probability of the equipment faultless operation at the  $i$ th stage of the  $k$ th variant of the CWS system;

$Q_1, Q_2$  are the respective criteria for the problems of selecting the structure of the process flow scheme and equipment of the CWS system;

$R$  is the set of variants of the apparatus implementation of the supporting unit of the CWS system;

$r_{opt}$  is the optimum variant of the apparatus implementation of the CWS system;

$S_{ik}(G)$  are the aggregate capital costs (the cost of the basic and ancillary equipment) of implementing the processes at the  $i$ th stage of  $k$ th variant of the water CWS system;

$S'_{ik}(G, m_{ik})$  are the aggregate operating costs of the implementation of processes at the  $i$ th stage of the  $k$ th variant of the CWS system, including the price of the consumables (chelates, electricity, etc.);

$st_l$  is the cost of a unit of the  $l$  consumable;

$Te_{ki}$  is the processability of water treatment at the  $i$ th stage, taking into account the type of the process procedure and equipment with the respective consumable materials;

$T_{in}, T_{out}$  is the aggregate of temperatures at the input, output, and the minimum allowed water temperature for manufacturing of the target product;

$V_i$  is the basic size of the apparatus at the  $i$ th stage;

$W = K \times R$  is the set of variants of the synthesis of the CWS system;

$w_{opt} = \{k_{opt}; r_{opt}\}$  is the optimum variant;

$\alpha_i, \beta_i$  are the coefficients taking into account the dependence of the apparatus costs at the  $i$ th stage on the material and the basic size;

$\rho_i$  are the weighting coefficients;

$\rho_i \omega_i(k)$  are the weighted losses by the  $i$ th criterion;

$\Psi, \Omega$  are the functional operators.

### Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные технологические процессы системы оборотного водоснабжения промышленного предприятия.

2. На какие подзадачи декомпозируется задача синтеза стадий водоподготовки замкнутых систем оборотного водоснабжения?

3. Каким образом учитываются отдельные критерии в общей задаче оптимального синтеза стадий водоподготовки замкнутых систем оборотного водоснабжения?

4. Каким образом задаются весовые коэффициенты для отдельных критериев в общей задаче оптимизации?
5. Что такое «взвешенные потери по  $i$ -му критерию»?
6. Что означают антецедент и консеквент при описании информационно-логических моделей?
7. Назовите достоинства и недостатки имитационных моделей.
8. Каким образом выполняется расчёт и выбор типовых размеров оборудования для выбранной технологической схемы?
9. Какие классы динамических систем можно моделировать с помощью системы SIMUL8?
10. В каких случаях при решении задач оптимизации целесообразно использовать метод полного перебора?

#### Список литературы к главе 4

1. **Merezhko, A. G.** Information System for Analysis and Modeling of Water Conditioning Technology / Merezhko, A. G. and Orlov, S. P. // Vestn. Samar. Gos. Tekh. Univ., Ser. Tekh. Nauki. – 2009. – Vol. 23, no. 1. – P. 233.
2. **Malygin, E. N.** Automated Synthesis of a System for Purification of Gas Emissions of Multiproduct Small-Scale Chemical Plants / E. N. Malygin, V. A. Nemtinov, Yu. Y. Nemtinova // Teor. Osn. Khim. Tekhnol., 2003. – Vol. 37, no. 6. p. 651 [Theor. Found. Chem. Eng. (Engl. Transl.), vol. 37, no. 6, p. 613].
3. **Mikhalevich, V. S.** Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh system / V. S. Mikhalevich // Computational Methods of Study and Design of Complex Systems). – Moscow : Nauka, 1982.
4. **Nemtinov, V. A.** Use of Fuzzy Set Theory and Expert Systems in Automated Selection of a Technical System Element / V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov, P. I. Pakhomov // Inform. Tekhnol. – 2009. – No. 10. – P. 34.
5. **Zhurba, M. G.** Vodospabzhenie: Proektirovanie sistem i sooruzhenii / M. G. Zhurba, L. I. Sokolov, Zh. M. Govorova // Water Supply: Design of Systems and Buildings. – Moscow : ASV, 2004.
6. **Nechaev, A. P.** Razvitie oborotnykh i besstochnykh sistem vodospabzheniya (Development of Recycling and Zero-Discharge / A. P. Nechaev // Water Supply Systems. – Moscow : Vserossiiskii Nauchno-issledovatel'skii Tsentr, 1980.
7. **Ponomarenko, V. S.** Gradirni promy-shlennykh i energeticheskikh predpriyatii: Spravochnoe posobie (Water-Cooling Towers for Industrial Enterprises and Power Plants: A Handbook) / V. S. Ponomarenko, Yu. I. Arefev. – Moscow : Energoatomizdat, 1998.
8. **Vodopodgotovka:** Spravochnik (Water Conditioning: A Handbook) / S. E. Belikov. – Moscow : Akva-Term, 2007.
9. **Ivanov, V. G.** Vodospabzhenie promyshlennykh pred-priyatii (Industrial Water Supply) / V. G. Ivanov. – St. Petersburg : S.-Peterburg. Gos. Univ. Putei Soobshcheniya, 2003.

## Глава 5

# REMOTE ACCESS INFORMATION SYSTEM FOR ANALYSIS OF CHEMICAL ENGINEERING OBJECTS

---

Traditional means of describing chemical engineering objects represent them in the form of process flow diagrams, drawings of equipment and its elements. But the most comprehensive analysis is only possible through a multilateral approach with the use of various information technologies, which allow looking beyond objects' visual image. This problem can be solved by integrated use of different programming environments: simulation modeling systems, geographic information systems (GIS), Internet technologies, etc.

### 5.1. INFORMATION-LOGICAL MODELS OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF CHEMICAL-TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Nowadays industrial objects are viewed as complex dynamic systems characterized with high levels of uncertainty of initial information and complexity of their behavior. Thus, simulation modeling can be used in order to find a solution to a wide range of problems associated with management of such systems, as well as to facilitate the work of operators and technicians.

In order to analyze technological processes of chemical engineering systems, it is expedient to use systems that imitate real processes.

A computer simulation model is a convenient aid for a system analyst who examines chemical engineering facilities. The main advantage of simulation is that experts can answer the question "what will happen, if ...", i.e. by conducting experiments with the model an expert can develop analysis strategy.

Information-logic models (ILM) are the core of simulation modeling; which they describe conditions of technological processes. In general, an ILM for decision-making support at chemical engineering objects' analysis is a union of data sets and relationships between them expressed in the form of rules. Each production rule (PR) contained in the knowledge base consists of two parts: antecedent and consequent. The antecedent is a hypothesis of a rule (conditional part) and consists of elementary sentences, connected by logical connectives "and, or." Consequent (inference) consists from one or more sentences that express some fact or reference to an action to be executed.

Thus, an ILM can be represented by the following tuple:

$$M = \langle D, P \rangle, \quad D = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_N), \quad P = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_S),$$

where  $M$  – ILM operator;  $d_1, \dots, d_i, \dots, d_N$  – ILM data set;  $p_1, \dots, p_j, \dots, p_S$  – set of rules.

ILM rules has the following structure: if ... (fulfillment of a condition), then ... (execution of a consequence) and can be represented as:

$$p^k : \left\{ \begin{array}{l} \text{if} \left( \left( d_1^{k'} A_1 z_1^{k'} \right) \Lambda_1 \left( d_2^{k'} A_2 z_2^{k'} \right) \Lambda_2 \dots \right. \\ \left. \Lambda_{n-1} \left( d_n^{k'} A_n z_n^{k'} \right) \right. \\ \left. \text{then} \left( d_{1m}^k A_1' z_{1M}^k \right) \right\},$$

where  $A_1 \dots A_i, A_i' \in \{=, <, \leq, \geq, >\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  – arithmetic operator;

$\Lambda_i \in \{\wedge, \vee\}$  – logic operator;  $d_n^{k'}, d_{1m}^k$  – input and output data;

$Z^{\hat{e}'} = \{z_1^{\hat{e}'}, \dots, z_n^{\hat{e}'}\}$  – set of input values ;  $d_n^{k'}; Z_1^k \in \{z_{11}^k, \dots, z_{1M}^k\}$  –

output values for  $d_{1m}^k$ ,  $n$  – number of conditions,  $k$  – PR index.

The use of ILM for analysis of chemical-processing objects is demonstrated on the example of determining production stages of a product depending on characteristics of its feedstock: "characteristics of raw materials and industrial products" – "production stage of a product"; followed by another example of determining the type of equipment: "production stage of a product"- "equipment type". Here we use a set of data about raw materials and industrial products  $S_{\text{prod}}$ , production stages  $St_{\text{prod}}$  and equipment  $Ob_{\text{prod}}$  (tables 5.1 – 5.5).

$$S_{\text{prod}} = \{s_{\text{prod}1}, \dots, s_{\text{prod}i}, \dots, s_{\text{prod}I}\}, \quad i = \overline{1, I};$$

$$St_{\text{prod}} = \{st_{\text{prod}1}, \dots, st_{\text{prod}j}, \dots, st_{\text{prod}J}\}, \quad j = \overline{1, J};$$

$$Ob_{\text{prod}} = \{ob_{\text{prod}1}, \dots, ob_{\text{prod}k}, \dots, ob_{\text{prod}K}\}, \quad k = \overline{1, K}.$$

For example, the first rule can be explained as:

Rule 1: if ( $S_{\text{prod},1}$  = "alkalescent medium reaction") and ( $S_{\text{prod},2}$  = "mass concentration of beta-naphthol 243 – 245 g/dm<sup>3</sup>") and ( $S_{\text{prod},3}$  = "mass concentration of sodium hydroxide 67 – 69 g/dm<sup>3</sup>") and ( $S_{\text{prod},4}$  = "mass concentration of diluted sulfuric acid solution 170 – 200 g/dm<sup>3</sup>") and ( $S_{\text{prod},5}$  = "mass fraction of sodium nitrite solution 25 – 40%"), then the production stage is  $St_{\text{prod},1}$  = "dissolution".



## 5.1. Characteristics of raw materials and products

Indicator name
$S_{\text{prod},1}$ = "alkalescent medium reaction"
$S_{\text{prod},2}$ = "mass concentration of beta-naphthol 243 – 245 g/dm <sup>3</sup> "
$S_{\text{prod},3}$ = "mass concentration of sodium hydroxide 67 – 69 g/dm <sup>3</sup> "
$S_{\text{prod},4}$ = "mass concentration of diluted sulfuric acid solution 170 – 200 g/dm <sup>3</sup> "
$S_{\text{prod},5}$ = "mass fraction of sodium nitrite solution 25 – 40%"
$S_{\text{prod},6}$ = "cooled to 0°C diluted sulfuric acid solution»
$S_{\text{prod},7}$ = "mass of excess sulfuric acid 30 – 33 kg of 100% mass of sulfuric acid"
$S_{\text{prod},8}$ = "hydrogen ion activity index 6,5 – 7 pH"
$S_{\text{prod},9}$ = "mass fraction sodium bisulfite 22,5%,"
$S_{\text{prod},10}$ = "hydrogen ion activity index 4,4 – 4,7 pH"
$S_{\text{prod},11}$ = "alkalescent medium reaction of obtained pigment suspension on brilliant yellow paper (9,0 – 9,5 pH) "
$S_{\text{prod},12}$ = "color of a complex compound – blue"
...

## 5.2. Production stages

Stage name
$St_{\text{prod},1}$ = "dissolution"
$St_{\text{prod},2}$ = "nitrosation"
$St_{\text{prod},3}$ = "combination"
...

## 5.3. Equipment

Equipment name
$Ob_{\text{prod},1}$ = "reactor for preparation of beta-naphthol sodium salt"
$Ob_{\text{prod},2}$ = "reactor for beta-naphthol nitrosation"
$Ob_{\text{prod},3}$ = "equipment for combination stage"
...

## 5.4. Examples of rules for determining production stages depending on raw materials and product characteristics

Condition	Inference
$S_{\text{prod},1} \ \& \ S_{\text{prod},2} \ \& \ S_{\text{prod},3} \ \& \ S_{\text{prod},4} \ \& \ S_{\text{prod},5}$	$St_{\text{prod},1}$
$S_{\text{prod},4} \ \& \ S_{\text{prod},7} \ \& \ S_{\text{prod},8} \ \& \ S_{\text{prod},9} \ \& \ S_{\text{prod},10}$	$St_{\text{prod},2}$
$S_{\text{prod},12} \ \& \ S_{\text{prod},13} \ \& \ S_{\text{prod},14}$	$St_{\text{prod},3}$
...	...

## 5.5. Examples of equipment selection rules depending on production stages

Condition	Inference
$St_{\text{prod},1}$	$Ob_{\text{prod},1}$
$St_{\text{prod},2}$	$Ob_{\text{prod},2}$
$St_{\text{prod},3}$	$Ob_{\text{prod},3}$
...	...

For example, the first and the second rules can be explained as:

Rule 1: if  $St_{\text{prod},1}$  = "dissolution", then equipment type is  $Ob_{\text{prod},1}$  = "reactor for preparation of beta-naphthol sodium salt".

Rule 2: if  $St_{\text{prod},2}$  = "nitrosation", then equipment type is  $Ob_{\text{prod},2}$  = "reactor for beta-naphthol nitrosation".

Implementation of an ILM with a system for modeling of dynamic processes, for example using SIMUL8, will become a tool for analysis of a chemical engineering object.

Different software types for modeling of chemical engineering facilities are integrated in use.

Nowadays geographic information systems are widely used worldwide in many fields of knowledge. This is due to the fact that GIS technologies are becoming a universal means for integration of various information technologies and construction of multi-function information and analytical systems. In our case GIS serves as a tool for building of a virtual visual image supplemented by automated information and analytical system resulting in construction of a single information space of the territory of an industrial enterprise and its spatial-temporal model. User can independently select objects (units) they wish to examine. Numerous and diverse information about an object can be obtained from information and analytical database at any time. This option can be successfully implemented by the means of Internet which can be useful for studying production processes, flow diagrams (eg. production of organic dyes) as for students in related disciplines as well as for operators in maintenance of such systems.

GIS is a base information system used for creation of a virtual model as it possesses a three-dimensional modeling tool that allows building a spatial model of an enterprise including all production units of its core products (organic dyes, additives to polymeric materials, etc.). Here user can choose any unit and find out production technology of related products.

One way to address the problem of displaying spatial models of geographically distributed sites is a technology developed by the authors which allows creating spatial models of chemical engineering facilities and building display and data exchange systems using the Internet (fig. 5.1). It should be noted that its implementation is based on freeware (table 5.6).



**Fig. 5.1. 3d-view of a spatial model of the enterprise's territory**

The strength of this approach is in three information fields which are used to display the data (fig. 5.2). User's screen is divided into three fields of information, each of which displays its own type of information:

- two-dimensional (three dimensional) model of an enterprise with a function of thematic layers;
- simulation model of a technological process under examination;
- Textual reference with production procedures.

## 5.6. Software

Name and version	Distribution terms	Official website
Openlayers 2.8 – visualization script of WMS and WFS layers on a single web-map which provides convenient calling	Freeware	<a href="http://openlayers.org">http://openlayers.org</a>
PHP – scripting language		<a href="http://www.php.net">http://www.php.net</a>
SIMUL8- modeling of chemical engineering systems	License agreement	<a href="http://www.simul8.com">http://www.simul8.com</a>

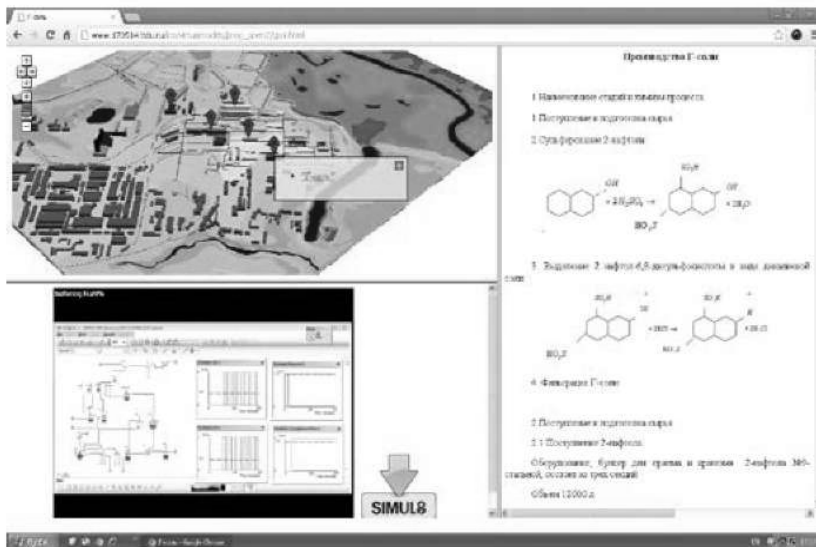


Fig. 5.2. The view of user's screen

JavaScript – OpenLayers library is used to display maps. It was recently expanded by a number of features that allowed us to use it for simple tasks as an alternative to complex geographical systems. The undeniable advantage of OpenLayers is an ability to be used by the client side as this does not overload the server. This software allows a developer to use data from different servers. For example, GoogleMaps, Yandex. Karty or other services that provide WMS (Web Map Service) data can be used at lower layer and specially designed maps, markers, arbitrary raster and vector elements can be used at the top layers.

The second information field is used to display a simulation model of operations at a chemical engineering object, developed with the use of SIMUL8.

This paper presents the technique of simulation modeling on the example of a multi-assortment chemical plant using SIMUL8 for operational management of production. The main stages of this method are: developing a digital library of technological regimes, creating graphic images of technological schemes' elements, development of a simulation model using SIMUL8.

The model reflects the production flowchart. Storages, pumps, filter-presses are modeled as "work centers". Measuring tanks, loading hoppers,

dispensers are modeled as "work entry points." Unloading tanks for the finished product are "work complete point." All equipment is connected accordance to production regulations. The data for the model is obtained from: production schedules, norms of technological regimes. Each value can be set as a fixed number or a random variable with a certain distribution law.

The proposed technique of simulation modeling of chemical engineering objects with the use of SIMUL8 allowed to create the library of intermediate products and dyes: red pigment 2C, bright red pigment 4G, chrome black pigment O, varnish PF-060, 3-oxychinaldine-4-carbohylic acid, 3-oxychinophthalon, acrylic MEC, etc.

If an end user has no installed SIMUL8, he has an option to view video demonstrations of the appropriate model.

The third information field is used to generate text information. Given that the system is based on a webserver, this field id used for database support through the PHP language (a general-purpose scripting language used extensively for development of web-based applications). There is an option to search and compare attribute information about an object. An embedded html page provides the user with text information together with graphic.

The layout of these three areas of information is done by the means of frames, supported by any Internet browser. The use of frames allows the user to change the size of information areas and enlarge the regions of particular interest.

As a result we create a web-service that combines a variety of technologies, which allows obtaining detailed information about an object and to present them in the most convenient way. The base software is free of charge and has low system requirements. An obvious advantage is the ability to view web-service in the internet browser without installing additional client software, with the exception of SIMUL8.

The developed approach to integrated use of different software types for modeling of chemical engineering objects is implemented in the form of a teaching subsystems which is used at FGBOU VPO Tambov State Technical University in the specialty 151701 – "Design of technological machines and systems" from the list of priority areas of modernization and technological development of Russian economy [<http://www.170514.tstu.ru/ios/>].

### **Вопросы для самопроверки**

1. Назовите области применения имитационных моделей.
2. Каково значение геоинформационных систем при исследовании химико-технологических объектов?

3. Что означают антецедент и консеквент при описании информационно-логических моделей?
4. Назовите достоинства и недостатки имитационных моделей.
5. Какие классы динамических систем можно моделировать с помощью системы SIMUL8?
6. Чем отличается база знаний от базы данных?

### Список литературы к главе 5

1. **Development** of an electronic graphical reference system of technological equipment and its use in education / S. Ya. Egorov, V. A. Nemtinov, V. G. Mokrozub, I. V. Milovanov // Information technologies. – 1999. – № 8. – P. 35 – 37.
2. **Nemtinov, B. A.** Prospects of using GIS-technologies in chemical industry / B. A. Nemtinov // Chemical industry. – 2004. – № 4. – P. 8 – 12.
3. **Nemtinov, V. A.** Development of information reference system using INTERNET / V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov, V. G. Mokrozub // Information technologies. – 1999. – № 7. – P. 37 – 39.
4. **Technique** of special modeling of territorially distributed objects using geo-informational systems / V. A. Nemtinov, A. M. Mananekov, V. V. Morozov, K. V. Nemtinov // Information technologies. – 2008. – № 8. – P. 23 – 25.
5. **Nemtinov, V. A.** Use of a system for modeling of dynamic processes in industrial production management / V. A. Nemtinov, Yu. V. Nemtinova, D. S. Russkikh // Chemical industry today. – 2007. – № 7. – P. 43 – 48.
6. **Nemtinova, Yu. V.** Simulation modeling of technological processes of chemical manufacturing / Yu. V. Nemtinova, A. A. Pchelintseva, A. A. Bubnov // Transactions of Tambov State Technical University. – 2011. – № 17. – P. 449 – 452

## Глава 6

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЛИТ ВУЛКАНИЗАЦИОННОГО ПРЕССА

---

Процесс изготовления резинотехнических изделий (РТИ) на вулканизационных прессах относится к классу энергоёмких производств, для которых затраты на электроэнергию сопоставимы с затратами на сырьё [1, 2]. В связи с этим важным резервом снижения энергопотребления при производстве РТИ является оптимальное управление переходными и стационарными режимами нагрева с учётом начальных условий и инерционности системы.

Работа вулканизационного пресса с индукционными нагревателями с позиции управления температурой плит имеет следующие особенности [2 – 4]:

- разогрев составляет значительную долю времени работы;
- качество процесса определяется температурным режимом вулканизации в течение всего цикла;
- процесс вулканизации относится к классу сложных химико-технологических процессов;
- основными возмущающими факторами при управлении процессом вулканизации являются колебания температуры окружающей среды и нестабильность теплофизических свойств;
- задаваемые температурные режимы существенно меняются в зависимости от состава и габаритов вулканизуемой среды;
- температурные режимы определяются электромагнитными свойствами системы обогрева.

Автор работы [2] считает, что управление процессом вулканизации с позиции энергосбережения является актуальной и исключительно сложной задачей и перечисляет основные трудности её решения:

- разработка модели динамики, которая, с одной стороны, адекватно отражает температурные режимы вулканизуемой среды, с другой стороны, пригодна для оперативного анализа и синтеза оптимального управления;
- математическое описание теплоаккумулирующих свойств вулканизационного оборудования.

Технологический процесс вулканизации РТИ можно представить последовательностью следующих операций:

1) пресс-формы без изделий помещаются между плитами пресса, где происходит их предварительный разогрев до рабочей температуры;

2) плиты размыкаются, сформованные изделия заданной массы помещаются в матрицы пресс-форм и прижимаются пуансонами;

3) плиты пресса смыкаются, и происходит нагрев пресс-форм и изделий при заданных температуре и давлении в течение регламентного времени вулканизации;

4) плиты размыкаются, происходит съём готовых изделий.

Управление температурой плит в течение всего рабочего цикла осуществляется по двухпозиционному закону регулирования. Включение и выключение нагрева плит осуществляются в зависимости от их температуры, измеряемой с помощью термопар.

Качество продукции во многом определяется равномерностью температурного поля в объёме изделия. На равномерность поля влияют параметры пресс-формы (геометрия, теплофизические свойства) и системы её обогрева (мощность и расположение нагревательных элементов – индукторов), позиционирование пресс-формы на поверхности плиты, теплофизические свойства материала плиты, а также параметры системы автоматического управления (САУ) температурой нагревательных плит. Последний фактор, при всей его очевидности, не учитывается при проектировании и эксплуатации прессового оборудования. Однако ошибки в управлении температурой плиты, несмотря на её удачную конструкцию, могут привести к большому проценту брака в готовых изделиях.

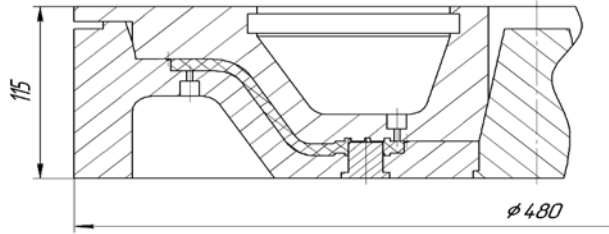
В данной работе предлагается математическая модель двухпозиционного регулятора, осуществляющего управление температурой плит вулканизационного пресса.

На примере четырёх типов изделий, отличающихся объёмом и сложностью геометрии (см. рис. 6.1), исследованы температурные поля в процессе вулканизации с целью разработки рекомендаций для построения САУ температурой нагревательных плит при выпуске широкой гаммы РТИ.

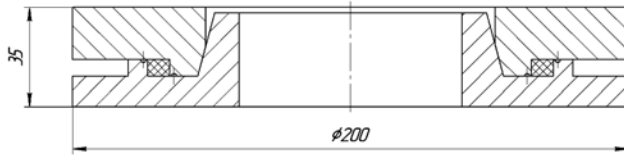
## 6.1. МОДЕЛЬ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА

Рассмотрим работу двухпозиционного регулятора для управления включением/выключением индукторов нагревательной плиты. Установкой на срабатывание  $T_{set}$  является заданное значение температуры контрольной термопары  $T_{sensor}$ .

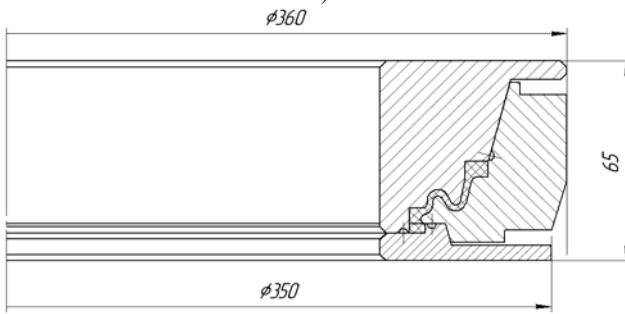




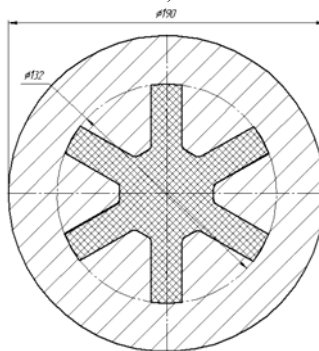
a)



б)



в)



г)

**Рис. 6.1. Геометрия исследуемых РТИ:**

*a* – мембрана; *б* – прокладка; *в* – пыльник; *г* – звездочка

В качестве значений  $T_{set}$  можно использовать показания одной термопары, а также среднее значение показаний нескольких термопар для более точной оценки текущей картины распределения температур в плите. Как правило, значение  $T_{set}$  зависит от типа используемой резиновой смеси и подбирается опытным путём. Верхний  $T_{up}$  и нижний  $T_{down}$  пороги срабатывания регулятора можно представить в виде

$$T_{up} = T_{set} + \Delta_T ;$$

$$T_{down} = T_{set} - \Delta_T .$$

Величина  $2\Delta_T$  характеризует зону нечувствительности двухпозиционного регулятора и является единственным параметром его настройки.

Моделирование работы регулятора можно осуществить двумя способами. Выбор конкретного способа не принципиален и зависит от метода решения уравнений математической модели. Если возможно вычисление порядкового номера переключения регулятора (переменной  $t$ ), то управляющее воздействие  $Q_{i_j}(\tau)$  целесообразно [5] представить в виде

$$Q_{i_j}(\tau) = 0,5 \cdot Q_{i_j} \left[ 1 + (-1)^{t+1} \right],$$

$$\tau_{t-1} < \tau < \tau_t, t = 1, 2, \dots, t^*, \dots, t_{fin}, \quad (6.1)$$

где  $j = 1, \dots, ni$  – порядковый номер индуктора;  $ni$  – число индукторов;  $\tau_t$  – момент окончания интервала времени номер  $t$ , когда осуществляется переключение регулятора;  $\tau_{t^*}$  – период предварительного нагрева плит и пресс-форм до рабочей температуры (до момента закладки изделий в пресс-формы);  $t_{fin}$  – номер заключительного интервала времени.

При этом для периодов нагрева плит и пресс-форм от начальной температуры до заданной  $\tau_{heat}$ , вулканизации  $\tau_{vulc}$  (нагрев плит и пресс-форм с изделиями при управлении температурой плит с помощью регулятора) и суммарного времени  $\tau_{\Sigma}$  справедливы соотношения:

$$\tau_{heat} = \tau_{t^*} ;$$

$$\tau_{vulc} = \tau_{t_{fin}} - \tau_{t^*} ;$$

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{heat} + \tau_{vulc} .$$

Если представляется возможным оперативное нахождение производной температуры контрольной термопары  $\frac{dT_{sensor}}{d\tau}$ , то управляющее воздействие можно представить в виде

$$Q_{i_j}(\tau) = \begin{cases} Q_{i_j}, T_{sensor} \leq T_{down}; \\ Q_{i_j}, T_{down} < T_{sensor} \leq T_{up} \wedge \frac{dT_{sensor}}{d\tau} > 0; \\ 0, T_{down} < T_{sensor} \leq T_{up} \wedge \frac{dT_{sensor}}{d\tau} \leq 0; \\ 0, T_{sensor} \geq T_{up}. \end{cases} \quad (6.2)$$

Необходимо отметить, что способ задания управляющего воздействия с использованием формулы (6.1) отличается простотой и надёжностью. При невозможности применения (6.1) целесообразно использование формулы (6.2). Однако следует иметь в виду, что её использование связано с погрешностями при численном нахождении производных. Для уменьшения данной погрешности величину расчётного шага по времени следует уменьшать.

## 6.2. ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ

Процесс проектирования нагревательных плит вулканизационных прессов основан на расчётах температурных полей системы «плита – пресс-форма – изделие». При проведении этих расчётов актуальной задачей является учёт предварительного нагрева плит и пресс-форм: «холодные» изделия помещаются в нагретые пресс-формы, установленные на «горячих» плитах, следовательно, в момент размещения изделий в остальных элементах системы температурное поле является неравномерным и нестационарным. Очевидно, что степень неравномерности этого поля влияет на температурное поле изделий в ходе вулканизации. Для учёта этого обстоятельства при проведении расчётов температурных полей введены следующие допущения:

- согласно техническим характеристикам прессового оборудования [6], время смыкания плит составляет 12 с, время размыкания – 5 – 10 с, поэтому время размыкания плит и размещения заготовок в пресс-формах, а также время подпрессовок пренебрежимо мало по сравнению с периодом предварительного нагрева и продолжительностью вулканизации;

- тепловые потери, возникающие при перезарядке пресс-форм, пренебрежимо малы;

– в период нагрева плиты до необходимой температуры можно использовать тепловой запирающий слой на границе «пресс-форма – изделие», имеющий нулевую теплопроводность, а сразу после достижения необходимой температуры можно считать, что изделия принимают свойства каучука, на основе которого изготовлена резиновая смесь [7].

Таким образом, теплопроводность изделий  $\lambda_2$  можно представить в следующем виде

$$\lambda_2 = \begin{cases} 0, T_{\text{sensor}} < T_{\text{down}} \vee t < t^*; \\ \lambda_{\text{rub}}(T), T_{\text{sensor}} \geq T_{\text{down}} \vee t \geq t^*. \end{cases} \quad (6.3)$$

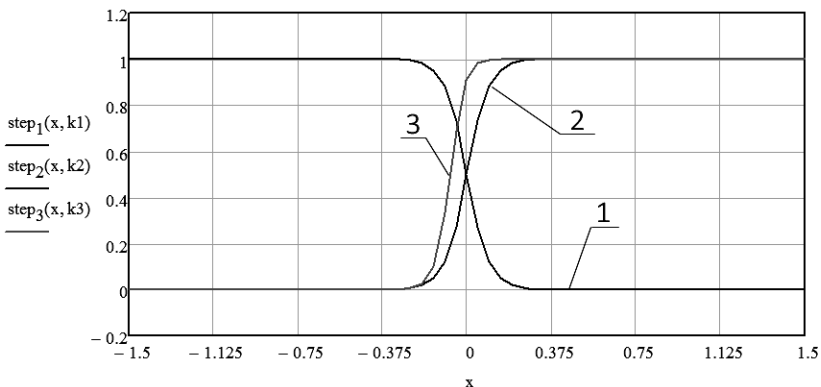
Как видно из (6.2) и (6.3), изменение управляющего воздействия и теплопроводности изделий происходит скачкообразно. При выполнении нестационарного теплового анализа системы «плита – пресс-форма – изделие» это вызывает проблемы сходимости решения [8]. Поэтому для реализации условий (6.2) и (6.3) необходимо сглаживание функций с целью повышения надёжности и улучшения сходимости решения в моменты переключения регулятора.

Известно, что в теории управления для обработки сигналов, переходящих в определённый момент времени из одного состояния в другое широко используется функция Хэвисайда [9]. По аналогии с аналитическим представлением функции Хэвисайда [10] предлагается аппроксимировать функции управляющего воздействия и теплопроводности изделий с помощью непрерывных функций вида

$$\begin{aligned} \text{step}_1(x, k_1) &= \frac{1}{1 + e^{2k_1x}}; \\ \text{step}_2(x, k_2) &= \frac{1}{1 + e^{-2k_2x}}; \\ \text{step}_3(x, k_3) &= \frac{10}{10 + e^{-2k_3x}}, \end{aligned}$$

где  $\text{step}_1(x, k_1)$  – функция сглаживания управляющего воздействия при выключении индукторов;  $\text{step}_2(x, k_2)$  – функция сглаживания управляющего воздействия при включении индукторов;  $\text{step}_3(x, k_3)$  – функция сглаживания теплопроводности изделий.

При этом параметры  $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 10$ ,  $k_3 = 15$  подобраны в результате численных экспериментов. Графики сглаживающих функций представлены на рис. 6.2.



**Рис. 6.2. Функция сглаживания управляющего воздействия:**

1 – выключение индукторов; 2 – включение индукторов;

3 – теплопроводность материала

С учётом вышесказанного задание управляющего воздействия и теплопроводности изделий предлагается осуществлять в виде

$$Q_{i_j}^*(\tau) = \begin{cases} Q_{i_j} \cdot \text{step}_1(T_{\text{sensor}} - T_{\text{down}}), T_{\text{sensor}} \leq T_{\text{down}}; \\ Q_{i_j} \cdot \text{step}_2(T_{\text{sensor}} - T_{\text{down}}), T_{\text{down}} < T_{\text{sensor}} \leq T_{\text{up}} \wedge \frac{dT_{\text{sensor}}}{d\tau} > 0; \\ 0, T_{\text{down}} < T_{\text{sensor}} \leq T_{\text{up}} \wedge \frac{dT_{\text{sensor}}}{d\tau} \leq 0; \\ 0, T_{\text{sensor}} \geq T_{\text{up}}; \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\lambda_2^* = \begin{cases} \lambda_{\text{rub}}(T) \cdot \text{step}_3(T_{\text{down}} - T_{\text{sensor}}), T_{\text{sensor}} < T_{\text{down}} \vee t < t^*; \\ \lambda_{\text{rub}}(T), T_{\text{sensor}} \geq T_{\text{down}} \vee t \geq t^*. \end{cases} \quad (6.5)$$

Использование уравнений (6.4) и (6.5) несколько усложняет задание управляющего воздействия и теплопроводности, однако является универсальным при использовании любых методов решения уравнений математической модели нагрева системы «плита – пресс-форма – изделие».

С другой стороны, сглаживание неизбежно вносит погрешности в расчёт температурных полей, минимизировать которые возможно только корректным заданием вида и параметров сглаживающих функций.

### 6.3. ИЗМЕНЕНИЕ РАСЧЁТНОЙ ОБЛАСТИ

Учесть неравномерность температурного поля плит и пресс-форм в момент загрузки изделий позволяет модель, оперирующая расчётными областями. На первом этапе решается задача предварительного разогрева плит и пресс-форм без учёта изделий. Загрузка последних имитируется включением расчётной области, моделирующей изделия. При этом для «новой» области в качестве начальной может быть задана любая требуемая температура.

В случаях решения уравнений математической модели с помощью систем конечноэлементного (КЭ) анализа данный подход может быть реализован при помощи первоначального исключения из расчёта соответствующих областей. В частности, в системе КЭ анализа ANSYS для этого применяется нулевой тип КЭ [11]. При этом структура сетки в процессе расчёта неизменна, в момент загрузки изделий меняется лишь набор активных КЭ.

Таким образом, с учётом размещения «холодных» изделий в предварительно нагретые пресс-формы, задание расчётной области  $\Omega$  можно представить в виде

$$\Omega = \begin{cases} \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_m, & \text{если } T_{sensor} < T_{down} \wedge \Omega_{rp} \not\subset \Omega; \\ \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_m \cup \Omega_{rp}, & \text{если } T_{sensor} \geq T_{down}. \end{cases} \quad (6.6)$$

где  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  – множество КЭ оснований и крышек плит соответственно;  $\Omega_m$  – множество КЭ пресс-форм;  $\Omega_{rp}$  – множество КЭ изделий;  $T_{down}$  – температура контрольной термодпары, при которой выполняется загрузка изделий.

### 6.4. РАСЧЁТНЫЙ ШАГ ПО ВРЕМЕНИ

При проведении нестационарного теплового расчёта в режиме автоматического регулирования ключевым этапом является задание шага по времени, значение которого позволяет адекватно описывать дискретность изменения граничных условий. Завышенные значения шага по времени приводят к запаздыванию переключения регулятора и, как следствие, неадекватному описанию поведения объекта исследования. Использование мелкого шага увеличивает время расчёта. На наш взгляд, данную проблему возможно решать двумя способами:

- 1) использовать максимально возможный постоянный расчётный шаг;

- 2) использовать переменный расчётный шаг в зависимости от текущего состояния системы и значения управляющего воздействия.

Разберём каждый из этих способов подробно.

Задача определения постоянного шага состоит в нахождении такого его значения, уменьшение которого не приводит к существенно увеличению точности расчёта. Таким образом, для определения рационального шага по времени требуется проведение серии предварительных численных экспериментов с последовательным уменьшением шага до тех пор, пока не будет достигнуто согласование результатов расчётов на двух последних итерациях.

Использование постоянного шага сопряжено со значительными затратами времени на проведение расчёта. Например, нестационарный анализ (конечное время 3800 с) с шагом 2 с методом КЭ системы «плита – пресс-форма – изделие», содержащей 11 595 узлов, занимает 184 мин на компьютере с 4-ядерным процессором (частота одного ядра 2,8 ГГц).

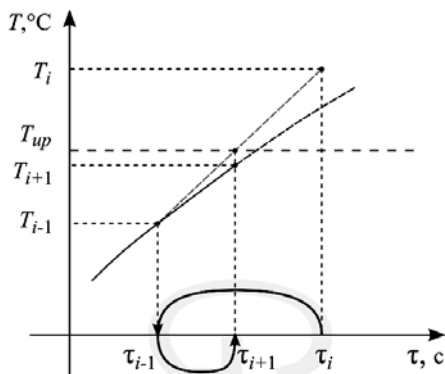
Использование переменного шага направлено на экономию процессорного времени. Однако стандартные алгоритмы определения переменного шага оказываются неэффективными в расчётах систем автоматического регулирования, поскольку не учитывают дискретность во времени граничных условий. При переключении регулятора происходит резкое перераспределение тепловых потоков в системе. В эти моменты времени требуется максимальная точность. В дальнейшем шаг может быть увеличен.

Проблема отслеживания моментов времени, в которые происходит переключение регулятора, решается возвратом к предыдущей итерации с применением линейной интерполяции для вычисления нового шага. Поясним на примере.

В момент времени  $\tau_i$  (см. рис. 6.3) температура контрольной термопары  $T_{sensor} = T_i$  превышает верхний порог срабатывания регулятора  $T_{up}$ . Задача состоит в нахождении такого момента времени  $\tau_{i+1}$ , для которого  $T_{sensor} = T_{up}$ . Решение основано на предположении о линейном изменении температуры контрольной термопары:

$$\tau_{i+1} = (\tau_i - \tau_{i-1}) \frac{T_{up} - T_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} + \tau_{i-1}. \quad (6.7)$$

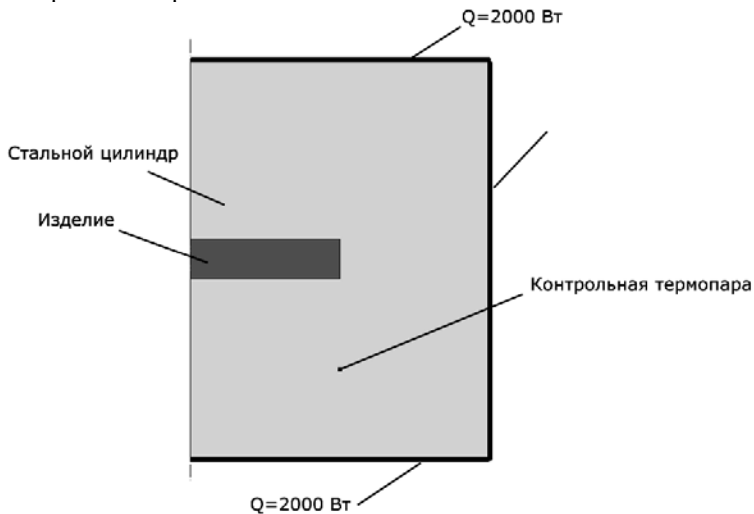
Таким образом, выполняется возврат к предыдущей итерации  $i - 1$  и выполнению расчёта с шагом  $b = \tau_{i+1} - \tau_{i-1}$ , что условно показано на рис. 6.3 с помощью стрелок на оси времени, образующих повёрнутую букву «G». Далее алгоритм определения моментов срабатывания регулятора или загрузки изделий будем называть *G-алгоритмом*.



**Рис. 6.3. Схема работы G-алгоритма**

Поскольку зависимость температуры контрольной термопары от времени нелинейна, будет наблюдаться некоторая погрешность определения  $\tau_{i+1}$ . Практические расчёты показали, что величина  $\delta = |T_{up} - T_{i+1}|$  не превышает  $0,1$  °С.

Для разработки эффективного алгоритма нахождения расчётного шага по времени было проведено исследование поведения температуры контрольной термопары в предварительном расчёте, схема которого изображена на рис. 6.4.



**Рис. 6.4. Схема предварительного расчёта**

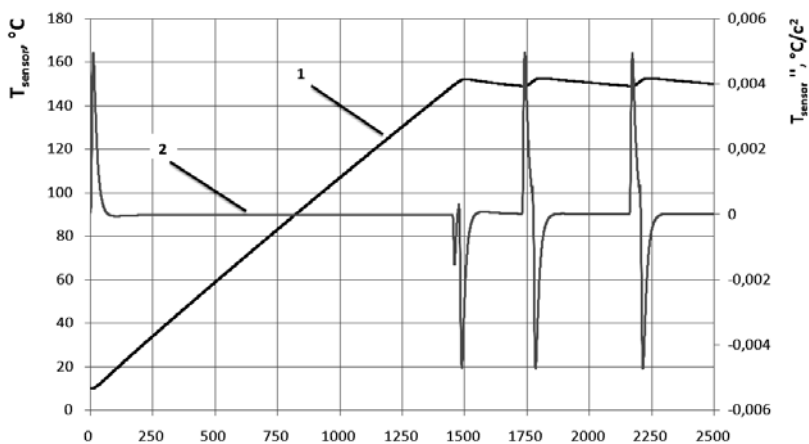


Расчётная модель представляет собой стальной цилиндр радиусом 150 мм и высотой 200 мм с заключенным внутри изделием толщиной 20 мм. Радиус изделия – 75 мм. Тепловая нагрузка задавалась в виде тепловых потоков интенсивностью 2000 Вт, отнесённых к основаниям цилиндра. Тепловые потери с цилиндрической поверхности определялись согласно [12], коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции принят равным 15 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Начальная температура системы 10 °С, установка регулятора на срабатывание  $T_{set} = 150$  °С, зона нечувствительности регулятора  $2\Delta_T = 2$  °С, температура загрузки изделия 149 °С.

Степень нелинейности изменения физической величины описывается её второй производной. Поэтому на рис. 6.5 приведены графики изменения температуры контрольной термопары во времени (кривая 1) и вторая производная этой зависимости (кривая 2).

Как видно из рис. 6.5, время разогрева металлического цилиндра от начальной температуры до температуры загрузки изделия составило ~1500 с. Далее осуществляется автоматическое регулирование температуры.

На линии второй производной наблюдается шесть характерных экстремумов, которые свидетельствуют о резком изменении тепловых потоков вблизи контрольной термопары. Первый экстремум соответствует



**Рис. 6.5. Результаты предварительного расчёта:**

1 – температура контрольной термопары, °С;

2 – вторая производная кривой 1, °С/с<sup>2</sup>

моменту включения индукторов, когда имеет место короткий этап нелинейного изменения температуры  $[0; \tau_K]$ . Последующие экстремумы в моменты времени 1500, 1750, 1800, 2150 с связаны с моментами включения и выключения индукторов. Незначительное колебание кривой в момент времени 1450 с объясняется загрузкой изделия, которое нагревается за счёт тепла цилиндра.

Таким образом, индикатором резких изменений в системе, оказывающих большое влияние на её дальнейшее поведение, является высокое абсолютное значение второй производной температуры контрольной термопары. Поэтому в такие моменты времени для более точного описания поведения системы целесообразно использование мелкого расчётного шага по времени.

Однако анализ динамики температуры одной контрольной точки не позволяет в полной мере судить о температурных изменениях, происходящих во всей расчётной области. Изменения, вызываемые срабатыванием регулятора, отражаются на графиках с некоторой задержкой, характеризующей инерционность системы. Очевидно, что с увеличением расстояния контрольной точки от источников тепла инерционность будет расти. Следовательно, описываемый алгоритм определения шага окажется нечувствительным к изменениям тепловых потоков в расчётной области между источниками тепла и контрольной точкой, что приведёт к высокой погрешности при расчёте нестационарного температурного поля всей системы. Данная проблема может быть решена одним из двух способов:

- 1) заданием минимального расчётного шага в фазах инерционности;
- 2) путём учёта нескольких контрольных точек.

В пределе для второго подхода необходимо нахождение вторых производных во всех расчётных точках системы, что связано с большими объёмами вычислений. Недостаток использования нескольких контрольных точек – необходимость проведения серии предварительных расчётов или экспертной оценки для принятия решения о количестве и схеме расположения точек. Первый подход лишён этих недостатков, т.е. является универсальным.

По этим причинам построение алгоритма определения расчётного шага по времени осуществлено на основе задания минимального шага в фазах инерционности системы. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.6.

Алгоритм предполагает использование коэффициента  $K_d$ , предназначенного для учёта нелинейности изменения температуры. Предлагается задавать  $K_d$  таким образом, чтобы переменная  $\Delta_2$  принимала значения  $[0, \Delta_{\max}]$ . При этом следует иметь в виду, что высокое значение коэффициента приведёт к большому расчётному шагу,

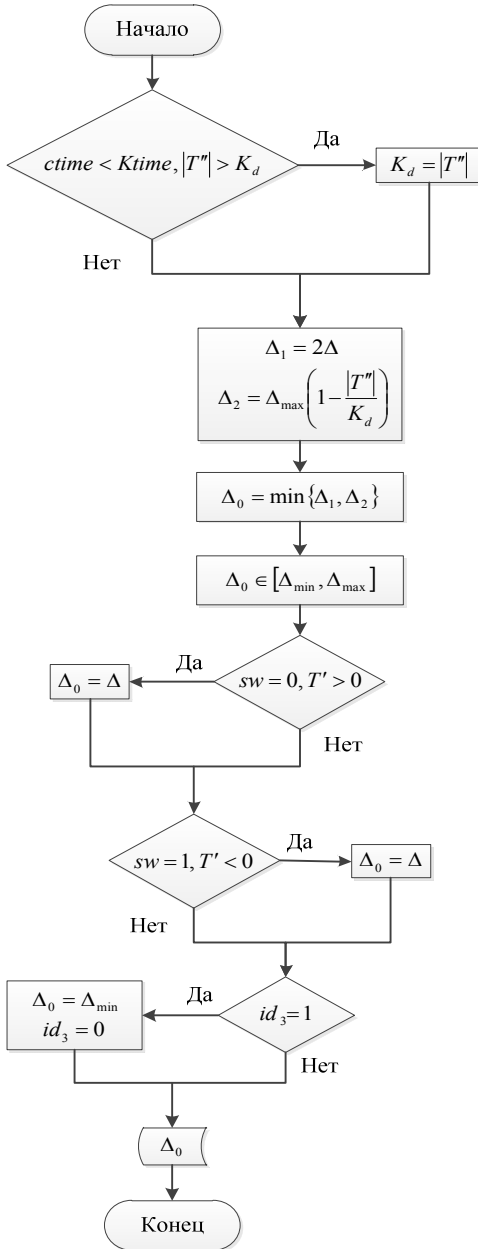


Рис. 6.6. Блок-схема алгоритма определения шага по времени

а малое значение  $K_d$ , напротив, будет связано с большим объёмом вычислений. Эти обстоятельства снизят эффективность алгоритма.

Величина экстремума функции на этапе нелинейного изменения температуры соизмерима с последующими экстремумами (см. кривую 2 на рис. 6.5). Поэтому для исключения потери чувствительности алгоритма предлагается в качестве  $K_d$  использовать абсолютную величину максимального значения второй производной температуры контрольной термопары на этапе  $[0, \tau_K]$ .

При высоких абсолютных значениях второй производной вспомогательная переменная  $\Delta_2$  принимает минимальные значения, увеличивая точность расчёта переходных процессов. Переменная  $\Delta_1$  накладывает ограничение на резкое изменение расчётного шага – текущее значение не должно превышать двукратной величины предыдущего шага. При этом значение  $\Delta_0$  не может выходить за область допустимых значений  $[\Delta_{\min}, \Delta_{\max}]$ .

Следующий шаг работы алгоритма – запрет изменения шага в фазах инерционности: при увеличении температуры при выключенных индукторах и понижении при включенных. При этом на первой итерации после срабатывания регулятора устанавливается минимальный шаг. Для идентификации данных итераций используется переменная  $id_3$ , которая принимает значение 1 сразу после срабатывания регулятора и значение 0 в остальных случаях.

## 6.5. АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Общий алгоритм расчёта температурных полей системы «плита – пресс-форма – изделие» в режиме автоматического регулирования представлен на рис. 6.7. В целях увеличения быстродействия алгоритм сохраняет результаты только двух последних итераций с индексами «1» и «2». Чередувание текущего индекса  $i$  осуществляется при помощи переменной  $flag$ , принимающей значения «1» и «-1». При необходимости возврата к предыдущему шагу ( $id_1 = 1$ ) в качестве начального условия для новой итерации задаётся массив температур  $T_i$ , в противном случае ( $id_1 = 0$ ) используется  $T_{i-flag}$ .

Переменная  $rub$  является идентификатором загрузки изделий и принимает 3 значения: «0» – изделия не загружены, «1» – требуется загрузка изделий на следующей итерации, «2» – изделия загружены. Переключение регулятора моделируется изменением переменной  $sw$  («0» – индукторы выключены, «1» – индукторы включены) в зависимости от температуры контрольной термопары  $T_{sensor}$ .

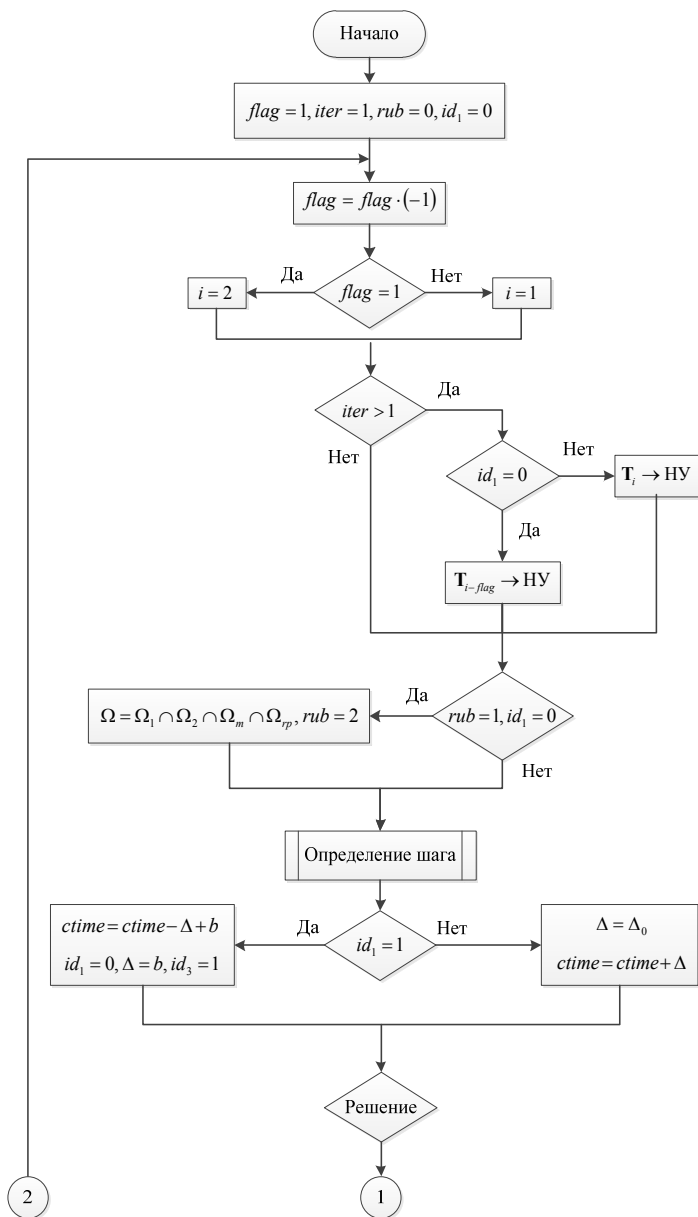


Рис. 6.7. Блок-схема алгоритма расчёта температурных полей в режиме автоматического регулирования температуры

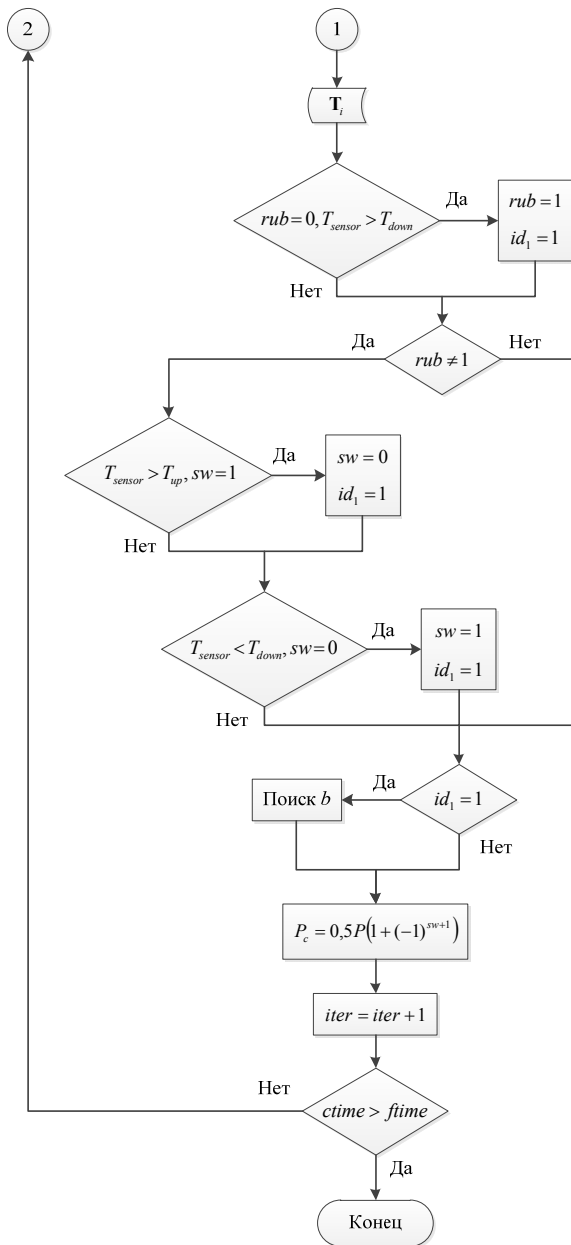


Рис. 6.7. Окончание

Поиск нового шага  $b$  при переключении регулятора выполняется при помощи G-алгоритма с использованием формулы (6.7). Далее вычисляется текущее значение мощности индукторов  $P_c$ . Цикл решения продолжается до тех пор, пока текущее время  $ctime$  не превысит конечное время  $fime$ .

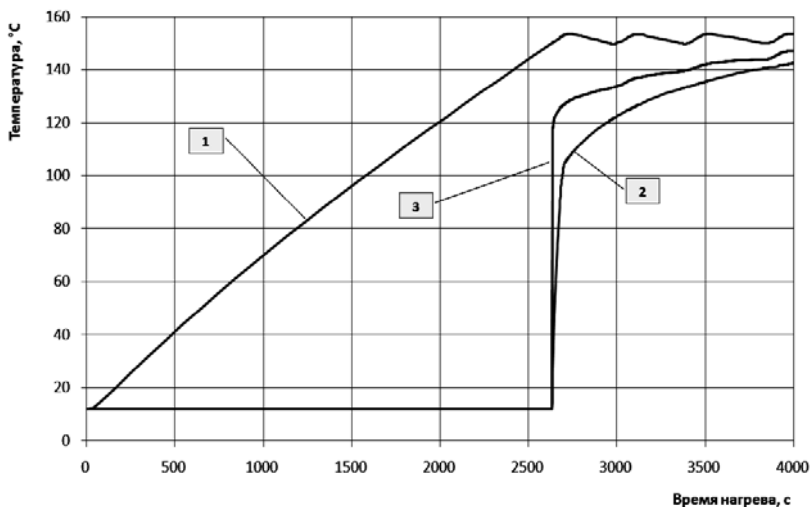
## 6.6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Параметрические трёхмерные модели плит и пресс-форм были созданы в САПР SolidWorks.

Расчёты проведены в системе инженерного анализа ANSYS. Построение модели, задание граничных условий осуществлены в соответствии с методикой, изложенной в [7, 13].

На рис. 6.8 представлены результаты расчёта системы «плита – пресс-форма – мембрана».

Установка регулятора на срабатывание  $T_{set} = 151$  °C обусловлена соответствующей температурой вулканизации резиновой смеси ИРП-1347, применяемой для изготовления мембран. Время достижения контрольной термопарой (кривая 1) температуры загрузки изделия 150 °C составило 2630 с. Регламентное время вулканизации мембраны – 20 мин.



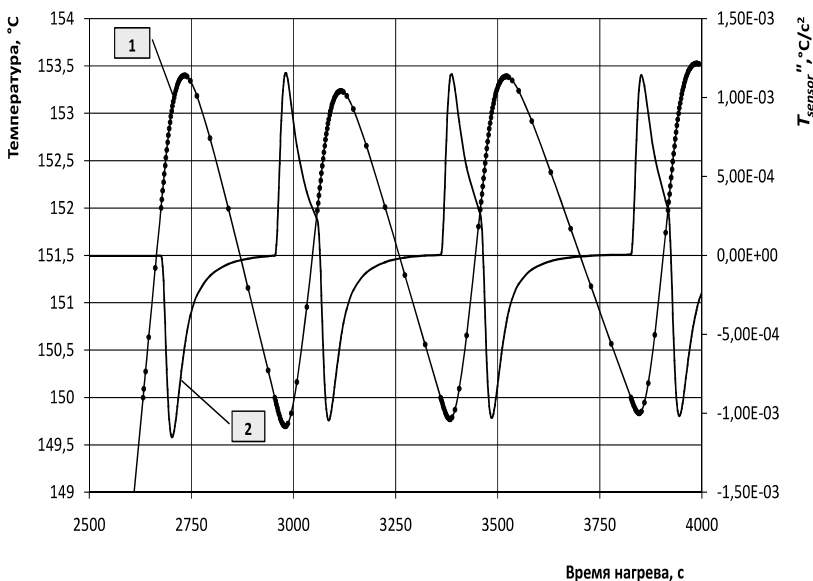
**Рис. 6.8. Расчётные температуры:**

1 – контрольная термопара; 2 – минимальная температура мембраны;  
3 – максимальная температура мембраны

На рис. 6.8 приведены графики изменения температуры контрольной термопары (кривая 1), минимальной (кривая 2) и максимальной (кривая 3) температур мембраны. Время предварительного нагрева плит и пресс-формы составило 2632 с. Далее происходит загрузка резиновой смеси, что отражается на графиках скачкообразным увеличением температуры мембраны. Затем, в режиме автоматического регулирования, температура резиновой смеси постепенно увеличивается и достигает требуемого для вулканизации значения.

Для более детального анализа полученных результатов на рис. 6.9 представлены графики температуры контрольной термопары (кривая 1) и значений ее второй производной (кривая 2) в интервале времени 2500...4000 с. Расчётные значения температуры контрольной термопары показаны на кривой 1 с помощью маркеров.

Время загрузки изделия (2632 с) найдено при помощи G-алгоритма. Погрешность, вызванная использованием линейной интерполяции при определении этого времени, составила 5 мс. Максимальная погрешность определения моментов срабатывания регулятора в данном расчёте не превысила 0,7 с. Таким образом, применение интерполяции более высоких порядков нерационально.



**Рис. 6.9. Изменение температуры контрольной термопары:**

- 1 — температура контрольной термопары, °C;
- 2 — вторая производная температуры контрольной термопары, °C/c<sup>2</sup>



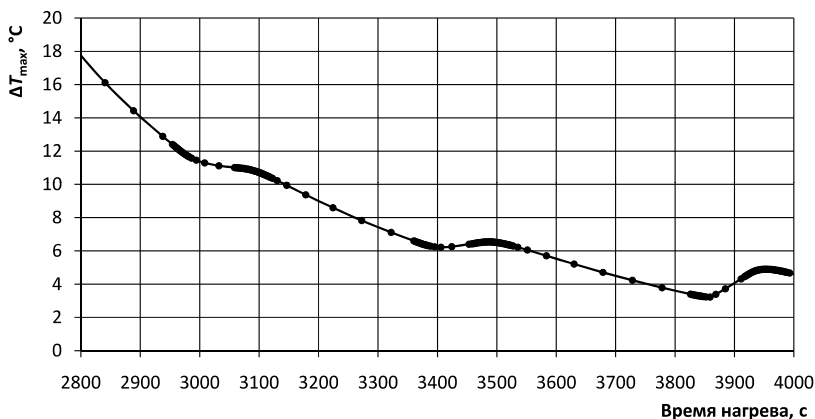
Согласно результатам численных расчётов, контрольная термопара достигает верхнего порога срабатывания регулятора 152°C к моменту времени 2676 с. Затем в течение 58 с наблюдается этап тепловой инерции, когда температура контрольной термопары продолжает увеличиваться с максимальным отклонением от верхнего предела срабатывания 1,4 °С.

Первое уменьшение температуры контрольной термопары на интервале 2734...2954 с, вызванное отключением индукторов, происходит со скоростью, соизмеримой со скоростью нагрева. Отметим, что и в этом случае уменьшение температуры также сопровождается тепловой инерцией: в течение 26 с температура контрольной термопары продолжает уменьшаться.

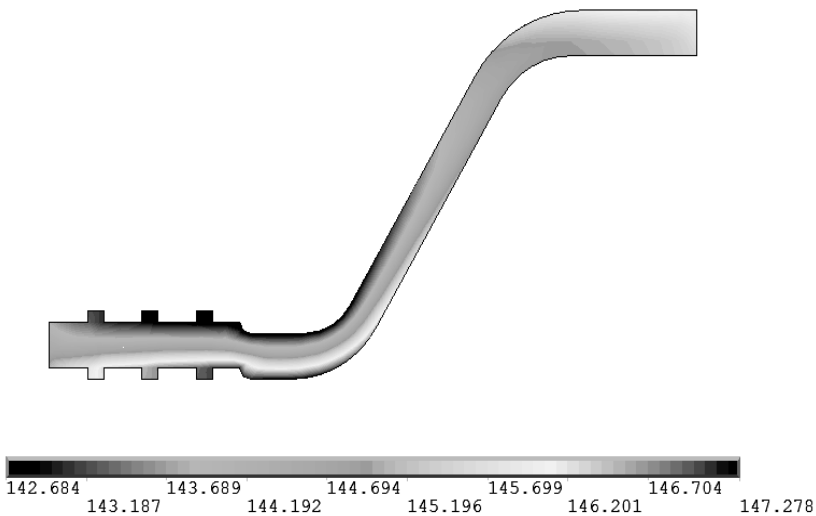
Как видно из рис. 6.9 (кривая 1), в дальнейшем скорость уменьшения температуры контрольной термопары в периоды отключения индукторов плавно снижается. Эту особенность можно объяснить тем, что в начале режима регулирования в объёме плит существуют «холодные» области, на нагрев которых расходуется поступающее в систему тепло.

Совместный анализ кривых 1 и 2 (рис. 6.9) позволяет сделать вывод, что в периоды тепловой инерции, когда изменение температуры контрольной термопары приобретает нелинейный характер (высокие абсолютные значения второй производной), используется минимальный расчётный шаг по времени. При снижении второй производной по модулю шаг увеличивается согласно разработанному алгоритму (см. рис. 6.6), что является его неоспоримым достоинством, так как позволяет существенно сократить время расчёта.

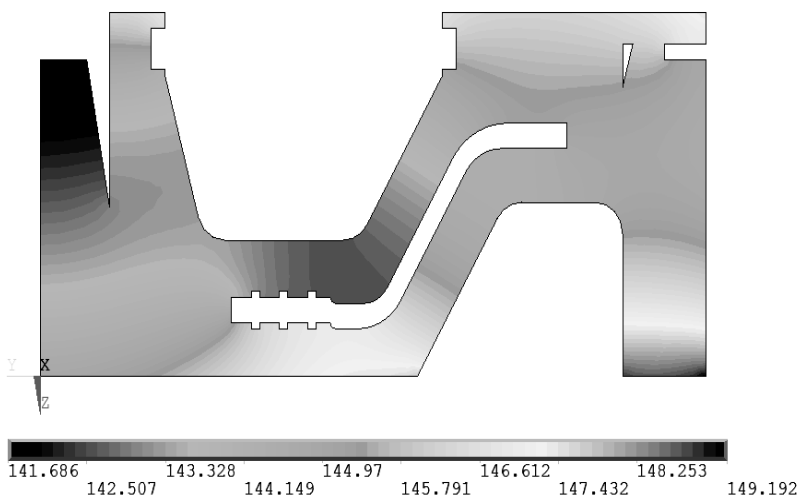
На рис. 6.10 показано изменение разности между максимальной и минимальной температурами в объёме мембраны в течение 2800...4000 с.



**Рис. 6.10.** Перепад температуры по объёму мембраны в интервале 2800...4000 с



a)



б)

**Рис. 6.11. Температурные поля в конечный момент нагрева, °С:**  
*a* – сечение мембраны; *б* – сечение пресс-формы

В коротком периоде после загрузки изделия разница температур превышает значение 90 °С, поэтому данный интервал времени не приведён на рис. 6.10. Для рассматриваемого периода времени характерно плавное снижение разности температур, что объясняется постепенным прогревом «холодных» областей мембраны. Колебания температуры, вызванные переключениями регулятора, сглаживаются пресс-формой и происходят с небольшим запаздыванием по отношению к контрольной термопаре. Как видно из рис. 6.10, минимальный перепад температур по объёму мембраны за рассматриваемый период составил 3,2 °С.

На рис. 6.11 представлено температурное поле сечения мембраны для конечного момента времени 4000 с.

На основании рис. 6.11, *а* можно сделать вывод, что области максимальных и минимальных температур распределены по внешней и внутренней поверхности мембраны соответственно. Подобная картина поля характерна для любого сечения, проходящего через ось симметрии, и объясняется неоптимальной конструкцией пресс-формы. Это подтверждается данными рис. 6.11, *б*: области, примыкающие к формообразующим поверхностям пуансона, нагреваются неравномерно.

Данные о минимальном  $\Delta T_{\min}$ , среднем  $\Delta T_{av}$  перепадах температур для рассматриваемых в работе изделий (см. рис. 6.10) в течение времени вулканизации, а также число расчётных шагов и время расчёта сведены в табл. 6.1.

Как видно из табл. 6.1, высокие значения средних перепадов температур по времени объясняются сильными температурными градиентами в изделиях при их загрузке. При этом время прогрева изделий в большей степени зависит от их толщины, поэтому наибольшее значение среднего перепада температур наблюдается у звёздочки.

### 6.1. Результаты решения математической модели САУ температурой плит пресса

Изделие	$\Delta T_{\min}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{av}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Число расчётных шагов		Продолжительность расчёта, ч	
			переменный шаг	постепенный шаг	переменный шаг	постепенный шаг
Мембрана	3,4	11,9	259	2000	4,0	30,9
Прокладка	0,65	2,8	361	2500	4,2	29,1
Пыльник	2,0	5,3	155	1650	3,1	33,0
Звёздочка	0,76	13,3	314	2500	4,0	31,8

Для мембраны, в силу особенностей пресс-формы, характерны высокие температурные перепады в течение всего периода вулканизации. Отметим, что сильное влияние на равномерность поля в изделии оказывает также время вулканизации: наименьшие перепады температур наблюдаются у изделий (прокладка и звёздочка) с длительным периодом вулканизации (40 мин).

При использовании разработанного алгоритма определения переменного шага по времени было достигнуто ускорение расчётов в 7 – 10 раз.

Выше было отмечено, что на температурное поле РТИ оказывают влияние многочисленные факторы. Прежде всего, это параметры пресс-формы, системы её обогрева и внешнего теплообмена, а также расположение пресс-формы на поверхности плиты, параметры САУ температурой нагревательных плит.

В работе [14] предложена методика оценки эффективности пресс-форм для изготовления РТИ на вулканизационном прессе, основанная на математической модели стационарного нагрева одиночной пресс-формы в условиях внешнего теплообмена, позволяющая оценивать влияние конструкций пресс-форм на равномерность температурного поля в изделиях. Оценить влияние других факторов (параметры системы обогрева и САУ температурой) можно с применением предложенной в данной работе математической модели.

В таблице 6.2 для рассматриваемых изделий представлены минимальные перепады температур в течение периодов вулканизации ( $\Delta T_{\text{нестаци}}$ ) и результаты применения методики оценки эффективности пресс-форм ( $\Delta T_{\text{стаци}}$ ). Последний показатель исключает влияние системы обогрева пресс-форм и нестационарности протекающих процессов и представляет собой минимально возможный перепад температур для данной конструкции пресс-формы. Из результатов расчётов видно, что для пыльника и звёздочки влияние пресс-формы со-

## 6.2. Результаты расчётов температурных полей РТИ

	$\Delta T_{\text{стаци}}$		$\Delta T_{\text{нестаци}}$
	COMSOL(3D)	ANSYS(2D)	
Мембрана	–	0,43	3,4
Прокладка	0,01	0,018	0,65
Пыльник	0,74	0,46	2,0
Звёздочка	0,42	–	0,76

ставляет значительную часть нестационарного перепада температур. Улучшения температурных режимов вулканизации таких изделий следует достигать оптимизацией конструкций пресс-форм. Для прокладки, напротив, подобные меры окажутся неэффективными, поскольку перепад температур в данном изделии при вулканизации вызван, прежде всего, неравномерностью температурных полей нагревательных плит. Для повышения качества изготовления мембран требуются комплексные решения: например, оптимизация конструкции пресс-формы; увеличение периода вулканизации; использование плит, формирующих более равномерные температурные поля на рабочих поверхностях.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Почему качество вулканизуемых резинотехнических изделий определяется степенью равномерности температурного поля рабочих поверхностей нагревательных плит прессов?

2. Укажите управляющее воздействие и параметр настройки двухпозиционного регулятора температуры нагревательных плит вулканизационных прессов.

3. Чем определяется способ моделирования работы двухпозиционного регулятора температуры нагревательных плит? Какой из них предпочтительнее?

4. Какие допущения принимаются при проведении расчётов температурных полей вулканизуемых резинотехнических изделий?

5. Почему возникает необходимость сглаживания управляющих воздействий на температуру нагревательных плит вулканизационных прессов?

6. Каким образом учитывается неравномерность температурного поля плит и пресс-форм в момент загрузки резинотехнических изделий?

7. Каким образом задаётся шаг по времени в процессе конечно-элементного анализа системы «нагревательная плита–пресс-форма–резинотехническое изделие»?

8. Каким образом определяются моменты времени, когда необходимо использование мелкого расчётного шага по времени?

9. Каким образом удаётся повысить чувствительность алгоритма выбора расчётного шага по времени к изменениям тепловых потоков в области между источниками тепла и контрольными точками

расчёта температуры системы «нагревательная плита–пресс-форма–резинотехническое изделие»?

10. Какие внешние факторы оказывают наибольшее влияние на температурное поле наиболее простых резинотехнических изделий (прокладки)? Более сложных изделий (мембраны, пыльники)?

### Список литературы к главе 6

1. **Андрашников, Б. И.** Справочник по автоматизации и механизации производства шин и РТИ / Б. И. Андрашников. – М. : Химия, 1981. – 296 с.

2. **Муромцев, Д. Ю.** Анализ и синтез энергосберегающего управления процессами нагрева на примере нагревательных установок : дис. ... канд. техн. наук / Д. Ю. Муромцев. – Тамбов, 2000. – 213 с.

3. **Кабанов, А. А.** Анализ и оперативный синтез оптимального управления тепловыми аппаратами с электронагревом : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Кабанов. – Тамбов, 2003. – 164 с.

4. **Industrial Heating System Creating Given Temperature Distribution** / I. Iathcheva [et al.] // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2008. – Vol. 5, No. 1. – P. 57 – 66.

5. **Time-optimal control of energy-efficient heating of aluminum billets rotating in DC magnetic field** / Yu. Pleshivtseva, N. Zaikina, B. Nacke, A. Nikanorov // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). – 2008. – R. 84 NR 11/2008. – P. 120 – 123.

6. **Каталог** продукции / Тамбовполимермаш – Режим доступа : [http://www.tambovpolymer.ru/katalog\\_id/33/](http://www.tambovpolymer.ru/katalog_id/33/). – Загл. с экрана.

7. **Карпушкин, С. В.** Моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/2. – С. 35 – 41.

8. **Алямовский, А. А.** COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде SolidWorks / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 784 с.

9. **Волков, И. К.** Интегральные преобразования и операционное исчисление : учеб. для вузов / И. К. Волков, А. Н. Канатников. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 228 с.

10. **Гольденберг, Л. М.** Цифровая обработка сигналов : справочник / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М. : Радио и связь, 1985. – 312 с.

11. **Moaveni, S.** Finite element analysis: theory and application with ANSYS / Saeed Moaveni. – 3-rd ed. – Pearson Education, Inc., New Jersey, 2008.

12. **Методы расчёта** процессов и аппаратов химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк, М. И. Курочкина. – СПб. : Химия, 1998. – 496 с.

13. **Глебов, А. О.** Сравнение методик моделирования температурных полей индукционных нагревательных плит / А. О. Глебов, С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 7. – С. 23 – 28.

14. **Карпов, С. В.** Оценка эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий и системы их обогрева на вулканизационном прессе / С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 10 – 16.

## Глава 7

# АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ: ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ НИМИ

---

Производство резинотехнических изделий (РТИ), согласно данным Центра развития Национального исследовательского университета – Высшей школы экономики [1], имеет устойчивую тенденцию к увеличению. В связи с этим возникает необходимость модернизации устаревшего и создания нового оборудования, выпускающего качественную продукцию с наименьшими издержками производства.

Наиболее часто РТИ изготавливаются методом горячего прессования. Для их вулканизации в металлических пресс-формах применяют, в основном, гидравлические вулканизационные прессы, оснащаемые нагревательными плитами с индукционными нагревателями. Процесс проектирования прессового оборудования включает решение следующих основных задач:

- выбор материалов и определение геометрии нагревательных плит и пресс-форм исходя из размеров вулканизируемых РТИ и выполнения условий прочности;
- формирование температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты прессы: определение количества, размеров, мощности и положения индукторов, обеспечивающих получение требуемого профиля температур рабочей поверхности плиты за указанное время;
- формирование поля температур в объёме вулканизируемого изделия: определение положения пресс-форм на поверхности нагревательных плит, при котором степень неравномерности температурного поля в изделии не превышает предельно допустимой;
- определение размеров элементов рамы прессы и силового гидrocилиндра, обеспечивающих выполнение условий прочности.

Рассмотрим общие постановки задач, уделяя особое внимание исходным данным для их решения и информационным связям между задачами.

### **7.1. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЛИТ И ПРЕСС-ФОРМ**

Длина  $l$  и ширина  $s$  нагревательных плит вулканизационного прессы определяются ассортиментом РТИ, которые предполагается изготавливать, и размерами пресс-форм для этих изделий, а выбор материала  $m_n$  и высоты плиты  $h$  – условием её прочности.



Нагревательные плиты вулканизационных прессов при изготовлении РТИ работают при температуре около 200 °С под давлением, т.е. подвержены температурным и механическим деформациям. Плиты могут быть нагружены как поперечными усилиями деформации, так и изгибающими моментами сил, причём размер, форма и количество пресс-форм, помещённых между нагревательными плитами, могут меняться.

Для выполнения прочностного расчёта нагревательной плиты необходимы:

- рабочая температура  $T_p$  нагревательных плит;
- усилие сжатия  $P$ ;
- количество зажимаемых пресс-форм и геометрия поверхностей их контакта с рабочей поверхностью плиты.

Постановка задачи предусматривает выбор материала и толщины нагревательной плиты, обеспечивающих неизменность геометрии плиты и качества контактной поверхности при минимальной стоимости материала:

$$S_n(l, s, h, m_n) \rightarrow \min_{h, m_n}$$

и выполнении условия

$$\sigma_{и}^{\max} = \frac{M_{и}^{\max}}{W} \leq [\sigma]_{и},$$

где  $S_n(l, s, h, m_n)$  – стоимость материала плиты при фиксированных габаритных размерах и марке материала;  $M_{и}^{\max}$  – максимальное значение суммарного изгибающего момента, возникающего при зажиме пресс-форм нагревательными плитами пресса;  $W = l \cdot h^2 / 6$  – момент сопротивления плиты изгибу;  $[\sigma]_{и}$  – допускаемое напряжение изгиба для материала плиты при температуре  $T_p$ .

Методика определения значения  $M_{и}^{\max}$  для конкретных условий нагружения плит вулканизационного пресса приведена в работе [2].

Результатом решения задачи являются марка материала плиты и минимальное значение  $h$ , обеспечивающие выполнение условия прочности.

Пресс-формы с вулканизируемыми изделиями также подвергаются температурным и механическим деформациям: они помещаются между двумя нагревательными плитами, зажимаются с усилием порядка 200 МН и выдерживаются некоторое время при температуре, близкой к  $T_p$ . При выборе типа пресс-формы для вулканизации конкретного изделия руководствуются требованиями [3].

Целью прочностного расчёта пресс-формы является выбор марки материала и определение геометрических размеров её элементов, обеспечивающих выполнение условий прочности.

Исходными данными для прочностного расчёта пресс-формы являются:

- осевая нагрузка (рабочее давление в гидроцилиндре пресса  $P_{ц}$ );
- рабочая температура  $T_p$ .

Для случая, когда основными габаритными размерами пресс-формы являются наружный  $R$ , внутренний  $r$  радиус и высота  $h_{\phi}$ , определяемая геометрией прессуемого РТИ (см. рис. 7.1), задача сводится к выбору материала пресс-формы и таких значений  $R$  и  $r$ , при которых обеспечивается выполнение условия прочности пресс-формы и достигается её минимальная металлоёмкость:

$$S_{\phi}(R, r, h_{\phi}, m_{\phi}) \rightarrow \min_{R, r, m_{\phi}}$$

при условии, см. [2],

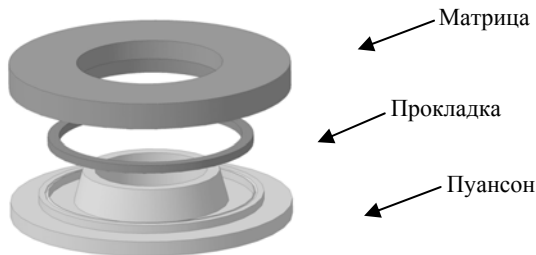
$$\frac{P_0(R^2 + r^2)}{R^2 - r^2} \leq [\sigma]_в,$$

где  $S_{\phi}(R, r, h_{\phi}, m_{\phi})$  – стоимость материала пресс-формы при фиксированных габаритных размерах и марке материала;  $P_0$  – удельное давление прессования;  $[\sigma]_в$  – допускаемое напряжение для материала пресс-формы.

Значение  $P_0$  для конкретной пресс-формы определяется по рабочему давлению в гидроцилиндре пресса:

$$P_0 = (P_{ц} \cdot k_{пр} \cdot f_{плж}) / f_{з.к},$$

где  $k_{пр}$  – коэффициент полезного действия пресса;  $f_{плж}$  – площадь поперечного сечения плунжера пресса;  $f_{з.к}$  – площадь горизонтальной проекции загрузочной камеры пресс-формы.



**Рис. 7.1. Пресс-форма для изготовления резиновых прокладок**

Результатом решения этой задачи являются марка материала пресс-формы, значения  $R$  и  $r$ , обеспечивающие выполнение условия прочности.

## 7.2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУР РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ

На промышленных предприятиях, выпускающих прессовое оборудование, задача формирования традиционно считается главной в процессе проектирования вулканизационных прессов, так как от профиля температур рабочей поверхности нагревательных плит прямо зависит конфигурация поля температур в вулканизируемом изделии. Как правило, требуется определить число индукционных нагревателей, геометрические размеры и мощность каждого из них, обеспечивающие равномерное распределение температур по рабочей поверхности плиты. Пример конструкции плиты с прямоугольными индукторами представлен на рис. 7.2.

К числу исходных данных для решения этой задачи относятся:

- результаты решения задачи выбора материала и геометрии нагревательной плиты – значения  $m_n, l, s, h$ ;
- продолжительность периода нагрева плиты  $\tau_n$  и допустимый уровень неравномерности температурного поля её рабочей поверхности  $\Delta T_n$  по истечении этого времени;
- тип, внешний диаметр  $d_n$  (с учётом изоляции), материал и диаметр  $d$  сечения провода, используемого для намотки индукторов, допустимая глубина пазов под индукторы  $h_n$ ;

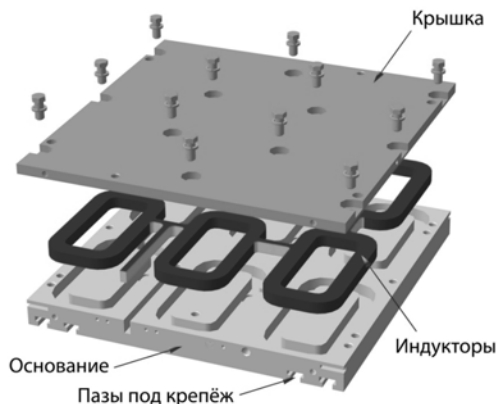


Рис. 7.2. Конструкция нагревательной плиты с прямоугольными индукторами

- напряжение электрической сети  $U$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ ;
- конфигурация объёма материала плиты  $v_{hi}$ , в котором происходит тепловыделение индукторов, и зависимость их удельной мощности от времени нагрева  $q_{hi}(\tau)$ ;
- условия теплоотвода во внешнюю среду – конструкция системы нагрева пресса, условия контакта нагревательных плит с элементами пресса и окружающим воздухом, температура воздуха  $T_0$ .

Необходимо определить число индукторов ( $N_{hi}$ ) заданной формы (круглый, прямоугольный), их размеры (длина  $l_{hi}$  и ширина  $s_{hi}$  или диаметр  $d_{hi}$ ), положение проекций центров индукторов на рабочую поверхность плиты ( $X_{hi}, Y_{hi}$ ), и число витков провода ( $n_{hi}$ ) в каждом индукторе, при которых в момент времени  $\tau_{hi}$  от начала нагрева средняя температура рабочей поверхности плиты минимально отличается от заданной ( $T_p$ ), а неравномерность поля температур рабочей поверхности  $T_{hi}(x, y, 0, \tau_{hi})$  не превосходит  $\Delta T_{hi}$ .

Обобщённую математическую постановку задачи для плиты с прямоугольными индукторами можно представить следующим образом.

$$\begin{aligned} & \max_{\substack{x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p]}} \{T_{hi}(x, y, 0, \tau_{hi})\} - \min_{\substack{x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p]}} \{T_{hi}(x, y, 0, \tau_{hi})\} \rightarrow \\ & \rightarrow \min_{N_{hi}, l_{hi}, s_{hi}, X_{hi}, Y_{hi}, n_{hi}, i = \overline{1, N_{hi}}} \end{aligned}$$

при условиях:

$$\left| \frac{1}{(l - 2 \cdot \Delta p) \cdot (s - 2 \cdot \Delta p)} \int_{\Delta p}^{s - \Delta p} \int_{\Delta p}^{l - \Delta p} T_{hi}(x, y, 0, \tau_{hi}) dx dy - T_p \right| < \varepsilon_{hi};$$

$$\max_{\substack{x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p]}} \{T_{hi}(x, y, 0, \tau_{hi})\} - \min_{\substack{x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p]}} \{T_{hi}(x, y, 0, \tau_{hi})\} \leq \Delta T_{hi};$$

$$T_{hi}(x, y, z, \tau) = \Omega(T_0, N_{hi}, v_{hi}, q_{hi}, X_{hi}, Y_{hi}, i = \overline{1, N_{hi}}; \tau), \quad x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p], \quad z \in [0, h];$$

$$v_{hi} = v_{hi}(U, \cos \varphi, l_{hi}, s_{hi}, h_{hi}, n_{hi}, d_{hi}), \quad i = \overline{1, N_{hi}},$$

$$q_{hi} = q_{hi}(U, \cos \varphi, l_{hi}, s_{hi}, n_{hi}, \tau), \quad i = \overline{1, N_{hi}}.$$

Здесь  $\Delta p$  – расстояние от края плиты до границы её рабочей поверхности ( $\sim 25$  мм);  $\varepsilon_{hi}$  – допустимое отклонение средней температуры плиты от  $T_p$ .

Функция  $\Omega$  представляет собой дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с начальным условием  $T(x, y, z, 0) = T_0$

и граничными условиями, форма которых определяется условиями теплоотвода в окружающую среду, см., например, [4]. Рекомендации по решению этого уравнения методом конечных интегральных преобразований и методом конечных элементов даны в [5]. При использовании метода конечных интегральных преобразований возникает проблема выбора и обоснования величины шага по времени нагрева плиты, обеспечивающего приемлемую точность и продолжительность расчётов [6].

Значения  $v_{ni}$ ,  $q_{ni}$  – это объём, в котором осуществляется тепловыделение от работы  $i$ -го индуктора, и удельная мощность этого тепловыделения. Для их определения необходим электромагнитный анализ – решение уравнения Максвелла для фиксированного числа и параметров индукторов, причём для каждого момента времени необходимо вначале рассчитывать удельную мощность индукторов, а затем – температурное поле плиты [5].

Если электромагнитный анализ невозможен по причине дефицита времени или вычислительных ресурсов, отсутствия данных о зависимости магнитной проницаемости материала плиты от температуры, информацию об изменении мощности индукторов в процессе нагрева можно получить на основе экспериментальных данных [4] и, приняв допущение о конфигурации объёма, в котором осуществляется тепловыделение, рассчитать его удельную мощность.

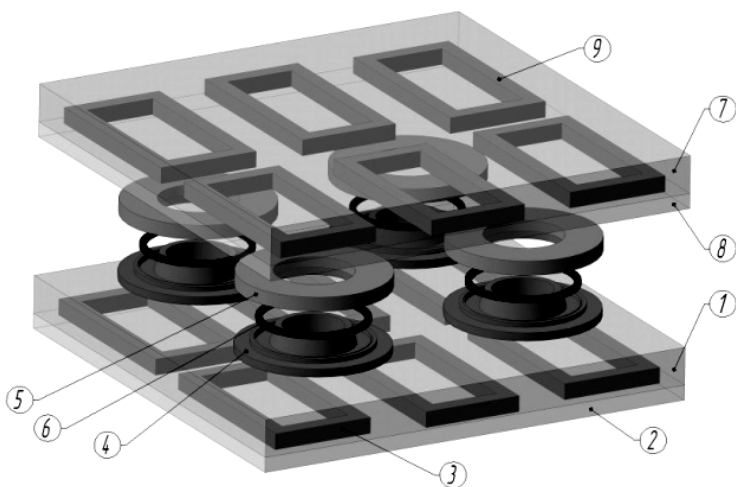
Результатом решения этой задачи является число индукторов, мощность и местоположение каждого из них в объёме плиты, а также температурное поле плиты. Один из возможных подходов к её решению предложен в [7].

### **7.3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В ОБЪЁМЕ ВУЛКАНИЗИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ**

Качество РТИ во многом определяется равномерностью температурного поля в объёме изделия. Поэтому необходимо определить положение пресс-форм, обеспечивающее заданное распределение температур в резинотехнических изделиях при фиксированном профиле температур рабочей поверхности нагревательной плиты. Заметим, что дополнительные конструктивные элементы пресс-форм (ручки для переноса, литейные каналы, отверстия под крепёжные элементы, установочные пазы, фаски и т.д.), как правило, снижают степень равномерности температурных полей в вулканизируемых изделиях, однако необходимы при производстве [8].

К исходной информации для решения этой задачи относятся:

- состав (марка) исходной резиновой смеси ( $m_n$ );
- температура окружающего воздуха ( $T_0$ ), начальная температура смеси ( $T_n$ ) и температура вулканизации изделия ( $T_b$ );



**Рис. 7.3 Геометрическая модель системы «плита–пресс-формы–РТИ»:**  
 1, 7 – основания плит; 2, 6 – крышки плит; 3, 9 – индукторы;  
 4, 5 – матрица и пуансон пресс-формы; 6 – РТИ (прокладка)

- допустимый уровень неравномерности температурного поля в изделии ( $\Delta T_{и}$ );
- результаты решения задачи выбора материала и геометрии пресс-формы – комплекс геометрических размеров  $G_{\Phi}$  и материал  $m_{\Phi}$  пресс-форм используемого типа.

Задачу предлагается решать для стационарного режима нагрева системы «плиты–пресс-формы–изделия» (см. рис. 7.3) в условиях теплообмена с окружающим воздухом, т.е. находить температурное поле изделия, которое характеризуется максимально возможной степенью равномерности. В реальных (производственных) условиях имеют место нестационарные режимы нагрева пресс-форм, при которых градиенты температур в изделиях всегда будут больше, чем для стационарного режима [см. [9]], поэтому предлагаемый подход, с одной стороны, позволяет существенно уменьшить объём расчётов, а с другой – обоснованно выбирать конструкцию пресс-формы и режим работы системы обогрева пресса.

Представим обобщённую математическую формулировку задачи для системы, состоящей из  $N_{п}$  нагревательных плит,  $N_{\Phi}$  пресс-форм и  $N_{и}$  изделий.

$$\max_{k=1, N_{и}} \left\{ \max_{x, y, z \in V_{ик}} \{T_{ик}(x, y, z)\} - \min_{x, y, z \in V_{ик}} \{T_{ик}(x, y, z)\} \right\} \rightarrow \min_{X_{\Phi j}, Y_{\Phi j}, j=1, N_{\Phi}}$$

при условиях:

$$\begin{aligned} & \max_{x,y,z \in V_{ик}} \{T_{ик}(x,y,z)\} - \min_{x,y,z \in V_{ик}} \{T_{ик}(x,y,z)\} \leq \Delta T_{и}, k = \overline{1, N_{и}}; \\ & \left| \frac{1}{V_{ик}} \iiint_{V_{ик}} T_{ик}(x,y,z) - T_{в} \right| < \varepsilon_{и}, k = \overline{1, N_{и}}; \\ & T_{ик}(x,y,z) = \\ & = \Theta(T_0, T_{в}; T_{пp}(x,y,0), p = \overline{1, N_{п}}; G_{\phi}; X_{\phi j}, Y_{\phi j}, C_{\phi j}, j \in (1, \dots, N_{\phi}); C_{ик}), \\ & k = \overline{1, N_{и}}. \end{aligned}$$

Здесь  $V_{ик}$  – комплекс граничных значений координат объёма  $k$ -го изделия;  $T_{ик}(x, y, z)$  – стационарное температурное поле  $k$ -го изделия;  $X_{\phi j}, Y_{\phi j}$  – положение центра проекции  $j$ -й пресс-формы на рабочую поверхность плиты;  $v_{ик}$  – объём  $k$ -го изделия;  $\varepsilon_{и}$  – заданная точность совпадения  $T_{в}$  со средней температурой изделия.

Функция  $\Theta$  представляет собой систему дифференциальных уравнений стационарной теплопроводности для всех пресс-форм и изделий при заданном профиле температур нагревательных плит ( $T_{пp}(x, y, 0), p = \overline{1, N_{п}}$ ) с граничными условиями, характеризующими равенство температур и тепловых потоков на границах между плитами и пресс-формами ( $C_{\phi j}, j \in (1, \dots, N_{\phi})$ ), пресс-формами и изделиями ( $C_{ик}, k = \overline{1, N_{и}}$ ). Подробное представление функции  $\Theta$ , методику определения поля температур в вулканизируемом изделии см. в [10].

Результатами решения этой задачи являются значения  $X_{\phi j}, Y_{\phi j}$  для всех пресс-форм и поля температур в вулканизируемых изделиях.

## 7.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ РАМЫ ПРЕССА И СИЛОВОГО ГИДРОЦИЛИНДРА

Рама пресса представляет собой стальной замкнутый контур, воспринимающий пульсирующее толкающее усилие гидроцилиндра через технологические и нагревательные плиты. Под действием этого усилия продольные части стоек рамы работают на растяжение и продольный изгиб, а поперечные – на поперечный изгиб.

Для предотвращения температурных напряжений в опорных частях рамы пресса между ними и нагревательными плитами устанавливаются теплоизоляционные прокладки, например, на предприятии ЗАО «Завод Тамбовполимермаш» – плиты толщиной 50 мм из материала АЦЭИД 500 [11].

Целью расчёта является выбор материала рамы пресса и определение геометрических размеров её опасных сечений при заданном осевом толкающем усилии и средней температуре рамы (с запасом – при рабочей температуре нагревательных плит  $T_p$ ).

Исходные данные:

- основные геометрические размеры рамы;
- осевое толкающее усилие  $P$ .

Методика прочностного расчёта рамы вулканизационного гидравлического пресса [12] предусматривает проверку выполнения условий:

$$\sigma_i = \frac{|M_i| \cdot C_i}{J_i} < [\sigma]_p, \quad i=1, \dots, Os,$$

где  $i$  – порядковый номер опасного сечения рамы;  $\sigma_i$  – напряжение изгиба в  $i$ -м опасном сечении;  $M_i$  – крутящий момент в  $i$ -м опасном сечении;  $C_i$  – ордината центра тяжести  $i$ -го опасного сечения;  $J_i$  – момент инерции  $i$ -го опасного сечения относительно оси, проходящей через центр его тяжести;  $[\sigma]_p$  – допускаемое напряжение изгиба для материала рамы.

Задача расчёта рамы пресса на прочность сводится к определению геометрических размеров элементов рамы, при которых выполняются условия её прочности и достигается минимальная металлоёмкость.

Силовой гидроцилиндр является наиболее нагруженным и ответственным узлом вулканизационного пресса. Целью его расчёта является выбор материала  $m_{ц}$ , внутреннего  $R_v$  и внешнего  $R_n$  радиуса цилиндрической части, толщины днища  $h_d$ , фланца  $h_f$  и высоты катета сварного шва днища  $h_k$ .

Цилиндры гидравлических прессов рассчитываются как толсто-стенные сосуды, так как отношение наружного диаметра к внутреннему превосходит 1,5. Методика расчёта [2] предусматривает:

- расчёт эквивалентного напряжения в стенках гидроцилиндра и его сравнение с допускаемым напряжением на растяжение для материала корпуса;
- расчёт суммарного напряжения в днище, цилиндрической части корпуса вблизи днища, вблизи верхнего фланца и их сравнение с допускаемым напряжением при пульсирующей нагрузке для материала корпуса.

Исходные данные:

- геометрия гидроцилиндра (наружный диаметр, высота, форма и размеры толкателя);
- давление внутри гидроцилиндра  $P_{ц}$ ;
- необходимый запас прочности.



Условия прочности стенки гидроцилиндра:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]} < [\sigma]_{\text{ц}},$$

где  $\sigma_r = \frac{P \cdot R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \cdot \left(1 - \frac{R_H^2}{R_B^2}\right)$ ,  $\sigma_t = \frac{P \cdot R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \cdot \left(1 + \frac{R_H^2}{R_B^2}\right)$ ,  $\sigma_z = \frac{P \cdot R_B^2}{R_H^2 - R_B^2}$  –

радиальное, тангенциальное и осевое напряжения, возникающие в стенке цилиндра под действием внутреннего давления;  $[\sigma]_{\text{ц}}$  – допускаемое напряжение растяжения для материала цилиндра.

Условия прочности днища гидроцилиндра:

$$\sigma_{\text{д}}^{\text{с}} + \sigma_{\text{д}}^{\text{ц}} < [\sigma]_{\text{ци}},$$

цилиндрической части корпуса гидроцилиндра вблизи днища:

$$\sigma_{\text{ц}}^{\text{д}} + \varphi \cdot \sigma_z < [\sigma]_{\text{ци}},$$

вблизи фланца:

$$K \cdot (\sigma_{\text{ц}}^{\text{ф}} + \sigma_z) < [\sigma]_{\text{ц}}.$$

Здесь  $\sigma_{\text{д}}^{\text{с}} = 6 \cdot \frac{|M_2|}{h_{\text{д}}^2}$  – напряжение изгиба в днище корпуса вблизи стенки;

$M_2$  – изгибающий момент днища корпуса вблизи стенки;

$\sigma_{\text{д}}^{\text{ц}} = \frac{6}{h_{\text{д}}^2} \cdot \left(\frac{3+\mu}{16} \cdot P \cdot R^2 - M_2\right)$  – напряжение изгиба в центре днища

корпуса;  $\mu \sim 0,3$  – коэффициент Пуассона;  $R = 0,5 \cdot (R_H + R_B)$  – средний радиус корпуса гидроцилиндра;  $[\sigma]_{\text{ци}}$  – допускаемое напряжение материала цилиндра на изгиб;

$\sigma_{\text{ц}}^{\text{д}} = 6 \cdot \frac{|M_1|}{(R_H - R_B)^2}$  – напряжение изгиба цилиндрической части корпуса в зоне сопряжения с днищем;

$\varphi \sim 0,8$  – коэффициент прочности сварного шва;  $M_1$  – изгибающий момент цилиндрической части корпуса в зоне сопряжения с днищем;  $K \sim 1,3$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки на фланец корпуса гидроцилиндра со стороны рамы пресса;

$\sigma_{\text{ц}}^{\text{ф}} = 6 \cdot \frac{|M_0|}{R_H - R_B}$  – напряжение изгиба в верхней части цилиндрической

части корпуса вблизи перехода во фланец;  $M_0$  – изгибающий момент в цилиндрической части корпуса вблизи перехода во фланец;  $[\sigma]_{\text{ц}}$  – допускаемое напряжение материала цилиндра на изгиб при пульсирующей нагрузке.

Расчёт на прочность сварных швов гидроцилиндра сводится к проверке выполнения условий [2]:

$$\sigma_k = \frac{P_{ц} \cdot R_B^2}{R_H^2 - (R_B + l)^2} < [\sigma]_{ш};$$

$$\tau_{\phi} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot R_H \cdot (h_{\phi} - l)} \leq [\tau];$$

$$\tau_d = \frac{R_B^2 \cdot P_{ц}}{1,4 \cdot R_H \cdot h_k} \leq [\tau],$$

где  $\sigma_k$  – напряжение в сварном шве корпуса гидроцилиндра;  $l \sim 5$  мм – ширина полоски сопряжения свариваемых деталей;  $[\sigma]_{ш}$  – допускаемое напряжение растяжения в сварном шве;  $[\tau] = 0,65 \cdot [\sigma]_p$  – допускаемое напряжение кручения в сварном шве.

Задача расчёта силового гидроцилиндра вулканизационного пресса сводится к определению значений  $R_H$ ,  $R_B$ ,  $h_d$ ,  $h_{\phi}$  и  $h_k$ , обеспечивающих минимальную металлоёмкость гидроцилиндра при выполнении всех условий прочности.

Расчёт гидроцилиндра обычно дополняют прочностным расчётом стола пресса. Этот расчёт сводится к выбору минимальной высоты стола, обеспечивающей выполнение условий [2]:

$$\sigma_j = \frac{M_j}{W_j} < [\sigma], \quad j = I, II,$$

где I, II – продольное и диагональное сечения стола;  $M_j$  – крутящий момент в  $j$ -м сечении;  $W_j$  – момент сопротивления  $j$ -го сечения;  $\sigma_j$  – напряжение в  $j$ -м сечении;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение материала стола на изгиб.

Как видно, для решения задач проектирования прессового оборудования необходимо большое количество разнородной информации:

- данные технического задания на проектирование (значения  $T_p$ ,  $P$ ,  $P_{ц}$ ,  $\tau_n$ ,  $\Delta T_n$ ,  $\varepsilon_n$ ,  $U$ ,  $\cos \varphi$ ,  $T_B$ ,  $\Delta T_n$ ,  $\varepsilon_n$  и  $T_0$ ; условия теплоотвода от плит и пресс-форм во внешнюю среду и др.);

- справочные данные – свойства материалов плит, пресс-форм и проводов индукторов (плотность, теплоёмкость, теплопроводность, магнитная проницаемость, удельное электросопротивление, допускаемые напряжения), свойства резиновых смесей (состав, плотность, теплоёмкость, теплопроводность);

– результаты решения предшествующих задач, например, размеры нагревательной плиты для задачи формирования температурного поля её рабочей поверхности, число, размеры и мощности индукторов нагревательных плит для задачи формирования поля температур в РТИ.

Кроме того, применение систем конечноэлементного анализа требует формирования объёмных геометрических моделей (3D-моделей) плит, индукторов, пресс-форм и РТИ (рис. 7.3), выбора типов и плотности сетки конечных элементов для различных объектов. Заметим, что 3D-модели нагревательных плит и пресс-форм являются как исходными данными, так и результатами решения задач формирования температурных полей в плитах и РТИ, следовательно, они должны быть параметризованы.

Таким образом, автоматизация процесса проектирования требует создания системы информационной поддержки принятия решений для подготовки, хранения и представления исходных данных и результатов решения задач проектирования прессового оборудования. Остановимся подробнее на структуре и функциях этой системы.

## **7.5. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Основными функциями системы информационной поддержки являются:

- 1) автоматизация подготовки и ввода данных для решения конкретной задачи, в том числе и результатов решения предшествующих задач;
- 2) сбор, хранение и предоставление справочной информации;
- 3) формирование и хранение параметризованных 3D-моделей и чертежей плит, индукторов, пресс-форм и РТИ;
- 4) представление результатов решения задач в форме, удобной для анализа;
- 5) формирование конечных документов, пригодных для использования в проектной документации;
- 6) хранение исходных данных и результатов выполненных проектов.

Реализация этих функций осуществляется с помощью следующих компонентов системы (см. рис. 7.4):

- модуль ввода данных технического задания;
- база справочных данных о материалах плит и проводов, используемых для намотки индукторов, пресс-форм, а также резиновых смесях, используемых в качестве исходного сырья для изготовления РТИ;

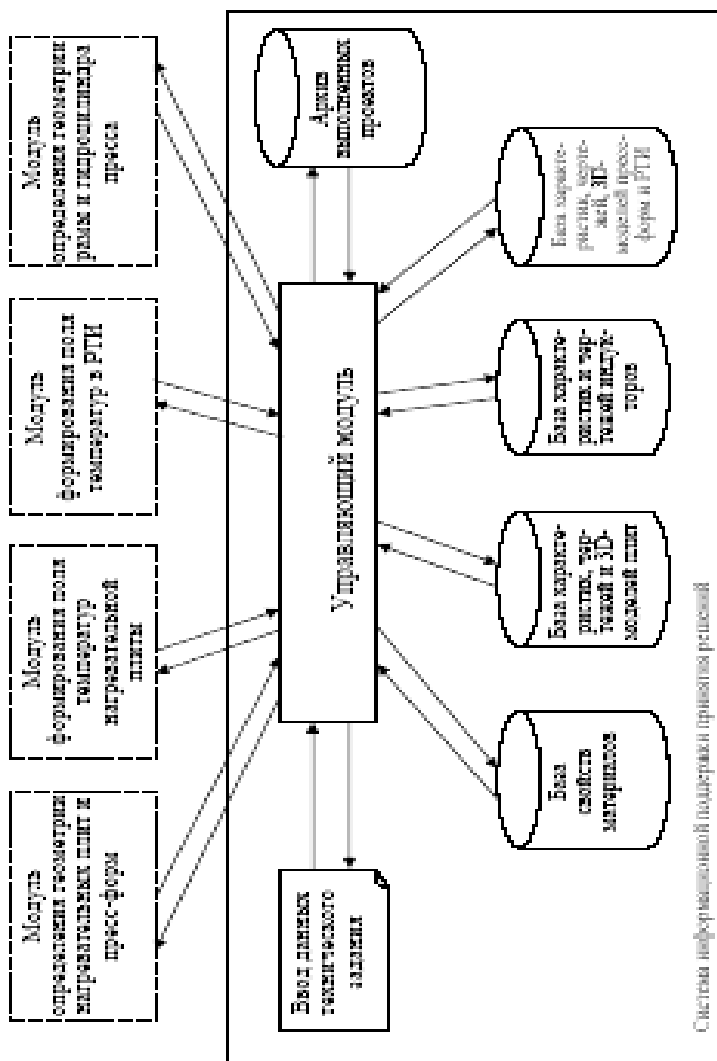


Рис. 7.4. Структура системы информационной поддержки принятия решений при проектировании прессового оборудования

- база характеристик, сборочных чертежей, 3D-моделей нагревательных плит и результатов расчёта их температурных полей;
- база характеристик и сборочных чертежей индукторов;
- база характеристик, сборочных чертежей, 3D-моделей пресс-форм с РТИ и результатов расчёта температурных полей в РТИ;
- архив выполненных проектов.

Основным структурным элементом системы является управляющий модуль, предназначенный для выполнения следующих операций:

- управление базами данных (поиск необходимой информации, пополнение и корректировка);
- подготовка исходных данных для работы модулей решения задач с использованием данных технического задания, справочной и архивной информации;
- формирование 3D-моделей и сборочных чертежей нагревательных плит с индукторами, пресс-форм с РТИ на основе результатов решения задач формирования температурных полей;
- сохранение исходных данных и результатов выполнения проектов в архиве;
- формирование и печать протоколов решения задач для включения в проектную документацию.

Разработка и внедрение системы информационной поддержки принятия решений при проектировании прессового оборудования в комплексе с модулями решения задач проектирования позволят существенно сократить сроки получения проектных решений и повысить их качество.

## **7.6. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Практикум включает варианты заданий для балансовых расчётов нагревательных плит вулканизационных прессов, расчёта необходимого числа витков индуктора заданной конфигурации и мощности, определения положения и тепловыделения индукторов конкретной нагревательной плиты, определения продолжительности нагрева плиты до рабочей температуры, оптимизации температурного поля рабочей поверхности плиты. Каждое задание предусматривает графическое представление полученных результатов.

### 7.6.1. БАЛАНСОВЫЕ РАСЧЁТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ВУЛКАНИЗАЦИОННОГО ПРЕССА

С применением системы инженерных расчётов MathCAD определить:

- продолжительности нагрева плиты до рабочих температур в условиях свободной конвекции и в рабочих условиях;
- значения стока тепла в воздух при нагреве плиты до рабочих температур в условиях свободной конвекции и в рабочих условиях;
- значение стока тепла в крепёжные пластины плиты при её нагреве до рабочих температур;
- мощности плиты, необходимые для обеспечения нормативного времени её нагрева до рабочих температур в условиях свободной конвекции и в рабочих условиях.

В отчет о выполнении задания включить его формулировку, необходимые комментарии к расчётным формулам и графики зависимостей стока тепла в воздух и крепёж от средней температуры нагрева плиты.

Условные обозначения:

- $l$  – длина плиты (м);
- $s$  – ширина плиты (м);
- $h$  – высота плиты (м);
- $m$  – индекс материала плиты: 1 – углеродистая сталь, 2 – нержавеющая сталь, 3 – жаростойкая сталь;
- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала плиты (Вт/(м·К));
- $c$  – теплоемкость материала плиты (Дж/(кг·К));
- $\rho$  – плотность материала плиты (кг/м<sup>3</sup>);
- $\varepsilon$  – степень черноты материала плиты;
- $\varphi$  – коэффициент лучеиспускания материала плиты;
- $n_k$  – число крепежных пластин;
- $h_k$  – высота крепежной пластины (м);
- $s_k$  – ширина крепежной пластины (м);
- $l_k$  – длина части крепежной пластины, находящейся в воздухе (м);
- $m_k$  – индекс материала крепежных пластин: 1 – нержавеющая сталь, 2 – титан, 3 – ванадий, 4 – константан, 5 – нихром;
- $R$  – индекс расположения плиты: 1 – верхняя, 2 – нижняя, 3 – промежуточная;
- $t_0$  – начальная температура плиты (°С);
- $t_1, t_2, t_3$  – рабочие температуры нагрева плиты (°С);
- $Q_1, Q_2, Q_3$  – мощности плиты при рабочих температурах (кВт);
- $\tau_n$  – нормативная продолжительность нагрева плиты (ч);
- $\alpha_c$  – комплексный коэффициент теплоотдачи от поверхностей плиты в окружающий воздух при стеснённой конвекции (Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

### 7.1. Данные для балансовых расчётов

№	$l$	$s$	$h$	$m$	$R$	$n_k$	$m_k$	$h_k$	$s_k$	$l_k$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$\tau_n$	$\alpha_c$
1	0,6	0,6	0,06	1	1	4	1	0,01	0,03	0,025	6,75	6,5	6,15	2	8
2	0,8	0,6	0,07	2	2	4	2	0,01	0,04	0,03	5,85	5,7	5,1	1,5	7
3	1,4	0,7	0,08	3	3	6	3	0,015	0,05	0,03	11,7	11,3	10,5	3	6
4	1,2	1,2	0,08	2	1	6	4	0,01	0,04	0,025	15,8	15,1	14,3	3,5	6,5
5	1,2	1,2	0,07	3	2	6	5	0,015	0,04	0,3	17,5	16,9	16,1	3,5	7
6	0,8	0,8	0,06	1	3	4	2	0,01	0,035	0,25	12,5	12	10,8	2,5	9
7	1,2	0,7	0,07	3	1	6	3	0,015	0,05	0,03	11	10,5	9,8	3	7,5
8	0,4	0,4	0,05	1	2	2	4	0,01	0,025	0,02	3,8	3,4	2,8	1,25	8,5
9	0,4	0,4	0,06	2	3	2	5	0,01	0,03	0,03	4,1	3,8	3,4	1,5	9
10	1,4	0,6	0,07	1	1	6	1	0,015	0,045	0,035	11,4	10,8	10,1	3	7
11	1,12	0,7	0,07	2	2	6	3	0,02	0,04	0,03	13,4	12,8	12,1	3,5	8
12	0,5	0,41	0,07	3	3	4	4	0,01	0,03	0,025	4,5	4,25	3,9	0,75	9,5
13	2,0	0,65	0,08	2	1	8	5	0,015	0,05	0,03	20	19,2	18,7	4	6
14	1,8	0,9	0,09	3	2	8	1	0,015	0,045	0,035	18,5	17,9	17,4	3,75	7
15	2,4	0,8	0,09	1	3	8	2	0,02	0,05	0,03	25	24,2	23,4	4	8

Принять:  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 170^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 200^\circ\text{C}$ ,  $t_3 = 250^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,75$ ,  $\varphi = 0,8$ .

#### Порядок выполнения работы

1. Сформировать зависимость коэффициента теплоотдачи в воздух от температуры поверхности плиты при свободной конвекции:

$$\alpha_B(t_n, L) = \frac{\lambda_B}{L} \cdot A \cdot [\text{Gr}(t_n, L) \cdot \text{Pr}(t_n)]^n + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \frac{(t_n + 273) - (t_0 + 273)}{t_n - t_0},$$

где  $\text{Gr}(t_n, L) \cdot \text{Pr}(t_n) = g \cdot L^3 \cdot \beta_B(t) \cdot (t_n - t_0) \cdot \left( \frac{\rho_B(t)}{\mu_B(t)} \right)^2 \cdot \frac{c_B(t) \cdot \mu_B(t)}{\lambda_B(t)}$  – про-

изведение критериев Грасгофа и Прандтля;  $t_n$  – температура поверхности плиты;  $t = (t_n + t_0)/2$  – определяющая температура;  $g$  – ускорение свободного падения;  $L$  – определяющий размер (ширина плиты  $s$ );  $\lambda_B(t)$ ,  $\beta_B(t)$ ,  $\rho_B(t)$ ,  $c_B(t)$ ,  $\mu_B(t)$  – коэффициент теплопроводности, коэффициент объёмного расширения, плотность, теплоемкость и динамическая вязкость воздуха при температуре  $t$  соответственно;  $A$ ,  $n$  – коэффициенты, значение которых зависит от значения произведения

$$K = \text{Gr}(t_{\text{п}}, L) \cdot \text{Pr}(t_{\text{п}}) \left( \begin{array}{l} \text{при } K < 500 \left\{ \begin{array}{l} A = 1,18; \\ n = 0,125; \end{array} \right. \\ \text{при } 500 \leq K < 2 \cdot 10^7 \\ \left\{ \begin{array}{l} A = 0,54; \\ n = 0,25; \end{array} \right. \\ \text{при } K > 2 \cdot 10^7 \left\{ \begin{array}{l} A = 0,135; \\ n = 0,33. \end{array} \right. \end{array} \right).$$

2. Рассчитать массу плиты  $M = l \cdot s \cdot h \cdot \rho$ , площадь стока тепла в крепёж  $F_{\text{к}} = s_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}$  и средние температуры плиты при её нагреве до каждой из заданных рабочих температур  $t_{\text{ср}i} = (t_0 + t_i)/2$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

3. Определить значения стока тепла в крепёж при нагреве плиты до каждой из заданных рабочих температур:

$$\Delta Q_{\text{ки}} = n_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{к}} \cdot \frac{F_{\text{к}}}{l_{\text{к}}} \cdot (t_i - t_{\text{ср}i}), \quad i = 1, 2, 3.$$

4. Определить значения стока тепла в воздух

$$\Delta Q_{\text{в}i} = \alpha_{\text{в}}(t_{\text{ср}i}, s) \cdot 2 \cdot (l \cdot s + s \cdot h + h \cdot l) \cdot (t_{\text{ср}i} - t_0), \quad i = 1, 2, 3$$

и продолжительности нагрева плиты до каждой из рабочих температур

$$\tau_i = \frac{M \cdot c \cdot (t_i - t_0)}{Q_i - \Delta Q_{\text{в}i} - \Delta Q_{\text{ки}}}, \quad i = 1, 2, 3$$

в условиях свободной конвекции.

5. Определить значения стока тепла в воздух и продолжительности нагрева плиты до каждой из рабочих температур в рабочих условиях (в формуле п. 4 для расчёта  $\Delta Q_{\text{в}i}$ ,  $i = 1, 2, 3$  заменить  $\alpha_{\text{в}}(t_{\text{ср}i}, s)$  на  $\alpha_{\text{с}}$  для тех поверхностей плиты, где при заданном её расположении конвекция в рабочих условиях будет стеснённой, и на 0, где конвекции не будет совсем).

6. Рассчитать необходимые мощности плиты при рабочих температурах ( $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$ ) для заданной нормативной продолжительности её нагрева  $\tau_{\text{н}}$  в условиях свободной конвекции и в рабочих условиях.

7. Построить графики зависимостей стока тепла в крепёж и в воздух (в условиях свободной конвекции и в рабочих условиях) от средней температуры нагрева плиты.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите основные промышленные способы разогрева нагревательных плит вулканизационных прессов. Укажите их достоинства и недостатки.

2. Перечислите основные критерии выбора материала нагревательной плиты вулканизационного пресса и крепёжных пластин.



3. Какая поверхность верхней нагревательной плиты пресса не учитывается при расчёте стока тепла в воздух в рабочих условиях? Для каких поверхностей этой плиты конвекцию можно считать свободной?

4. Назовите основной критерий выбора мощности нагревательных плит вулканизационного пресса.

5. В каких случаях необходимо предусматривать принудительное охлаждение нагревательных плит вулканизационного пресса?

#### 7.6.2. РАСЧЁТ ЧИСЛА ВИТКОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИНДУКТОРА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ПРЕССА

С применением системы инженерных расчётов MathCAD определить глубину области тепловыделения и число витков индуктора заданных размеров, обеспечивающее:

- выделение требуемой мощности;
- обеспечение требуемых значений коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и электрического к. п. д. индукционного нагрева  $\eta$ ;
- возможность размещения катушки индуктора в пазу заданных размеров.

В отчёт о выполнении задания включить его формулировку, необходимые комментарии к расчётным формулам и графики зависимостей глубины области тепловыделения и числа витков индуктора от  $\cos \varphi$  и  $\eta$ .

Условные обозначения:

$U$  – напряжение сети (В);

$f$  – частота переменного тока (Гц);

$Q_{и}$  – максимальная мощность индуктора (кВт);

$n_{и}$  – число индукторов в плите;

$l_{и}$  – длина индуктора (см);

$s_{и}$  – ширина индуктора (см);

$s$  – ширина паза под индуктор (мм);

$h$  – высота паза под индуктор (мм);

$d$  – диаметр провода индуктора (мм);

$h_{и}$  – толщина изоляции провода индуктора (мм);

$\cos \varphi_{т}$  – требуемое значение  $\cos \varphi$ ;

$\eta_{т}$  – требуемое значение к. п. д. индукционного нагрева;

$m$  – индекс материала плиты: 1 – углеродистая сталь, 2 – нержавеющая сталь, 3 – жаростойкая сталь;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала плиты (Ом·м);

$\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление материала плиты при 0 °С (Ом·м);

$\rho_{м}$  – удельное электрическое сопротивление материала провода индуктора (Ом·м).

## 7.2. Данные для расчёта числа витков индуктора

№	$m$	$\cos \varphi_T$	$\eta_T$	$n_{II}$	$Q_{II}$	$l_{II}$	$s_{II}$	$s$	$h$	$d$	$h_{II}$
1	1	0,87	0,85	6	1,25	25	17,5	25	25	1,8	0,25
2	2	0,85	0,86	3	2,5	45	17	23	25	2	0,2
3	3	0,86	0,87	14	0,85	25	17	25	24	1,5	0,3
4	1	0,88	0,84	24	0,67	24	16	24	24	1,8	0,24
5	2	0,85	0,88	24	0,75	23	17	23	23	2,2	0,22
6	3	0,89	0,86	8	1,625	30	16	22	24	2	0,27
7	1	0,87	0,84	24	0,5	23	15	23	22	1,5	0,28
8	2	0,88	0,85	2	2,0	32	15	25	23	2	0,21
9	3	0,86	0,87	4	1,1	15	15	24	25	1,8	0,23
10	1	0,85	0,88	14	0,9	12	16	23	22	2,2	0,26
11	2	0,89	0,85	4	1,3	17	12	25	25	1,5	0,29
12	3	0,86	0,86	10	2,4	55	17	24	23	2	0,25
13	1	0,88	0,84	20	1,0	35	15	25	22	2,2	0,24
14	2	0,87	0,88	12	1,1	25	10	24	24	1,8	0,27
15	3	0,86	0,87	8	1,25	12	25	23	25	1,5	0,2

Принять:  $U = 220$ ,  $f = 50$ , соединение индукторов – последовательное,

$$\rho_m = 2,67 \cdot 10^{-8}, \quad \rho = \begin{cases} 2,144 \cdot 10^{-7}, & m=1; \\ 5,075 \cdot 10^{-7}, & m=2; \\ 7,035 \cdot 10^{-7}, & m=3, \end{cases} \quad \rho_0 = \begin{cases} 2 \cdot 10^{-7}, & m=1; \\ 4,8 \cdot 10^{-7}, & m=2; \\ 6,9 \cdot 10^{-7}, & m=3. \end{cases}$$

### Порядок выполнения работы

1. Рассчитать периметр  $\Pi = 2 \cdot h + 2 \cdot s$  и площадь сечения  $S = h \cdot s$  паза индуктора.

2. Рассчитать среднюю длину витка индуктора  $l_B = 2 \cdot (l_{II} + s_{II} - 2 \cdot s)$ .

3. Сформировать зависимости:

– удельной поверхностной мощности в загрузке от  $\eta$  –

$$P(\eta) = \frac{Q_{II} \cdot \eta}{\Pi \cdot l_B};$$

– относительной магнитной проницаемости материала плиты от  $\eta$ :

$$\mu(\eta) = A \cdot [P(\eta)]^n \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{0,25}, \quad \text{где } A = \begin{cases} 59267,6, & m=1; \\ 24876,2, & m=2; \\ 17687,7, & m=3; \end{cases} \quad n = \begin{cases} -0,638, & m=1; \\ -0,697, & m=2; \\ -0,723, & m=3; \end{cases}$$

- напряжённости магнитного поля в пазу индуктора от  $\eta$ :

$$H(\eta) = 31,623 \sqrt{\frac{P(\eta)}{\sqrt{\rho \cdot \mu(\eta) \cdot f}}};$$

- магнитной движущей силы индуктора от  $\eta$ :  $Iw(\eta) = H(\eta) / \sqrt{2}$ ;

- тока индуктора от  $\cos\varphi$ :  $I(\cos\varphi) = \frac{n_{\text{и}} \cdot Q_{\text{и}}}{\cos\varphi \cdot U}$ ;

- числа витков индуктора от  $\cos\varphi$  и  $\eta$ :  $n_{\text{в}}(\cos\varphi, \eta) = \frac{Iw(\eta)}{I(\cos\varphi)}$ ;

- площади сечения катушки индуктора от  $\cos\varphi$  и  $\eta$ :

$$S_{\text{и}}(\cos\varphi, \eta) = n_{\text{в}}(\cos\varphi, \eta) \cdot (d + 2 \cdot h_{\text{и}})^2;$$

- активной мощности индуктора от  $\cos\varphi$  и  $\eta$ :

$$P_{\text{А}}(\cos\varphi, \eta) = I(\cos\varphi)^2 \cdot \rho_{\text{м}} \cdot \frac{l_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}}(\cos\varphi, \eta)}{0,25 \cdot \pi \cdot d^2} + Q_{\text{и}};$$

- реактивной мощности индуктора от  $\eta$ :

$$P_{\text{Q}}(\eta) = 3,95 \cdot 10^{-6} \cdot Iw(\eta)^2 \cdot f \cdot l_{\text{в}} \cdot S + 0,6 \cdot Q_{\text{и}};$$

- полной мощности индуктора от  $\cos\varphi$  и  $\eta$ :

$$P_{\text{и}}(\cos\varphi, \eta) = \sqrt{P_{\text{А}}(\cos\varphi, \eta)^2 + P_{\text{Q}}(\eta)^2}.$$

4. Определить значения  $\cos\varphi$  и  $\eta$ , удовлетворяющие неравенствам

$$\frac{P_{\text{А}}(\cos\varphi, \eta)}{P_{\text{Q}}(\eta)} \geq \cos\varphi_{\text{т}}, \quad \frac{Q_{\text{и}}}{P_{\text{А}}(\cos\varphi, \eta)} \geq \eta_{\text{т}}, \quad S_{\text{и}}(\cos\varphi, \eta) \leq S.$$

5. Рассчитать число витков индуктора и глубину области тепло-

выделения  $\Delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu(\eta) \cdot f}}$ .

6. Построить графики зависимостей глубины области тепловыделения и числа витков индуктора от  $\cos\varphi$  и  $\eta$ .

### Контрольные вопросы

1. Перечислите преимущества индукционного способа нагрева плит вулканизационных прессов по сравнению с омическим.

2. Чем заполняют пазы в нагревательных плитах после монтажа в них катушек индукторов?

3. Каково минимально допустимое расстояние от края нагревательной плиты до ближайшего паза под индуктор?

4. Какой провод чаще всего используют для изготовления катушек индукторов?

5. Почему индукторы, расположенные у краёв нагревательной плиты, делают более мощными, чем расположенные ближе к середине плиты?

### 7.6.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ИНДУКТОРОВ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ВУЛКАНИЗАЦИОННОГО ПРЕССА

С применением системы инженерных расчётов MathCAD аппроксимировать заданную форму сечения индукторов указанной нагревательной плиты вулканизационного пресса прямоугольниками, определить положение индукторов и интенсивность их тепловыделения.

В отчёт о выполнении задания включить его формулировку, необходимые комментарии к расчётным формулам и изображение сечения плиты, содержащее все индукторы.

Условные обозначения:

$l$  – длина плиты (м);

$s$  – ширина плиты (м);

$h$  – высота плиты (м);

$n_{и}$  – число индукторов в плите;

$l_{и}$  – длина индуктора (см);

$s_{и}$  – ширина индуктора (см);

$s_{п}$  – ширина паза под индуктор (мм);

$h_{п}$  – высота паза под индуктор (мм);

$Q$  – средняя мощность плиты (кВт);

$p$  – минимально допустимое расстояние от края плиты до паза ближайшего индуктора (мм);

$r, R$  – меньший и больший радиусы скруглений индукторов (мм).

### 7.3. Данные для определения положения и тепловыделения индукторов

№	$l$	$s$	$h$	$n_{и}$	$l_{и}$	$s_{и}$	$s_{п}$	$h_{п}$	$Q$
1	0,6	0,6	0,06	6	25	17,5	25	25	6,75
2	0,8	0,6	0,07	3	45	17	23	25	5,85
3	1,4	0,7	0,08	14	25	17	25	24	11,7
4	1,2	1,2	0,08	24	24	16	24	24	15,8
5	1,2	1,2	0,07	24	23	17	23	23	17,5
6	0,8	0,8	0,06	8	30	16	22	24	12,5
7	1,2	0,7	0,07	24	23	15	23	22	11
8	0,4	0,4	0,05	2	32	15	25	23	3,8
9	0,4	0,4	0,06	4	15	15	24	25	4,1
10	1,4	0,6	0,07	14	12	16	23	22	11,4
11	1,12	0,7	0,07	10	55	17	25	25	13,4
12	0,5	0,41	0,07	4	17	12	24	23	4,5
13	2,0	0,65	0,08	20	35	15	25	22	20
14	1,8	0,9	0,09	12	25	10	24	24	18,5
15	1,3	0,35	0,06	8	12	25	23	25	15

Принять  $p = 25$ ,  $r = 15$ ,  $R = r + s_{п}$ .

### Порядок выполнения работы

1. Определить длину средней линии каждого индуктора:

$$l_{\text{ср}i} = 2 \cdot (l_i - r - R) + 2 \cdot (s_i - r - R) + \pi \cdot (r + R), \quad i = 1, \dots, n_i.$$

2. Скорректировать длину и ширину каждого индуктора при аппроксимации его сечения прямоугольником:

$$l_{ni} = \frac{l_{\text{ср}i}}{2 \cdot \left(1 + \frac{s_{ni}}{l_{ni}}\right)}, \quad s_{ni} = l_{\text{ср}i} / 2 - l_{ni}, \quad i = 1, \dots, n_i.$$

3. Выбрать координаты центра каждого индуктора  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$ ,  $i = 1, \dots, n_i$  с учётом изменения их размеров согласно п. 2 и минимально допустимого расстояния от края нагревательной плиты до паза ближайшего индуктора.

4. Рассчитать интенсивность тепловыделения индукторов:

$$q = \frac{Q}{n_i \cdot 2 \cdot h_{\text{п}} \cdot [h_{\text{п}} \cdot (s_{\text{п}} + s_{\text{п}}) + h_{\text{п}} \cdot (l_{\text{п}} - s_{\text{п}})]}.$$

5. Сформировать зависимость тепловыделений в сечении каждого индуктора от координат:

$$q_{ni}(x, y) = q, \text{ если } (((y_{ci} - 0,5 \cdot s_i \leq y \leq y_{ci} + 0,5 \cdot s_i) \wedge \\ \wedge ((x_{ci} - 0,5 \cdot l_i \leq x \leq x_{ci} - 0,5 \cdot l_i + s_{\text{п}i}) \vee (x_{ci} + 0,5 \cdot l_i - s_{\text{п}i} \leq x \leq x_{ci} + 0,5 \cdot l_i))) \vee \\ \vee ((x_{ci} - 0,5 \cdot l_i + s_{\text{п}i} \leq x \leq x_{ci} + 0,5 \cdot l_i - s_{\text{п}i}) \wedge ((y_{ci} - 0,5 \cdot s_i \leq y \leq y_{ci} - 0,5 \cdot s_i + s_{\text{п}i}) \vee \\ \vee (y_{ci} + 0,5 \cdot s_i - s_{\text{п}i} \leq y \leq y_{ci} - 0,5 \cdot s_i))))), \text{ иначе } q_{ni} = 0, \quad i = 1, \dots, n_i.$$

6. Изобразить сечение плиты, содержащее все индукторы: сформировать массив координат  $(x, y)$  точек сечения плиты с шагом 1...2 мм,

поставить в соответствие каждой из них значение  $Q_{ni} = \bigcup_{i=1}^{n_i} q_{ni}(x, y)$  и изобразить этот массив графически.

### Контрольные вопросы

1. В какой части объёма индукционной нагревательной плиты вулканизационного прессы выделяется тепло?

2. При каком условии допускается решение задачи распространения тепла в объёме индукционной нагревательной плиты вулканизационного прессы без учёта распределения магнитной индукции?

3. Перечислите наиболее распространённые конфигурации индукторов нагревательных плит вулканизационных прессов.

4. Каков максимально допустимый разброс температур по рабочей поверхности нагревательной плиты вулканизационного пресса?

5. Чем определяется допустимый разброс температур в объёме вулканизируемого РТИ?

#### 7.6.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАЗОГРЕВА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ВУЛКАНИЗАЦИОННОГО ПРЕССА ДО РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

С применением системы инженерных расчётов MathCAD определить продолжительность разогрева указанной нагревательной плиты вулканизационного пресса до рабочей температуры ( $t_{\text{раб}}$ ), используя метод конечных интегральных преобразований.

В отчёт о выполнении задания включить его формулировку, необходимые комментарии к расчётным формулам и изображение поля температур рабочей поверхности плиты в момент окончания нагрева.

Принять начальную температуру  $t_0 = 20$  °С.

В качестве точки с координатами (0, 0, 0) принять нижний левый угол плиты.

#### 7.4. Данные для определения продолжительности разогрева плиты \*

№	$t_{\text{раб}}$ , °С	Положение плиты	Условия нагрева	Контрольная термопара		
				$x_{\text{к}}$ , мм	$y_{\text{к}}$ , мм	$z_{\text{к}}$ , мм
1	170	Нижняя	Свободная конвекция	300	300	30
2	170	Верхняя	Стеснённая конвекция	400	300	35
3	200	Нижняя	Стеснённая конвекция	700	350	40
4	250	Верхняя	Свободная конвекция	600	600	40
5	250	Нижняя	Свободная конвекция	600	600	35
6	200	Верхняя	Стеснённая конвекция	400	400	30
7	200	Нижняя	Стеснённая конвекция	600	350	35
8	170	Верхняя	Свободная конвекция	200	200	30
9	170	Нижняя	Свободная конвекция	200	200	30
10	200	Верхняя	Стеснённая конвекция	700	300	35
11	250	Нижняя	Стеснённая конвекция	560	350	35
12	170	Верхняя	Свободная конвекция	250	205	35
13	250	Нижняя	Свободная конвекция	1000	325	40
14	250	Верхняя	Стеснённая конвекция	900	450	45
15	200	Нижняя	Стеснённая конвекция	650	175	30

\*К данным соответствующих вариантов добавить данные из табл. 7.3.

## Порядок выполнения работы

1. Добавить к рабочему файлу MathCAD, сформированному при выполнении предыдущего задания, следующие процедуры:

- определение коэффициентов теплоотдачи от поверхностей плиты в зависимости от рабочей температуры, положения плиты и условий нагрева, см. п. 7.6.1;

- поиск последовательных корней алгебраического уравнения методом бисекции;

- вычисление собственных чисел функции тепловыделения;

- вычисление значения интегральной функции тепловыделения;

- вычисление значения температуры в любой точке объёма плиты в любой момент времени.

2. Определить продолжительность нагрева плиты: момент времени с точностью до 1 с, когда температура в месте установки контрольной термопары будет равна  $t_{\text{раб}} \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

3. Рассчитать температурное поле рабочей поверхности плиты с шагом 1...5 мм в зависимости от размеров плиты и изобразить его графически.

4. Определить минимальную, максимальную и среднюю температуру рабочей поверхности плиты, степень неравномерности её температурного поля по критерию

$$Cr = \frac{1}{n \cdot m} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ij} - t_{\text{зад}})^2, \quad (7.1)$$

где  $n, m$  – количество точек рабочей поверхности плиты по её длине и ширине, в которых рассчитано значение температуры;  $T_{ij}$  – значение температуры в точке объёма плиты с координатами

$$\begin{cases} (x_i, y_j, h) & \text{– для нижней плиты;} \\ (x_i, y_j, 0) & \text{– для верхней плиты.} \end{cases}$$

## Контрольные вопросы

1. Какие допущения принимаются при расчёте температурного поля нагревательной плиты вулканизационного прессы методом конечных интегральных преобразований? Почему?

2. Почему для определения значений собственных чисел функции тепловыделения используется метод бисекции?

3. Можно ли определить значение интегральной функции тепловыделения аналитически, если не аппроксимировать реальную форму сечений индукторов прямоугольниками?

4. Какое условие используется в качестве признака прекращения суммирования бесконечного ряда при расчёте значения температуры в любой точке объёма плиты в любой момент времени?

5. Как чаще всего оценивается степень равномерности температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты?

#### 7.6.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИНДУКТОРОВ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ПРЕССА

Повысить степень равномерности температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты, соответствующую моменту её разогрева до рабочей температуры ( $t_{\text{раб}}$ ), путём изменения положения некоторых индукторов. Расчёты провести в системе MathCAD. В качестве начального приближения использовать температурное поле, полученное при выполнении предыдущей работы, см. п. 7.4.

В отчёт о выполнении задания включить его формулировку, необходимые комментарии к расчётным формулам, рекомендации по изменению положения индукторов и изображение поля температур рабочей поверхности плиты при исходном и рекомендуемом расположении индукторов.

Исходные данные взять из табл. 7.3 и 7.4.

#### **Порядок выполнения работы**

1. На основе анализа температурного поля рабочей поверхности плиты, полученного при выполнении предыдущей работы, определить зоны его наибольшей неравномерности.

2. Отобрать индукторы, изменение положения которых может привести к повышению степени равномерности поля.

3. Поочередно сдвигая каждый из этих индукторов влево, вправо, вниз, вверх с учётом обеспечения минимального расстояния от паза индуктора до края плиты (25 мм) и минимального расстояния между пазами соседних индукторов (50 мм), оценить изменение степени неравномерности её температурного поля по критерию (7.1).

4. Выбрать наиболее перспективные направления изменения положения каждого из отобранных индукторов и осуществить их попарно, тройками и т.д., вычисляя для каждого из вариантов значение критерия (7.1).

5. Определить оптимальный вариант изменения положения индукторов по минимальному значению критерия, изобразить соответствующее ему поле температур рабочей поверхности плиты.



### Контрольные вопросы

1. В каких точках рабочей поверхности нагревательных плит вулканизационных прессов обычно наблюдается наибольшая степень неравномерности температурного поля?

2. Для чего рабочий объём вулканизационного пресса, содержащий нагревательные плиты и пресс-формы, во время прессования РТИ закрывают металлическими шторками или даже герметизируют и создают в нём вакуум?

3. Почему при решении задач оптимизации температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты в качестве критерия обычно используют функцию вида (7.1), а не среднее абсолютное или среднеквадратичное отклонение температуры от заданной?

4. Как могут измениться требования к равномерности температурного поля нагревательных плит вулканизационного пресса, если пресс ориентирован на выпуск мелкосерийных партий РТИ небольших размеров?

5. Как изменится методика повышения степени равномерности температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты, если к возможности изменения положения индукторов добавить возможность изменения мощности каждого из них?

### Вопросы для самопроверки

1. Какие соображения принимаются во внимание при выборе геометрических размеров и материала нагревательных плит вулканизационных прессов?

2. Какую задачу необходимо решить для обоснованного выбора геометрических размеров и материала пресс-форм для вулканизации резинотехнических изделий?

3. Какую форму чаще всего имеют индукционные нагревательные элементы плит вулканизационных прессов?

4. Почему задача определения положения пресс-форм на поверхности нагревательных плит решается для стационарного режима нагрева системы «плиты–пресс-формы–изделия»?

5. Для чего между опорными частями рамы вулканизационного пресса и нагревательными плитами устанавливаются теплоизоляционные прокладки?

6. Почему гидроцилиндры вулканизационных прессов рассчитываются как толстостенные сосуды?

7. Почему расчёт гидроцилиндра вулканизационного пресса обычно дополняют прочностным расчётом его стола?

8. Перечислите основные функции системы информационной поддержки принятия решений при проектировании прессового оборудования.

## Список литературы к главе 7

1. **Индексы** интенсивности промышленного производства. Доклад: Центр развития [Электронный ресурс] – Режим доступа : [http://www.dcenter.ru/iipp/iipp\\_10-11.htm](http://www.dcenter.ru/iipp/iipp_10-11.htm). – Загл. с экрана.
2. **Басов, Н. И.** Расчёт и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. – М. : Химия, 1986. – 488 с.
3. **ГОСТ 14901–93.** Пресс-формы для изготовления резинотехнических изделий. Общие технические условия. – Дата введения 01.01.1995.
4. **Малыгин, Е. Н.** Методика теплового расчёта нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, А. С. Крушатин // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 11. – С. 48 – 56.
5. **Глебов, А. О.** Сравнение методик моделирования температурных полей индукционных нагревательных плит / А. О. Глебов, С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 7. – С. 23 – 28.
6. **Карпушкин, С. В.** Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов, А. О. Глебов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 110 – 120.
7. **Глебов, А. О.** Методика оптимизации режимных и конструктивных характеристик нагревательной плиты вулканизационного пресса / А. О. Глебов, С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 137 – 151.
8. **Карпов, С. В.** Оценка эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий и системы их обогрева на вулканизационном прессе / С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 10 – 16.
9. **Карпушкин, С. В.** Разработка виртуальной модели температурного поля резинотехнического изделия в процессе его обработки на вулканизационном прессе / С. В. Карпушкин, С. В. Лавров, К. С. Корнилов // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 477 – 482.
10. **Малыгин, Е. Н.** Моделирование и расчёт процессов индукционного нагрева прессового оборудования при производстве резинотехнических изделий / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 3. – С. 85 – 104. – DOI: 10.7463/0313.0541632.
11. **ГОСТ 4248–92.** Доски асбестоцементные электротехнические дугостойкие. Технические условия. – Дата введения 01.01.1993.
12. **Методика** проектного расчёта рам гидравлических вулканизационных прессов для производства резино- и асбестотехнических изделий / ЗАО «Завод Тамбовполимермаш». – 2008. – 17 с.

## Глава 8

# DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR RESEARCH PROJECTS

---

Today, designing, manufacturing and sales of industrial products involve large amounts of documents: project specifications, reports and orders, patents and standards, etc. Safe storage and quick access to these documents contribute to sustainable development of any company. At the same time, the traditional paper-based document management has plenty of shortcomings, hence, there is the need to develop and implement automated information system of electronic document management system (EDMS) [1].

The introduction of such a system is designed to solve the main problems of paper document management: loss of documents, long search for information, large storage area, low-speed editing, etc.

The purpose of this paper is to study the possibility of integration of electronic document management system and electronic product catalogs.

Storage of documents with no connection to relevant current orders or projects does not make sense as any networked storage can handle such a task. In this respect, the synthesis of EDMS and product catalogs is of the greatest interest. The introduction of electronic document management system can solve a lot of 'hidden' problems and improve the performance of the organization as a whole. First, let us consider the above mentioned systems separately.

### 8.1. ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM

The main element of the EDMS is a document. Electronic document management system involves the arrangement of an electronic archive and the information flow management, as well as automation of various departments of an organization (office, accounting, certification, etc.), possibility to add modules generating contracts, applications, organizational documents (e.g., for meetings, conferences) [2, 3].

The requirements to modern EDMSs include ensuring orderly access to information and improving complex business processes within an organization [4]. The domestic market systems are slowly developing in this direction, however, they are lagging behind their foreign counterparts, such as Documentum [5]. In this work, this intelligent system will be used to consider the main problems solved by EDMS, such as quick access to information, transparency of document flow, implementation of electronic archiving and protection from unauthorized access. In developing the EDMS for research and innovation activities it is necessary to focus on the requirements

of the subject area, rather than use expensive software with unnecessary features or free non-optimal solutions.

The practical value of the EDMS implementation is as follows [6, 7, 8, 9, 10, 11]:

- Reduction in the time spent on searching and filling out documents.
- Secure storage of documents: all documents are digitized, collected on the server and have backups.
- Possibility to retrieve accurate information about the author of the document and all the users to authorize and amend it, with the exact time of the document creation and editing dates.
- Full and partial exclusion of paper documentation from the internal circulation within the company and the transition to the electronic version of the archive, resulting in the reduction in the costs of document flow management in the organization [12].

Thus, the electronic document management system streamlines the work of documentation, increase the security of the stored data, but at the same time it is not be linked to actual production. At the beginning of this article we mentioned the possibility of integrating product catalogs into classical EDMS so as to increase the effect achieved through the automation of document management. This brings us to the need to study product catalogs.

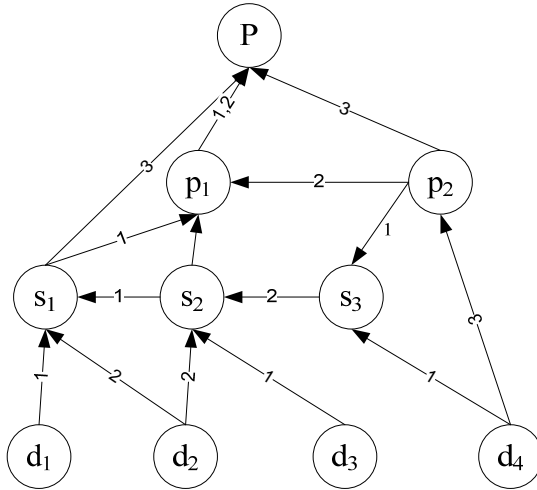
## 8.2. MATHEMATICAL MODEL OF PRODUCT CATALOGS

The majority of documents of a chemical industry company, for example, are based on product catalogs including parts, materials, tools, etc. It is necessary to create such an intelligent system which will enable the user to edit records, search the database and generate orders by retrieving a group of records from the database and extracting the necessary information (cost, structure, physical and economic characteristics). Given the large number of entries, their strict classification and close links between the product items we need to develop a mathematical model at the stage of creating the information system structure and related database of product catalogs [13, 14].

In the first phase of the model development we formed a graph of catalog nodes. To illustrate this, we shall consider the structure comprised of the sets of parts, assemblies and products, which together form the final project. At the same time, the assemblies and products are the nodes of the same level and can be incorporated into each other, while the parts are finite elements, forming the basis for the assembly or product.

We introduce the following notation:

$P$  is a project document,  $p_1, p_2, \dots$  is a set of all products,  $s_1, s_2, \dots$  is a set of all assemblies,  $d_1, d_2, \dots$  is a set of all parts.



**Fig. 8.1. Presentation of the project in the form of a graph**

Thus, the project can be shown as a graph  $P = [W, M]$ , where  $W = \{d_1, \dots, d_n; s_1, \dots, s_m; p_1, \dots, p_k\}$  is a set of vertices;  $M$  is a set of oriented branches formed in  $(w_i, w_j)$  pairs, which are elements of the set  $W$ .

Products, parts and assemblies can be incorporated into each other by the following rules:

1. Output only is parts.
2. Input and output are nodes that are often presented by assemblies, but at higher levels they can be represented by products.
3. Input only is a project that is the end product.

The edges of the graph are numbered to identify the possible ways of forming the project. As it can be seen from fig. 8.1, the project can be made with various combinations of vertices (three options are indicated). Thus, using the graph, we can assess the project by various design criteria, and if necessary, optimize it using interchangeable components. To ensure the best option, one must find the optimal path [15].

Let  $M^{w_i, w_j} = \{w_i, w_j\}$  be the path between the vertices  $w_i$  and  $w_j$ , with  $L(M^{w_i, w_j})$  the length of this path; in order to calculate this length each intermediate branch  $(w_s, w_t)$  is assigned a weight factor  $l_{w_s, w_t}$  is applicability of the vertex  $w_s$  in the vertex  $w_t$ ), determining its value: the

price of a product, mass of a part, manufacturing time, etc. Thus, the path length from the vertex  $w_i$  to the vertex  $w_j$  is equal to:

$$L(M^{w_i, w_j}) = \underset{FORALL(w_s, w_t) ISIN(M^{w_i, w_j})}{SUM}(L_{w_s, w_t}).$$

A full applicability of the node  $w_i$  in the node  $w_j$  is calculated as a minimum length of the path  $M^{w_i, w_j}$  :

$$l_{w_i, w_j} = L_{\min}(M^{w_i, w_j}).$$

Consequently, the applicability of the part  $w_0$  in the project is determined as the optimum position of the parts inside the assemblies  $s_i$ , products  $p_j$ , or in the project  $P$ :

$$l_{w_0, P} = L_{\min}(M^{w_0, P}) = \underset{(s_i) ISIN(M^{w_0, P})}{SUM}(L_{\min}(M^{w_0, s_i})) + \underset{(p_j) ISIN(M^{w_0, P})}{SUM}(L_{\min}(M^{w_0, p_j})) + L(M^{w_0, P}).$$

Based on the database of products, assemblies, parts and boundary conditions (these are defined by the customer, or the current inventory / business needs and can be expressed in the amount of material / products, cost, company budget enterprise, time slots) we determine the optimal paths in the graph  $P$ . Then the goal function is the function of the project efficiency:

$$F(P) = \underset{FORALL(w_i, w_j) ISIN(P)}{SUM}(l_{w_i, P}).$$

The formulated problem of the project optimization is formulated as traveling salesman problem, which can be solved by any of the existing methods for extremal combinatorial problems, such as the exhaustive method, the branch-and-bound method. As a result of solving the problem, the optimal set of parts, assemblies and products for the given order is formed [16].

### 8.3. SOFTWARE FOR PRODUCT CATALOGS

The scripting language PHP, and the web server Wampserver (includes Apache, MySQL, script interpreter PHP, phpMyAdmin) were used as tools for developing a prototype module of product catalogs. The design was implemented in accordance with the principles of object-oriented programming, as well as the concept of MVC template:

- Model: the main executable code is packed in a separate class responsible for data checking, database use, and generating some basic elements of data output.

- Controller: data management, its output to pages as well as information retrieval from the forms is handled on separate pages by appropriate Model class. Thus, each page performs its tasks in terms of the basic classes of Model.

- Representation: the external interface (implemented by Cascading Style Sheets – CSS) is determined separately and applied to all pages of the site.

The authorization allows users to edit, add and delete records. Unauthorized users can only view records. Fig. 8.2 shows the interface of the developed prototype for the product catalog module.

CTKE.7.004.00.000				
<i>Example products</i>	Year	Letter	Group	Inventory number
	2014	O1	K	7912

Composition:		
	Number	Notation title
Product Total (1)	CTKE.8.004.000	<i>Ampule</i>
Assemblies Total (1)	BT.8.104.030	<i>Cap</i>
Parts Total (2)	BT.8.097.002	<i>Belt</i>
	BT.8.154.073	<i>Lined</i>

Included in:		
	Number	Notation title
Product Total (1)	CTKE.7.002.00.000	<i>The main product</i>

[Edit record](#)

**Fig. 8.2. The interface of the product catalog module**

The analysis of the document management system and automated product catalogs brings us to the conclusion that the product catalogs can be optimally integrated into a comprehensive electronic document management system as an external module. Furthermore, this integration can improve the efficiency of the system due to the possibility of storing any lists of parts or products, and referring to specific documents, drawings, reports, patents, and other documents.

Authorized users of the combined system have access to both the product database and all accompanying documents (instructions, technical specifications, certificates, etc.).

Obviously, the combined document management systems can be used for storing and processing of documents in the systems linked to real production and business processes of an organization. The EDMSs of this type ensure the safety and reliability of information and enable to affect directly the efficiency of production as a whole.

The developed software is a prototype and suggests further development by adding digital signature functions, intelligent search and creation of a mobile version of the project.

### **Вопросы для самопроверки**

1. For what reasons do the EDMS are used?
2. Name the main advantages of EDMS in compare with paper document management?
3. According to what rules the inclusion of parts and assemblies in each other is possible?
4. What equation is possible to calculate the applicability of a unit?
5. What equation is appropriate for calculation the efficiency of a project?
6. What methods are suitable for solving a task of travelling salesman?

### **Список литературы к главе 8**

1. **Pechnikova, T. V.** Practice working with documents in the organization / T. V. Pechnikova, A. V. Pechnikova. – M. : EMOS, 1999. – P. 208.
2. **Electronic Document Management System.** – URL : <http://www.ukessays.co.uk/essays/information-system/electronic-document-management-system.php>
3. **Banker, R. D.** The evolution of research on information systems: A fiftieth-year survey of the literature in Management Science / R. D. Banker, R. J. Kauffman // Management Science. – 2004. – Vol. 50. – P. 281 – 298.



4. **Market** EDMS 2013: rules dictate developers – URL : <http://www.cnews.ru/reviews/index.shtml?2013/03/05/521436>
5. **EMC** Document Information Rights Management – URL : <http://www.emc.com/collateral/software/data-sheet/h3112-irm-services-ds.pdf>
6. **Erlane K Ghani**. Development of Integrated Information Management System Service Quality Model in an Accounting Faculty / Erlane K Ghani, Kamaruzzaman Muhammad, Jamaliah Said // *International Journal of Business and Social Science*. – April, 2012. – Vol. 3. – No. 7.
7. **Contribution** of Integrated Management Systems to University Management: Case Study of the Federal University of Rio Grande Do Norte / Lucas Ambrósio B. de Oliveira, Natalia Veloso Caldas de Vasconcelos and other // *Journal of Social Sciences*. – 2011. – 7(3). – P. 415 – 422.
8. **Glass, R. L.** An assessment of systems and software engineering scholars and institutions (1999 – 2003) / R. L. Glass, T. Y. Chen // *Journal of Systems and Software*. – 2005. – Vol. 76. – P. 91 – 97.
9. **Palvia, P.** A profile of information systems research published in *Information & Management* / P. Palvia, P. Pinjani, E. H. Sibley // *Information & Management*. – 2007. – Vol. 44. – P. 1 – 11.
10. **Vessey, I.** A unified classification system for research in the computing disciplines / I. Vessey, V. Ramesh, R. L. Glass // *Information and Software Technology*. – 2005. – Vol. 47. – P. 245 – 255.
11. **Wokocho, C. M.** A Guide to Establishing Management Information System in Tertiary Institutions in Nigeria / C. M. Wokocho, E. I. Adedebayo // *African J. Basic & Appl. Sci.* – 2012. – 4(3). –P. 83 – 88.
12. **An Investigation** of Innovation in Higher Educational Environments-A Consideration of Five Substructures (Technical, Administrative, Information Systems, Information Technology and Knowledge Management) / Alireza Anvari, Gholam-Abbas Alipourian, Rohollah Moghimi and Abbas Taleb-Beidokhti // *Middle-East J. Sci. Res.* – 2012. – 11(9). – P. 1278 – 1285.
13. **Mubarakzyanov, G. M.** Mathematical Theory of Tasks Explosion Assembly Units / G. M. Mubarakzyanov, I. V. Dilevskiy // *Vestnik KSTU im. A. N. Tupoleva*. – 2008. – N 1. – P. 83 – 86.
14. **Database** Optimization Technique / A. V. Pomazanov, A. I. Belousova, A. O. Vasilyeva, A. V. Ostroukh // *In the World of Scientific Discoveries*. – 2012. – № 12. – P. 49 – 54.
15. **Vahid Zharfi**. A Novel Metaheuristic for Travelling Salesman Problem / Vahid Zharfi and Abolfazl Mirzazadeh // *Journal of Industrial Engineering* Volume. – 2013. – Article ID 347825.
16. **Levitin, A. V.** Introduction to The Design and Analysis of Algorithms / A. V. Levitin // Addison Wesley. – 2011. – 565 p.

## Глава 9

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

Современный уровень создания технических систем требует от разработчика умения формулировать (ставить) задачу исследования и осуществлять разработку такой системы, которая отвечала бы высоким техническим показателям, должна быть экономически обоснована, конкурентноспособна на рынке аналогичной технической продукции [1].

Выполнение таких требований обязывает разработчика не только иметь быстродействующие системы исследования, разработки и выпуска технической системы, но и два-три, а может быть и более, варианта аналогичного технического изделия, находящегося в различных стадиях разработки. Только в этом случае можно выдержать конкурентную борьбу на рынке.

Решение подобной задачи невозможно без использования современных достижений в области классической математики, математического моделирования, теории оптимального управления, системного анализа, современных информационных технологий и средств вычислительной техники [2].

При создании (проектировании) технической системы необходимы знания фундаментальных основ процессов, протекающих в объекте исследования, в тех прикладных областях, для которых разрабатывается техническая система. Без ясного и чёткого понимания процессов, которые протекают в технической системе, её создание невозможно. Кроме этого, разработка технической системы должна отвечать требованиям минимума материалоёмкости и энергозатрат, заданным требованиям эксплуатационных характеристик, включая техническое обслуживание, и, наконец, утилизации после выработки заданного срока эксплуатации [3 – 5].

Сократить время исследования и разработки технических систем в настоящее время можно только одним способом – уходом в область протекания технологических процессов в технической системе, представленных в форме математических отношений и реализуемых (решаемых) на быстродействующих средствах вычислительной техники. Другими словами – если время протекания конкретного процесса в технической системе составляет часы, то решение уравнения, описывающего такой процесс на компьютере, составляет доли секунды, т.е. анализ и синтез технической системы может осуществляться в другом, более скоротечном и удобном для разработчика временном масштабе.

Однако при этом разработчик должен иметь значительно большую «научновооружённость» и, в первую очередь, это касается использования математических методов общего и специального назначения, о которых ниже и пойдёт речь.

Анализ литературных источников позволяет сделать ряд выводов о некорректном применении классических и специальных математических методов при разработке и исследовании технических систем. В первую очередь это связано с неумением или нежеланием корректно осуществить постановку задачи исследования, а именно этот этап определяет, какие конструктивные и режимные характеристики объекта исследования подлежат определению, что является мерой оптимальности этих величин, какие процессы, протекающие в объекте исследования, необходимо учитывать, есть ли основания для описания таких процессов известными и проверенными зависимостями или есть необходимость изучения процессов на специальных лабораторных стендах, какие требования предъявляются к математической модели объекта исследования, которая в дальнейшем будет использоваться для поиска режимных и конструктивных характеристик объекта и т.д.

Естественно, что осуществить одномоментную постановку задачи чрезвычайно трудно, чаще всего невозможно. Поэтому процесс постановки является многоэтапным – от простейшего вербального до окончательно формализованного, когда исходная задача представлена в строгой математической форме, пригодной для её решения.

Зачастую в публикуемых работах предлагается математическая модель объекта исследования и не объясняется, для какой постановки задачи она пригодна, не уточняется область определения модели, её адекватность объекту исследования, а при тщательном анализе выявляется, что исследователь искажает понятие самого объекта исследования.

Если объект исследования (техническая система) достаточно сложен, то необходима декомпозиция поставленной задачи на систему взаимосвязанных задач, для которых также необходимы постановки задачи, выбор метода её решения и обоснование сходимости решения системы локальных задач к решению глобальной (исходной) задачи.

Современное состояние теории оптимального управления и средств вычислительной техники позволяет осуществлять постановку задач в экстремальной форме, что позволяет исследователю находить единственное, лучшее в смысле выбранного критерия оптимальности, решение.

Представление задачи исследования и проектирования технической системы в экстремальной форме позволяет получать минималь-

ные затраты сырья, материалов на изготовление технической системы, энергетических ресурсов на её эксплуатацию, предельно точно обеспечивать выполнение технологического регламента при функционировании и обслуживании технической системы.

Подобный подход правомерен, если в конкретной прикладной области есть необходимый минимум знаний для построения математической модели объекта исследования для конкретной постановки задачи. Однако такая ситуация бывает далеко не всегда. Может быть так, что отдельные процессы в объекте исследования недостаточно изучены и не могут быть с требуемой для практики точностью формализованы, т.е. описаны в математической форме. При этом появляются специфические особенности постановки таких задач и методов их решения. В этом случае постановка задачи изменяется – в алгоритм её решения вводится лицо, принимающее решение (ЛПР), т.е. эксперт, который компенсирует отсутствие необходимых для решения задачи знаний. В этом случае мы говорим об интеллектуальной системе поддержки принятия решения. Получаемое при этом решение носит условно-оптимальный характер.

Искомые величины также могут быть представлены в форме вероятностных характеристик. Часто исследователь может только подозревать о том, что в объекте имеют место мало- или совершенно неизученные процессы. Времени на их изучение нет. Тогда исследователь выдвигает гипотезу о математической форме, описывающей неизвестный процесс. Далее эти формы вводятся в состав математической модели объекта, куда уже вошли достаточно хорошо формализуемые процессы, осуществляются решение полученной системы, анализ результатов, полученных в результате математического моделирования, и корректировка гипотезы. Процесс имитационного моделирования заканчивается, если получены приемлемые с точки зрения исследователя результаты, или прерывается из-за отсутствия необходимой информации. Очевидно, что исследователь должен обладать высокой квалификацией как в области процессов, протекающих в объекте исследования, так и в области классических и специальных математических методах, используемых для решения уравнений получаемых математических моделей.

Суть применения математических методов заключается в упорядоченном использовании современных достижений в области системного анализа, математического моделирования, теории оптимального управления, методов решения уравнений математических моделей технических объектов, современных информационных технологий и средств вычислительной техники.

Принципы, на которых базируется применение математических методов при разработке и исследовании технических систем, заключаются в следующем:

- декомпозиция исходной задачи на систему взаимосвязанных задач с применением в дальнейшем методов системного анализа;
- применение методов математического моделирования для описания процессов в технических системах;
- применение теории оптимального управления и имитационного моделирования на завершающем этапе исследования;
- применение современного информационного обеспечения и средств вычислительной техники для реализации решения задач разработки и исследования технических систем.

Применение указанных выше принципов при разработке и исследовании технической системы в конкретной прикладной области дает возможность на современном уровне проводить как изучение поведения процессов в объекте исследования при различном его конструктивном оформлении, так и определять его оптимальные режимные и конструктивные характеристики.

### **9.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Любое творческое начало в деятельности человека в любой сфере его деятельности должно начинаться с определения целей исследования и способов их достижения. Чем яснее и чётче исследователь ведёт себя на этом этапе, тем качественнее получаемые результаты и меньше вероятность неточных, а зачастую ошибочных результатов.

Цель исследования формулируется в постановке задачи исследования. Вначале постановка задачи формулируется в простейшем варианте, далее происходит уточнение различных факторов, определяющих решение задачи, анализ имеющихся статистических данных, принятие допущений и т.п.

Однако даже формулировка задачи в простейшей вербальной форме требует от исследователя мобилизации всех знаний, используемых в дальнейшем для решения поставленной задачи. Словесная (вербальная) постановка задачи может звучать так: «... необходимо разработать техническую систему для реализации технологического регламента (системы технологических процессов) так, чтобы обеспечивались заданная производительность, качество производимой продукции, удобство эксплуатации, безопасность для окружающей среды и обслуживающего персонала, минимальные капитальные, эксплуатационные расходы и себестоимость получаемой продукции. При этом процесс исследования, проектирования, монтажа и выхода на проектную мощность не должен превышать заданных сроков».

Так может формулироваться постановка задачи на её начальной стадии. Далее требуется уточнить, что представляет собой технологический процесс, который будет реализован в технической системе, насколько он отвечает тем знаниям в конкретной предметной области, на основании которых можно будет получить желаемые результаты, какие будут приняты допущения, в каком виде будут представлены конструктивные и режимные характеристики технической системы, обеспечивающие наилучшее протекание технологического процесса, в каких интервалах будет осуществляться поиск конструктивных и режимных характеристик технической системы, как будут оцениваться капитальные и эксплуатационные затраты, какие методы будут применяться при решении поставленной задачи и т.п.

Если рассматривать решение задачи проектирования «с конца», то завершающей стадией получения проектных решений будет применение средств вычислительной техники. Представить информацию для компьютера можно только в строгой математической формулировке, т.е. задача должна быть формализована. Это формализованное математическое представление решаемой задачи и будет завершающим этапом постановки задачи, когда процесс сбора, анализа и представления информации завершён и можно начинать собственно вычислительные операции.

Этапу окончательной постановки задачи предшествует этап разработки математической модели объекта исследования, когда в соответствии с постановкой задачи осуществляется формализация процессов, протекающих в объекте с требуемой для практического использования точностью.

Последнее предопределяет адекватность математической модели исследуемому объекту в области её использования (определения) в соответствии с постановкой задачи.

Отсюда следует важный вывод – применение компьютера до окончательной постановки задачи в формализованном виде не требуется. Исключением является этап реализации метода решения уравнений математической модели и проверки её адекватности.

До окончательной постановки задачи действия исследователя должны быть сосредоточены на анализе постановки задачи исследования, обосновании искомых параметров объекта, допущениях, которые принимает исследователь, изучении процессов, протекающих в объекте, выборе метода их описания и на основании этого разработке адекватной модели объекта. На этих этапах исследователь должен максимально мобилизовать свои мыслительные способности и отдавать себе отчёт в том, что компьютер позволяет только ускорить процесс принятия решения по той программе, которую заложит в него исследователь.

Ещё один вывод, который можно сделать, заключается в том, что постановка задачи однозначно определяет структуру математической модели и область её определения. Другими словами, постановка задачи является техническим заданием на разработку математической модели объекта.

Иногда на этом этапе исследователю требуются дополнительные экспериментальные данные, дополнительные исследования, статистическая информация, которые на начальном этапе постановки задачи были неочевидны. Следует отметить, что большинство статистических данных есть не что иное, как результаты эксперимента на реальном, физическом существующем объекте при определённых условиях проведения эксперимента. Процесс постановки задачи исследования завершается тогда, когда можно в окончательном варианте осуществить запись решаемой задачи в формализованном виде, т.е. в форме математических выражений.

Таким образом, постановка задачи исследования сводится к процедуре последовательного уточнения формулировки задачи до тех пор, пока задачу можно будет решать. Можно сделать вывод о целесообразности осуществлять постановку задачи в терминах теории оптимального управления, т.е. в терминах экстремальных задач. В этом случае научно-исследовательская задача в любой предметной области может быть сведена к следующей постановке: необходимо найти такие варьируемые параметры, чтобы критерий оптимальности (зависящий от этих параметров) достигал своего экстремума (максимума или минимума) при ограничениях в форме равенств, неравенств и логических условий.

Под выражением «равенства, неравенства и логические условия» будем понимать совокупность уравнений (алгебраических, дифференциальных с обыкновенными или частными производными, интегральных, логических условий и т.п.), описывающих объект исследования при принятых исследователем допущениях, а также неравенств, ограничивающих интервально, как варьируемые переменные, так и ряд переменных, входящих в уравнения.

Наличие математической модели объекта позволяет осуществлять имитацию различных условий функционирования объекта, используя математические методы решения уравнений модели и средства современной вычислительной техники. При исследовании и проектировании технических систем уравнения математических моделей, как правило, носят нелинейный характер, имеют высокую размерность, т.е. получение аналитического решения возможно только в простейших случаях. Чаще всего для решения уравнений математической модели используют различные модификации численных методов (методы Эйлера,

Рунге-Кутта, конечных интегральных преобразований, конечных элементов, разностные схемы).

Часто математическая модель в окончательной постановке задачи используется только для имитационного моделирования, задача оптимизации при этом не решается. Суть имитационного моделирования заключается в исследовании различных характеристик процессов, протекающих в объекте, с целью выявления новых или уточнения ряда известных характеристик, не нашедших до настоящего времени отражения в конкретной предметной области.

Следует также отметить, что применение математических методов и, в частности, метода математического моделирования требует от исследователя большого объёма знаний как о процессах, протекающих в объекте исследования, так и о собственно математических и инструментальных методах.

Таким образом, в границах области определения, используя математическую модель исследуемого объекта, можно осуществлять имитацию реальных процессов, протекающих в объекте, задавая при этом различные сочетания искомых величин.

Упорядочивание имитационных процессов осуществляется с помощью теории оптимального управления, когда ставится цель получения самого лучшего, оптимального решения поставленной задачи.

Учитывая сказанное выше, структура исследований с применением математических методов может быть представлена блок-схемой (рис. 9.1).

Постановка задачи исследования является определяющим этапом в исследовании и, в частности, применении математических и инструментальных методов в исследованиях технического характера. Процесс реализации постановки задачи в соответствии с блок-схемой уточняется, обрастает деталями вплоть до завершения идентификации математической модели исследуемого объекта и проверки её адекватности. Следует отметить, что нередко в опубликованных исследованиях как раз такого раздела методологии применения математических методов и не хватает. Иногда только в конце проводимой работы удаётся осмыслить, что хотел сделать автор и насколько корректно он это делает.

Поэтому постановка задачи обязательна, многоэтапна, в значительной степени определяет все последующие действия, в частности, какая должна быть математическая модель объекта, какова её область определения, какие математические методы используются для решения уравнений модели, какие методы используются для поиска оптимального решения поставленной задачи, какие цели ставятся при имитационном моделировании.



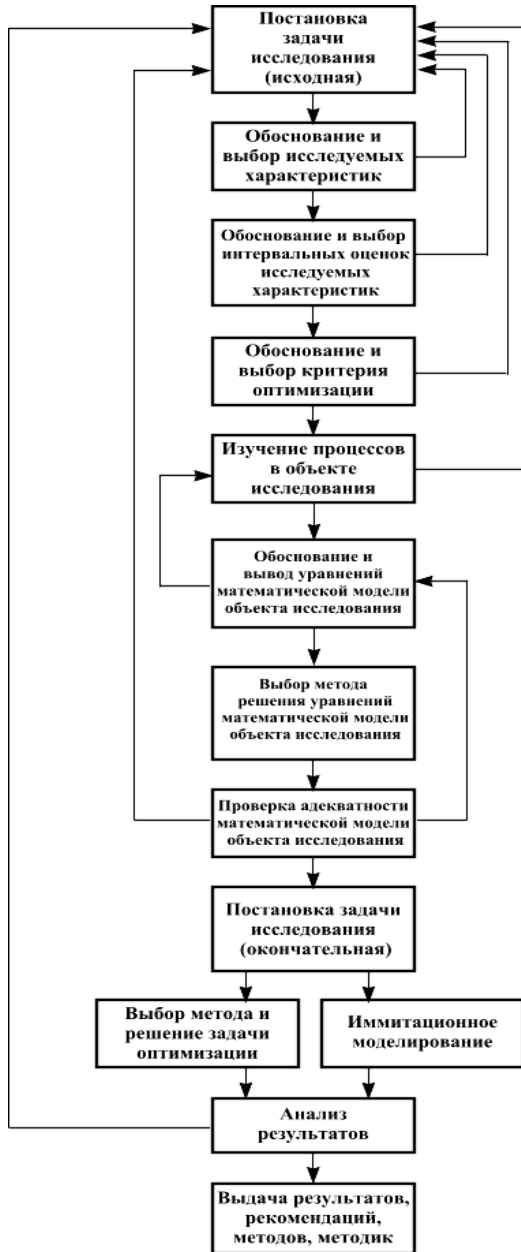


Рис. 9.1. Блок-схема исследований с применением математических методов

Наиболее распространённая ошибка исследователя заключается в следующем: «предложена математическая модель...», и ни слова о том, для каких целей эта модель используется, какова её область определения, адекватна ли она объекту исследования и что из себя представляет этот объект, какие процессы в нём протекают, почему некоторые процессы не отражены в математической модели и т.п.

Совершенно ясно, что в такой ситуации какие-либо действия с использованием математического моделирования приводят, мягко выражаясь, к некорректным результатам, а часто и просто к ошибкам.

Ситуация применения математических методов осложняется тем, что все исследователи хотят быть на современном уровне использования как средств вычислительной техники и специализированных программных средств, так и собственно математических методов: теории математического моделирования, решения экстремальных задач, теории системного анализа. Если к этому добавить знания в прикладной области, то вырисовывается картина, которая требует высокой подготовленности исследователя.

## **9.2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Постановка и решение достаточно сложных задач исследования и проектирования технической системы осуществляются с применением метода декомпозиции и использования в дальнейшем методологии системного анализа.

Процесс декомпозиции основан на разделении исходной (глобальной) задачи исследования на множество взаимосвязанных локальных задач, совместное решение которых должно обеспечивать экстремальное значение критерия оптимальности глобальной задачи.

Декомпозиция глобальной задачи целиком зависит от исследователя, основывается на опыте предшественников, функциональной завершённости, получаемых в результате декомпозиции задач, наличия исполнителей и ряда других факторов.

При декомпозиции не следует «мельчить», каждая локальная задача должна быть логически обоснована и на стадии решения каждой задачи результат должен быть функционально обоснованным.

При этом каждая из рассмотренных задач может быть поставлена как экстремальная, однако на входе каждой задачи будет фиксированный сигнал (сигналы), значение которого нужно будет всегда учитывать при решении экстремальной задачи. Этот сигнал передаёт информацию о том, что решаемая задача является зависимой от других задач системы. Наиболее наглядно этот факт просматривается в системе за-

дач, получаемых после декомпозиции, когда её результат представлен в виде иерархической многоуровневой системы.

Часто декомпозицию приходится уточнять, «укрупняя» или наоборот «уменьшая» локальные задачи системы. Во всех ситуациях эти функции лежат на исследователе (проектировщике), который выполняет роль системного аналитика.

Следует отметить, что правомерность декомпозиции не может быть получена путём строгого доказательства. Доказательством правомерности принятой декомпозиции является получение согласованных между собой решений локальных задач системы, обеспечивающих экстремальное значение глобального критерия оптимизации.

Ещё раз подчёркивая, что декомпозиция полностью определяется исследователем, можно предположить о наличии задач, которые при подаче на её вход исходных данных однозначно выдают конечный результат.

Так же не обязательно получать после декомпозиции систему задач в виде многоуровневой иерархической системы. Система задач может быть представлена в форме блок-схемы.

Таким образом, после декомпозиции глобальной задачи, исследователь получает систему взаимосвязанных локальных задач, для каждой из которых нужно определить искомые параметры, интервальные оценки их применения, построить математическую модель локального объекта исследования, адекватную этому объекту, осуществить формализованную постановку задачи исследования, выбрать метод и осуществить её решение.

### **9.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Этому разделу предшествуют постановка задачи исследования объекта, анализ входных и выходных координат и их интервальных оценок, а также методика оценки численных значений выходных координат.

Математическую модель объекта можно представить в виде некоторого оператора, отображающего входные координаты объекта в выходные.

В общем случае этот оператор может иметь вид алгебраических, дифференциальных, интегральных математических форм, быть непрерывным, принимать дискретные значения, быть кусочно-постоянным, логическим и т.п. Вид, структура, коэффициенты оператора полностью определяются, с одной стороны, глубиной проработки процессов, протекающих в объекте исследования, с другой – постановкой задачи ис-

следования, когда исследователь, принимая те или иные допущения, решает, насколько точно нужно описывать каждый процесс и нужно ли его учитывать вообще.

Основной отличительной чертой математического моделирования является перевод моделируемых в объекте исследования процессов в другое временное пространство, где скорость протекания реальных процессов в объекте исследования соизмерима со скоростью решения математических форм (уравнений, неравенств, логических условий и т.п.), составляющих математическую модель объекта.

Уход в другое временное пространство и, как следствие, получение значительного количества «свободного» времени, которое исследователь использует для анализа различных ситуаций по режимному и конструктивному оформлению протекания процессов в технической системе является основным достоинством метода математического моделирования. Кроме этого, применение математического моделирования не требует материальных, сырьевых, энергетических затрат, как это бывает при реализации (физическом моделировании) процессов в объекте исследования.

И вот тут встаёт вопрос – если всё так хорошо при реализации метода математического моделирования, почему этот метод применяется в полной мере не так уж часто, почему при применении этого метода выявляется множество некорректных действий исследователя и почему результаты, получаемые с «благими» намерениями, зачастую являются ошибочными.

Выясняется следующая ситуация. Ответ на перечисленные выше вопросы прост и однозначен – у исследователя нет необходимых для применения метода математического моделирования знаний (всех или части). Ситуация осложняется ещё и тем, что глубина проработки кинетических закономерностей процессов в объекте исследования в конкретной прикладной области для конкретной постановки задачи может быть недостаточной или отсутствовать вообще. В этом случае этап построения математической модели объекта совмещается с изучением (уточнением) кинетических закономерностей процессов, протекающих в объекте – кинетического механизма, выражений для скоростей протекания процессов по маршрутам кинетического механизма, в которой в явной форме входят режимные и конструктивные характеристики исследуемой (проектируемой) технической системы. В идеале в кинетические уравнения должны входить только режимные характеристики. Примером тому может служить химия, где в соответствии с законом действующих масс и уравнением Аррениуса скорость химической реакции зависит только от температуры и концентрации реагентов и инвариантна к конструкции технологического оборудования.

В ряде других прикладных областей оценку кинетических процессов, протекающих в объекте исследования, осуществляют на экспериментальных установках, с фиксированными конструктивными характеристиками, которые в явной или неявной форме входят в кинетические уравнения. Естественно, что такие кинетические выражения сужают область определения разрабатываемой математической модели и должны чётко отслеживаться исследователем.

Следует отметить, что процесс построения математической модели объекта исследования наиболее трудоёмок и ответственен при исследовании и проектировании технических систем. Именно на этом этапе исследователем допускаются просчёты, которые могут существенно исказить искомые характеристики технической системы.

#### **9.4. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИ**

В зависимости от того, что из себя представляет объект исследования и какова постановка задачи, уравнения математической модели могут быть системой алгебраических, дифференциальных с обыкновенными или частными производными, интегральных уравнений, системой логических условий в форме булевой алгебры и т.п., быть линейными или нелинейными, иметь высокую размерность, быть представленными в форме задачи Коши или краевой задачи. Словом, набор математическим форм чрезвычайно разнообразен. И несмотря на это есть один показатель, общий почти для всех форм моделирования технических объектов – аналитическое решение систем уравнений математической модели возможно только в простейших случаях.

Как правило, исследователям крайне редко приходится разрабатывать собственные программные продукты для решения уравнений математических моделей. Существуют стандартные программные продукты ведущих мировых фирм, предлагающие хорошо отработанные программно-математические комплексы для решения различных видов систем нелинейных уравнений высокой размерности. Так что неразрешимые проблемы в этом плане у исследователя могут возникнуть крайне редко. С учётом последнего можно считать, что исследователь всегда может подобрать стандартный метод решения уравнений математической модели объекта исследования.

И вот здесь стоит задать вопрос: «А можно ли называть математической моделью ту систему уравнений, которую создал исследователь для конкретной постановки задачи, выбрал метод решения уравнений модели и довел его до практической реализации?»

Строго говоря, несмотря на то, что модель «заработала», её можно называть только гипотетической математической моделью объекта

исследования. А освободиться от названия «гипотетической» можно только после того, как будет доказано, что математическая модель в области её определения адекватна объекту моделирования. Другими словами – математическая модель пригодна для решения поставленной задачи. И еще более точная формулировка: для любых сочетаний режимных и конструктивных характеристик проектируемого (исследуемого) объекта математическая модель должна воспроизводить поведение реального объекта с заданной точностью для конкретной постановки задачи. А «любые сочетания» конструктивных и режимных характеристик объекта определяются интервальными оценками, которые задаются исследователем для каждого искомого параметра.

## 9.5. РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Решению вариационных задач и задач математического программирования посвящено много работ. Можно просто осмысленно выбрать какой-либо метод для решения поставленной задачи. Решение несколько усложняется, когда исследователь имеет дело с системой взаимосвязанных задач, когда возникает необходимость многократно решения задач системы в процедуре итерационного процесса.

Для решения вариационных задач возможно применение классических вариационных методов, а также динамического программирования Беллмана, принципа максимума Понтрягина, «блуждающей трубки» Моисеева, прямых вариационных методов. Для решения задач математического программирования применяют различные градиентные, безградиентные методы, методы случайного поиска, перебора и т.д.

Реальное применение этих методов становится всё более возможным при применении многопроцессорных вычислительных комплексов и идеологии параллельных вычислений. При этом возможность получения высокой скорости вычислений сдвигает ситуацию в сторону применения более простых методов решения экстремальных задач. При решении вариационных задач – это прямые вариационные методы, а при решении задач математического программирования – методы перебора.

Подводя итог обсуждения применения математических методов в технике и технологиях, следует отметить, что основные трудности реального их использования заключаются не в их отсутствии или недостаточной проработке, а в слабой изученности процессов в объектах и отсутствии проектных и исследовательских организаций прикладного характера с современным высококвалифицированным персоналом. Следует также отметить, что применение математических методов в технических сферах деятельности человека значительно опережает аналогичный подход в других сферах.

### Вопросы для самопроверки

1. Как осуществляется постановка задачи проектирования?
2. Перечислите принципы, на основании которых будет осуществляться решение задачи проектирования?
3. Методы построения математической модели объекта проектирования.
4. Допущения, принимаемые при построении математической модели объекта проектирования.
5. Методы решения уравнений математической модели.
6. Проверка адекватности математической модели объекта проектирования.
7. Имитационное моделирование
8. Методы решения поставленной задачи проектирования технического объекта.

### Список литературы к главе 9

1. **Мальгин, Е. Н.** Проектирование гибких производственных систем в химической промышленности / Е. Н. Мальгин, С. В. Мищенко // Журнал Всероссийского химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1987. – № 3. – С. 293 – 300.
2. **Проектирование** гибких автоматизированных производственных систем : учебное пособие / Е. Н. Мальгин, А. Ф. Егоров, С. В. Карпушкин, Т. А. Фролова, М. Н. Краснянский. – М. : Машиностроение, 2000. – 112 с.
3. **Мальгин, Е. Н.** Математическая модель функционирования многопродуктовых химико-технологических систем / Е. Н. Мальгин, С. В. Карпушкин, А. Б. Борисенко // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – № 4. – С. 455 – 465.
4. **Мальгин, Е. Н.** Методология автоматизированного проектирования технических систем с изменяемым ассортиментом продукции / Е. Н. Мальгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – № 4. – С. 778 – 788.
5. **Мальгин, Е. Н.** Методика теплового расчёта нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий / Е. Н. Мальгин, С. В. Карпушкин, А. С. Крушатин // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 11. – С. 48 – 56.

## Глава 10

# СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

---

Современные системы поддержки принятия решения (СППР), возникшие как естественное развитие и продолжение управленческих информационных систем и систем управления базами данных, представляют собой системы, максимально приспособленные к решению задач повседневной управленческой деятельности, являются инструментом, призванным оказать помощь лицам, принимающим решения (ЛПР). С помощью СППР могут решаться неструктурированные и слабоструктурированные многокритериальные задачи. СППР, как правило, являются результатом мультидисциплинарного исследования, включающего теории баз данных, искусственного интеллекта, интерактивных компьютерных систем, методов имитационного моделирования [7].

Существуют различные определения СППР.

СППР – совокупность процедур по обработке данных и суждений, помогающих руководителю в принятии решений, основанная на использовании моделей [10].

СППР – это интерактивные автоматизированные системы, помогающие лицу, принимающему решения, использовать данные и модели для решения слабоструктурированных проблем [11, 12].

СППР – это система, которая обеспечивает пользователям доступ к данным и/или моделям, так что они могут принимать лучшие решения [13].

В настоящее время нет общепринятого определения СППР, поскольку конструкция СППР существенно зависит от вида задач, для решения которых она разрабатывается, от доступных данных, информации и знаний, а также от пользователей системы. Можно привести, тем не менее, некоторые элементы и характеристики, общепризнанные, как части СППР.

СППР в большинстве случаев – это интерактивная автоматизированная система, которая помогает пользователю (ЛПР) использовать данные и модели для идентификации и решения задач и принятия решений. Система должна обладать возможностью работать с интерактивными запросами с достаточно простым для изучения языком запросов.

СППР обладает следующими четырьмя основными характеристиками [14]:

- 1) СППР использует и данные, и модели;
- 2) СППР предназначены для помощи менеджерам в принятии решений для слабоструктурированных и неструктурированных задач;



3) СППР поддерживают, а не заменяют, выработку решений менеджерами;

4) Цель СППР – улучшение эффективности решений.

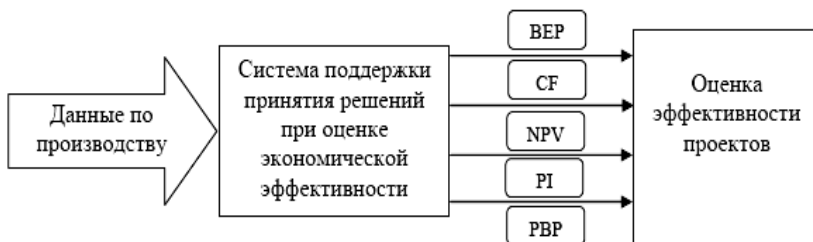
Идеальная СППР должна обладать следующими свойствами [14]:

- Опирирует со слабоструктурированными решениями;
- Предназначена для ЛПР различного уровня;
- Может быть адаптирована для группового и индивидуального использования;
- Поддерживает как взаимозависимые, так и последовательные решения;
- Поддерживает 3 фазы процесса решения: интеллектуальную часть, проектирование и выбор;
- Поддерживает разнообразные стили и методы решения, что может быть полезно при решении задачи группой ЛПР;
- Является гибкой и адаптируется к изменениям как организации, так и её окружения;
- Проста в использовании и модификации;
- Улучшает эффективность процесса принятия решений;
- Позволяет человеку управлять процессом принятия решений с помощью компьютера, а не наоборот;
- Поддерживает эволюционное использование и легко адаптируется к изменяющимся требованиям;
- Может быть легко построена, если сформулирована логика конструкции СППР;
- Поддерживает моделирование;
- Позволяет использовать знания.

В современных условиях перед руководством предприятий многоассортиментных химических производств стоит задача оценки привлекательности инвестиционного проекта.

Для таких целей используется система поддержки принятия решений (СППР) при оценке экономической эффективности химических производств.

Работа СППР проводится следующим образом (рис. 10.1). На вход СППР подаются данные по производствам различных проектов, которые обрабатываются для использования в расчётах оценки эффективности проектов и вычислении набора критериев, по которым оценивается инвестиционная привлекательность проектов (рис. 10.1). Такая СППР необходима на начальном этапе принятия решения по запуску производства продукции.



**Рис. 10.1. Работа СППР:**

ВЕР – точка безубыточности; CF – денежный поток; NPV – чистый дисконтированный доход; PI – индекс доходности; PBP – срок окупаемости

Архитектура предложенной СППР представлена на рис. 10.2. Пользователь системы вносит в базу данных информацию по производствам, экономическую эффективность которых требуется оценить.

Не все исходные данные могут иметь точные значения. Чаще всего к неопределённым параметрам, например, для технологических процессов химической технологии, относятся физико-химические константы, коэффициенты тепло- и массоотдачи, теплопроводности, скорости химических реакций, а также концентрации веществ во входных потоках и др. Неопределёнными параметрами математических моделей могут являться и конструктивные характеристики оборудования, например, площадь поверхности теплообмена, внутренний объём реакционной камеры и др.

Известно несколько подходов к раскрытию неопределённостей. Например, вероятностный подход [1], в котором неопределённые параметры характеризуются функциями плотности распределения. Другой подход связан с использованием теории нечётких множеств [2] и уходит в сферу субъективной информации. Неопределённые параметры характеризуются функциями принадлежности, которые строятся на основе опросов экспертов. Предлагается подход, в котором информация о значении неопределённого параметра задаётся в виде интервального параметра (интервального числа) [3].

Далее, информация из базы данных используется для проведения расчётов единовременных и текущих затрат, на основании которых вычисляются критерии эффективности. Пользователю выводится информация по проектам, на основании которой он принимает решение о дальнейшем рассмотрении того или иного производства.

В качестве примера рассмотрим производство сульфаминовой кислоты.

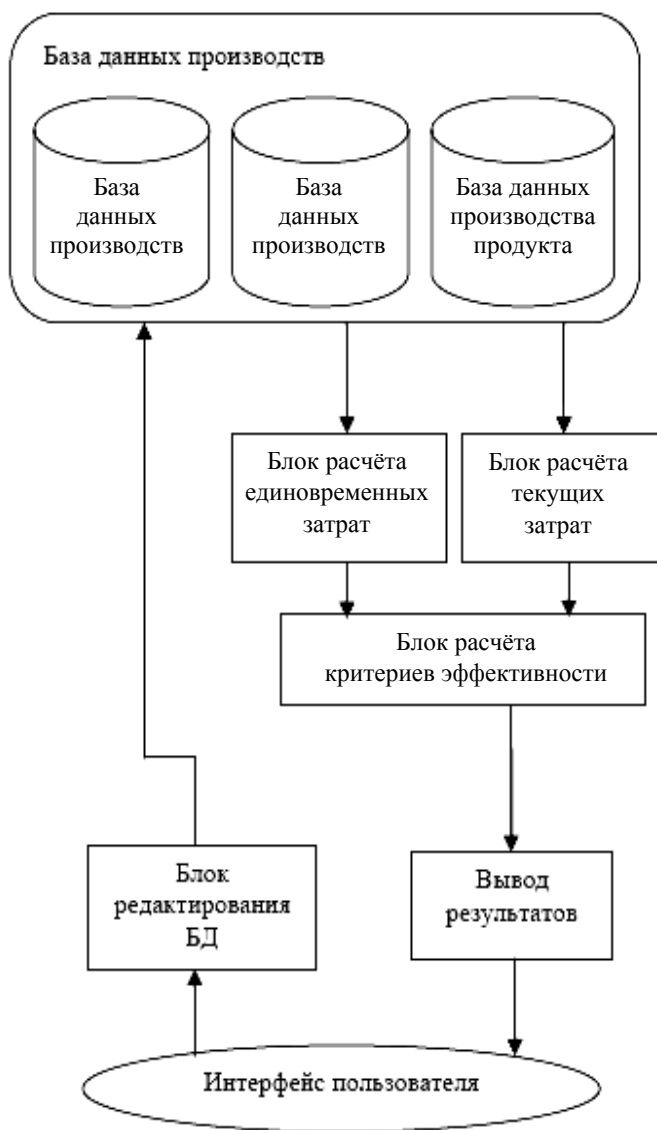


Рис. 10.2. Архитектура СПДР при оценке экономической эффективности химических производств

## 10.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СУЛЬФАМИНОВОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ОЛЕУМА И КАРБАМИДА НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Необходимо оценить инвестиционную привлекательность проекта на примере производства сульфаминовой кислоты годовым объёмом 3000 тонн и сроком на 5 лет.

Способ получения сульфаминовой кислоты включает сульфирование мочевины олеумом, фильтрацию неразбавленной сульфомассы, перекристаллизацию технической пасты сульфаминовой кислоты из рециркулирующего подогретого до температуры не более 75 °С маточного раствора, концентрация серной кислоты в котором поддерживается на уровне 19...22 мас. %. Массовое соотношение пасты сульфаминовой кислоты и раствора для перекристаллизации составляет 1:6 – 8. Выход сульфаминовой кислоты 83...85% в пересчёте на мочевины. Фильтрат после выделения от сульфомассы пасты сульфаминовой кислоты представляет собой примерно 96%-ную серную кислоту с примесью не более 1% сульфаминовой кислоты, он может быть использован в смежных производствах [4].

Сульфаминовая кислота применяется в качестве очистки промышленной аппаратуры от минеральных отложений (солей жёсткости, окисных плёнок, соединений железа), от молочного и пивного камня. Также на предприятиях общественного питания и в быту: для обработки столовой и кухонной посуды; для использования в рецептурах моющих средств. В качестве сырья при синтезе химических средств: для получения огнестойких материалов; для получения гербицидов. В гальванотехнике: для приготовления электролитов; для травления пищевой жести. Для удаления слизи из водоохладяющих систем (бассейнов) и при очистке бумагоделательных машин. А также при обработке призабойной зоны нефтяных скважин с целью увеличения нефтеотдачи пласта.

Неразбавленную сульфомассу, полученную сульфированием мочевины олеумом и содержащую от 35 до 38 мас. % сульфаминовой кислоты, фильтруют, отфильтрованную пасту сульфаминовой кислоты подвергают перекристаллизации, используя подогретый до температуры не более 75 °С (предпочтительно до 50...60 °С) маточный раствор от предыдущих операций, содержащий 19 – 22 мас. % серной кислоты, взятый в массовом соотношении 6 – 8 частей раствора на 1 часть отфильтрованной пасты сульфаминовой кислоты. После охлаждения раствора до 15...20 °С и фильтрации целевой продукт и маточный раствор, содержащий около 3% основного вещества и 25% серной кислоты, используют для последующих операций. Необходимую концен-

трацию серной кислоты в рециркулирующем маточном растворе поддерживают путём периодического отвода части этого раствора и добавления соответствующего количества воды.

Фильтрат, полученный от фильтрования сульфомассы, представляет собой примерно 96%-ную серную кислоту с примесью не более 1% сульфаминовой кислоты и 2,5% бисульфата аммония, он находит применение в смежных производствах.

Выход сульфаминовой кислоты согласно способу составляет 82...85% в пересчёте на мочевины. Качество готового продукта соответствует требованиям, предъявляемым к продукту марки А по ТУ 2121-083-05800142-2001: содержание основного вещества не менее 99%, содержание сульфат-ионов не более 0,3%.

Удельные расходы утилизируемых кислых стоков и содержащейся в них серной кислоты составляют: 1,3...1,4 кг стоков/кг СК и 0,28...0,32 кг H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/кг СК против 1,5 кг H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/кг СК и 3,05 кг стоков/кг СК в прототипе.

Схема производства сульфаминовой кислоты, на которой предлагаемый способ реализуется, представлена на рис. 10.3.

Математическая модель получения сульфаминовой кислоты из олеума и карбамида представлена в работе [5].

Объём перемешиваемой среды, м<sup>3</sup>

$$V(u) = \frac{M_o + (M_m - M_r) \cdot u}{\rho}$$

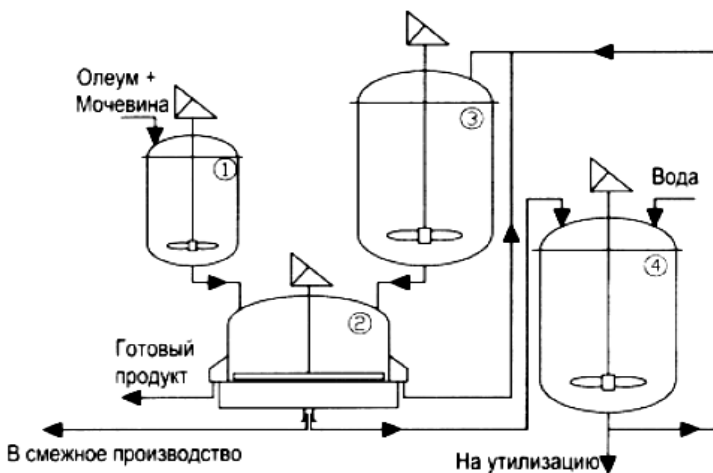


Рис. 10.3. Производство сульфаминовой кислоты

Высота заполнения аппарата, м

$$H(u) = \frac{V(u) + 0,083 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H_d}{0,25 \cdot \pi \cdot D^2}.$$

Высота погруженной части трубы, м

$$h_T(u) = H(u) - (H_a + H_d - l_T).$$

Критерий гидродинамического подобия

$$G_D = \frac{D}{d_M}.$$

Кинематическая вязкость среды, м<sup>2</sup>/с

$$\nu(u) = \frac{\mu(u)}{\rho}.$$

Критерий Рейнольдса циркуляционный

$$Re_{\text{ц}}(u) = n \cdot \frac{d_M^2}{\nu(u)}.$$

Параметр высоты заполнения аппарата

$$\gamma(u) = 8 \cdot \frac{H(u)}{D} + 1.$$

Гидравлическое сопротивление внутренних устройств

$$\zeta_T(u) = 0,82 \cdot \frac{0,98 - 0,82}{40 - 10} \cdot \left( \frac{h_T(u)}{d_T} - 10 \right);$$

$$f_T(u) = d_T \cdot h_T(u);$$

$$R_{\text{вн}}(u) = f_T(u) \cdot \zeta_T(u).$$

Определение параметров профиля окружной скорости жидкости

$$s_1 = \frac{7 \cdot G_D - 6}{21 \cdot G_D - 20};$$

$$s_2 = \frac{28 \cdot G_D - 27}{21 \cdot G_D - 20};$$

$$\psi_1 = s_1 \cdot (1 - s_2)^{-1}.$$

Параметр сопротивления корпуса аппарата

$$\lambda_a = \frac{G_D}{20,35 \cdot G_D - 19,1}.$$

Запись и решение уравнения равенства моментов:

$$\psi_2(\psi_1) = -s_1 - s_2 \cdot \psi_1;$$

$$K_1(\psi_1) = (\psi_1 + \psi_2(\psi_1))^2;$$

$$v_{r1}(\psi_1) = (1 + \psi_1 + \psi_2(\psi_1)) \cdot 0,5;$$

$$v_{cp}(\psi_1) = \frac{1 + 0,4 \cdot \psi_1 + 0,5 \cdot \psi_2(\psi_1) + 1,75 \cdot (1 + \psi_1 + \psi_2(\psi_1)) \cdot (G_D - 1)}{2 \cdot G_D};$$

$$M_{кр}(\psi_1) = \zeta \cdot K_1(\psi_1);$$

$$M_{вн}(\psi_1, u) = \left( \frac{2}{d_m} \right)^3 \cdot (R_{вн}(u) \cdot v_{r1}(\psi_1)^2 \cdot r_T);$$

$$M_{кор}(\psi_1, u) = v_{cp}(\psi_1)^{1,75} \cdot G_D^{2,75} \cdot \frac{\pi \cdot \lambda_a \cdot \gamma(u)}{2,2 \cdot \text{Re}_u(u)^{0,25}};$$

$$f(\psi_1, u) = M_{кр}(\psi_1) - M_{кор}(\psi_1, u) - M_{вн}(\psi_1, u);$$

$$\psi_1(u) = f(\psi_1, u).$$

Глубина воронки, м

$$h_b(u) = (-17,2 + \exp(-0,2 \cdot \psi_1(u) + 3,33)) \cdot n^2 \cdot \frac{d_m^2}{2 \cdot 9,807}.$$

Мощность, затрачиваемая на перемешивание, кВт

$$N(u) = 0,001 \cdot 3,87 \cdot \zeta \cdot K_1(\psi_1(u)) \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5.$$

Необходимая мощность привода, кВт

$$N_d(u) = N_p(u) \cdot 1,3.$$

Тепловой поток при изменении доли загружаемого карбамида, Вт

$$\Phi_{и}(\tau) = \frac{Q_x M_m - [c_y \cdot x_y + c_c(1 - x_y)] \cdot t \cdot M_r - Q_a \cdot M_r(1 - x_y)}{3600} \cdot x(\tau),$$

где  $M_o$  – масса загрузки олеума, кг;  $M_m$  – масса загрузки карбамида, кг;  $M_r$  – масса отходящих газов, кг;  $\rho$  – плотность перемешиваемой

среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $u$  – доля загруженного карбамида;  $D$  – диаметр аппарата, м;  $H_d$  – высота днища корпуса, м;  $H_a$  – высота обечайки корпуса, м;  $l_T$  – длина трубы внутреннего устройства, м;  $d_m$  – диаметр мешалки, м;  $\mu$  – динамическая вязкость среды,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $n$  – частота вращения мешалки,  $1/\text{с}$ ;  $d_T$  – диаметр трубы внутреннего устройства, м;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления мешалки;  $\psi_1, \psi_2$  – параметры профиля окружной скорости жидкости;  $s_1, s_2$  – коэффициенты, связанные с параметрами профиля окружной скорости жидкости;  $K_1$  – коэффициент мощности перемешивания;  $v_{r1}$  – относительная окружная скорость жидкости;  $v_{\text{ср}}$  – относительная осреднённая окружная скорость жидкости в аппарате;  $M_{\text{кр}}$  – крутящий момент, т.е. момент сил, возникающих при вращении лопастей мешалки,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_{\text{вн}}$  – момент силы сопротивления вращению, возникающий во внутренних устройствах,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $R_{\text{вн}}$  – суммарное сопротивление внутренних устройств;  $r_T$  – радиус установки внутреннего устройства;  $M_{\text{кор}}$  – момент силы сопротивления вращению, возникающий на стенках корпуса аппарата,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $Q_x$  – тепловой эффект реакции сульфирования,  $\text{Дж/кг}$  карбамида;  $M_m$  – масса загрузки карбамида,  $\text{кг}$ ;  $c_y$  – удельная теплоёмкость  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $x_y$  – массовое содержание  $\text{CO}_2$  в отходящих газах;  $c_c$  – удельная теплоёмкость  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $t$  – температура перемешиваемой среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $M_g$  – масса отходящих газов,  $\text{кг}$ ;  $Q_a$  – теплота десорбции  $\text{SO}_3$  из олеума,  $\text{Дж/кг}$ ;  $x(\tau)$  – изменение массовой доли загружаемого карбамида во времени.

В математической модели есть неопределённые параметры, это частота вращения мешалки  $n$  и диаметр мешалки  $d_m$ . Следовательно, для решения математической модели необходимо решить интервальную статическую математическую модель с сосредоточенными параметрами:

$$G_D = \frac{D}{d_m};$$

$$\text{Re}_{\text{ш}}(u) = n \cdot \frac{d_m^2}{\nu(u)};$$



$$M_{\text{вн}}(\psi_1, u) = \left( \frac{2}{d_{\text{м}}} \right)^3 \cdot (R_{\text{вн}}(u) \cdot v_{r1}(\psi_1)^2 \cdot r_{\text{т}});$$

$$h_{\text{в}}(u) = (-17,2 + \exp(-0,2 \cdot \psi_1(u) + 3,33)) \cdot n^2 \cdot \frac{d_{\text{м}}^2}{2 \cdot 9,807};$$

$$N(u) = 0,001 \cdot 3,87 \cdot \zeta \cdot K_1(\psi_1(u)) \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_{\text{м}}^5.$$

Частота вращения мешалки лежит в диапазоне от 0,33 до 1 1/с; диаметр мешалки выбирается исходя из зазора между стенкой аппарата и самой мешалкой. Зазор лежит в интервале от 0,005 до 0,1 диаметра аппарата.

В данной математической модели выходным параметром, который обеспечивает процесс сульфирования, является тепловой поток, следовательно, все исследования будем проводить только для этого параметра.

Для успешного ведения технологического процесса необходимо обеспечить такую долю загрузки карбамида, чтобы расчётный тепловой поток был меньше максимально-допустимого. В условиях неопределённости параметров математической модели постановка задачи обеспечения заданного технологического режима формулируется следующим образом.

Необходимо подобрать такой интервал частот вращения мешалки и интервал диаметров мешалки, чтобы найти все множество допустимых типов электродвигателей и мотор-редукторов при соблюдении условий:

$$1,1 < G_D < 1,5;$$

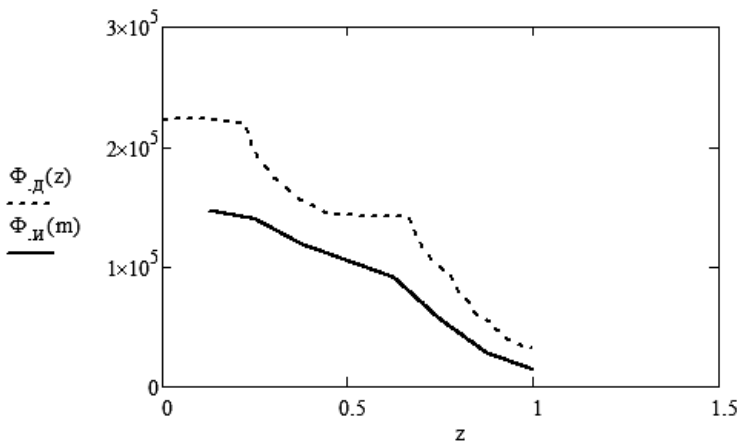
$$0,005 \cdot D < Z < 0,2 \cdot D;$$

$$\Phi_{\text{н}} < \Phi_{\text{д}},$$

где  $G_D$  – критерий гидродинамического подобия;  $Z$  – зазор, между мешалкой и стенкой аппарата;  $\Phi_{\text{н}}$  – расчётный тепловой поток;  $\Phi_{\text{д}}$  – максимально-допустимый тепловой поток.

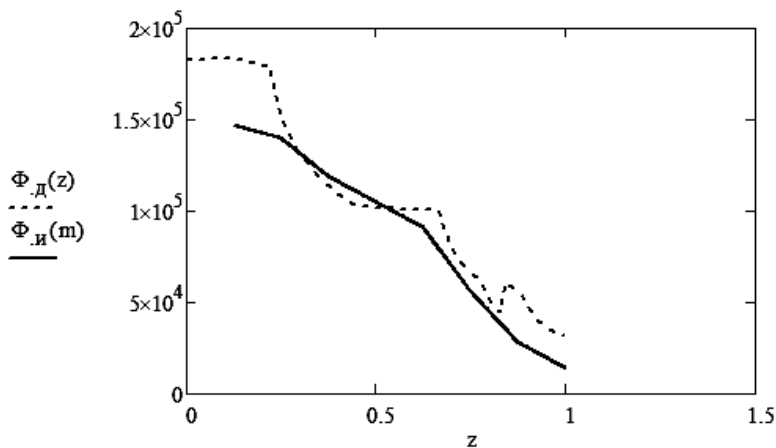
Далее необходимо построить последовательности (10.4). В данном случае таких зависимостей будет 18, от  $n = 20$  об/мин и  $d_{\text{м}} = 1,4$  м до  $n = 60$  об/мин и  $d_{\text{м}} = 1,6$  м.

Пример зависимости теплового потока расчётного и максимально-допустимого от загрузки карбамида при частоте вращения 45 об/мин и диаметре мешалки 1,4 м показан на рис. 10.4.



**Рис. 10.4.** Расчётный (—) и максимально-допустимый (----) тепловой потоки для  $n = 45$  об/мин,  $d_m = 1,4$  м

Из всех последовательностей выбираются только те, которые не нарушают условий постановки задачи. Для частоты вращения 20 об/мин условие  $\Phi_{и} < \Phi_{д}$  нарушается (рис. 10.5), следовательно, данные параметры мешалки не учитываются.



**Рис. 10.5.** Расчётный (—) и максимально-допустимый (----) тепловой потоки для  $n = 20$  об/мин,  $d_m = 1,4$  м

## 10.2. РАСЧЁТ ТЕКУЩИХ ЗАТРАТ И СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАМИНОВОЙ КИСЛОТЫ

Составление калькуляции себестоимости годового объёма производства – 3000 т/год.

Определение расходов на сырьё и материалы представлено в табл. 10.1 [7].

### 10.1. Затраты на сырьё и материалы

Статья расхода	Ед. изм.	Цена, р./т	На единицу продукта (1 т)		На весь выпуск	
			количество	сумма, р.	количество	сумма, р.
<b>Исходное сырьё:</b>						
Олеум 24 %-ный 100 %	т	2900	2,8000	8 120	8 400	24 360 000
Карбамид (мочевина) м.Б т.м.	т	8000	0,4050	3 240	1 215	9 720 000
Неонол АФ-12	т	42 730	0,0003	13	0,9	38 457
<b>ИТОГО по исходному сырью</b>				<b>11 333</b>		<b>34 118 457</b>
<b>Материалы:</b>						
Нить типа «PDI»	тыс. шт.	322 500	0,0001	33	0,3	96 750
Мешки полипропиленовые	тыс. шт.	9750	0,0270	264	81	789 750
Трансп.-загот. расходы:						
<b>ИТОГО по материалам</b>				<b>297</b>		<b>886 500</b>
<b>ИТОГО</b>				<b>11 630</b>		<b>34 884 957</b>

## 10.2. Затраты на энергию

Статья расхода	Ед. изм.	Цена р./т	На единицу продукта (1 т)		На весь выпуск	
			количество	сумма, р	количество	сумма, р.
Энергия:						
Электро-энергия	кВт·ч	3	495,0000	1485	1 485 000	4 455 000
Пар	Гкал	696	0,3000	209	900	626 400
Вода артезианская	куб. м	9	5,0000	45	15 000	135 000
<b>ИТОГО по энергии</b>				1739		5 216 400

Определение расходов на энергоносители представлено в табл. 10.2.

Определение заработной платы основных производственных рабочих представлено в табл. 10.3.

Средняя тарифная ставка по основным производственным рабочим рассчитывается как

$$СТ_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot 100 + 4 \cdot 70 + 4 \cdot 70 + 4 \cdot 65 + 3 \cdot 65}{19} = 74,47 \text{ р./ч.}$$

Эффективный фонд времени одного рабочего

$$T_{\text{эф}} = 21 \cdot 12 = 252 \text{ дн./год.}$$

## 10.3. Основные производственные рабочие

Наименование рабочего	Разряд	Число в смене	Общее число	Часовая тарифная ставка
Аппаратчики синтеза	6	1	4	100
Аппаратчики фильтрации	5	1	4	70
Аппаратчики выделения	5	1	4	70
Аппаратчики подготовки п/ф	4	1	4	65
Упаковщики продукции	4	3	3	65
<b>ИТОГО</b>		7	19	

Тарифный фонд заработной платы основных производственных рабочих, р./год

$$\Phi ЗП_{\text{тар}} = 74,47 \cdot 8 \cdot 252 \cdot 19 = 2852498,88 \text{ р./год.}$$

Тарифный фонд заработной платы основных производственных рабочих на тонну

$$\frac{\Phi ЗП_{\text{тар}}}{M_{\text{проект}}} = \frac{2852498,88}{3000} = 951 \text{ р./т.}$$

Годовая заработная плата основных производственных рабочих

$$\Phi ЗП_{\text{год}} = 2852498,88 \cdot (1 + 0,35 + 0,08 + 0,05)(1 + 0,35) = 5699292,8 \text{ р./т.}$$

Фонд годовой заработной платы на тонну

$$\frac{\Phi ЗП_{\text{год}}}{M_{\text{проект}}} = 1899,8 \text{ р./т.}$$

Отчисления на социальные нужды основных производственных рабочих

$$O_{\text{зп}} = \frac{30,2 \cdot 1899,8}{100} = 574 \text{ р./т.}$$

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования.

В таблицу 10.4 заносится информация по стоимости оборудования и зданий, а также норма амортизаций.

Далее рассчитываются заработная плата по вспомогательному персоналу, отчисления на социальные нужды вспомогательного персонала и амортизация пассивной части.

Средняя тарифная ставка по вспомогательным рабочим рассчитывается как

$$СТ_{\text{ср}} = \frac{1 \cdot 85 + 1 \cdot 80 + 2 \cdot 80 + 1 \cdot 80}{5} = 81 \text{ р./ч.}$$

Эффективный фонд времени одного среднесписочного рабочего

$$T_{\text{эф}} = 21 \cdot 12 = 252 \text{ дн./год.}$$

В таблицу 10.5 заносится информация по вспомогательному персоналу: их категория, количество и ставка.

#### 10.4. Стоимость основных производственных фондов (ОПФ) цеха

Наименование группы ОПФ	Стоимость, р.	Норма амортизации, %
<b>Активная часть:</b>		
1. Оборудование:		
– силовые машины	942 094	12
– рабочие машины	14 322 219	15
– измерительные и регулирующие приборы	4364991,4	16
2. Транспортные средства	3479989,6	20
<b>ИТОГО по активной части</b>	<b>23109239</b>	
<b>Пассивная часть:</b>		
1. Здания	8219534,34	1
2. Сооружения	106395,41	4
<b>ИТОГО по пассивной части</b>	<b>8325929,75</b>	

#### 10.5. Вспомогательный персонал

№ п/п	Работник	Категория	Количество	Ставка, р./ч
1	Механик	Рабочий	1	85
2	Слесарь КИП и А	Рабочий	1	80
3	Слесарь-ремонтник	Рабочий	2	80
4	Электромонтер по ремонту электротехнического оборудования	Рабочий	1	80
	<b>Итого по вспомогательным рабочим</b>		<b>5</b>	

Тарифный фонд заработной платы цеховых рабочих

$$\Phi ЗП_{\text{тар}} = 81 \cdot 8 \cdot 252 \cdot 5 = 816\,480 \text{ р./год.}$$

Тарифный фонд заработной платы цеховых рабочих на тонну

$$\frac{\Phi ЗП_{\text{тар}}}{M_{\text{проект}}} = \frac{816\,480}{3000} = 272,16 \text{ р./т.}$$

Годовая заработная плата цеховых рабочих

$$\Phi ЗП_{\text{год}} = 816\,480 \cdot (1 + 0,35 + 0,08 + 0,05)(1 + 0,35) = 1\,631\,327 \text{ р./т.}$$

Фонд годовой заработной платы на тонну

$$\frac{\text{ФЗП}_{\text{год}}}{M_{\text{проект}}} = 544 \text{ р./т.}$$

Отчисления на социальные нужды по заработной плате вспомогательных рабочих

$$O_{\text{зп}} = \frac{30,2 \cdot 544}{100} = 164,3 \text{ р./т.}$$

Смазочные материалы, обтирочные материалы, запасные части

$$З_{\text{зап.ч}} = \frac{23\,109\,239 \cdot 10}{100 \cdot 3000} = 770,3 \text{ р./т.}$$

Отчисления в ремонтный фонд

$$З_{\text{рем}} = \frac{23\,109\,239 \cdot 3}{100 \cdot 3000} = 231 \text{ р./т.}$$

Амортизация активной части ОПФ

$$A_1 = \frac{942\,094 \cdot 12 + 143\,222\,219 \cdot 15 + 4364991,4 \cdot 16 + 3479989,4 \cdot 20}{100 \cdot 3000} =$$
$$= 1219 \text{ р./т.}$$

Прочие расходы

$$З_{\text{проч}} = \frac{(1232,6 + 372,2 + 770,3 + 231 + 1219) \cdot 2}{100 \cdot 3000} = 76,5 \text{ р./т.}$$

Вся информация по содержанию и эксплуатации оборудования заносится в табл. 10.6.

Расходы на вспомогательные нужды.

В таблицу 10.7 заносится информация по цеховому персоналу, их категория, количество и ставка.

Далее рассчитываются заработная плата по цеховому персоналу, отчисления на социальные нужды цехового персонала и амортизация активной части.

Средняя тарифная ставка по цеховым рабочим рассчитывается как

$$СТ_{\text{ср}} = \frac{1 \cdot 200 + 1 \cdot 150 + 4 \cdot 85 + 2 \cdot 80 + 1 \cdot 70}{9} = 102 \text{ р./ч.}$$

Эффективный фонд времени одного среднесписочного рабочего

$$T_{\text{эф}} = 21 \cdot 12 = 252 \text{ дн./год.}$$

### 10.6. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

№ п/п	Статья расхода	Сумма, р./т	Пояснения
1.1	Зарплата рабочих по надзору, ремонту и уходу за оборудованием	1232,6	
1.2	Отчисления на социальные нужды	372,2	
1.3	Смазочные материалы, обтирочные материалы, запасные части	770,3	10% от стоимости оборудования
	Итого по пункту 1	2375,1	
2	Отчисления в ремонтный фонд	231	3% от стоимости оборудования
3	Амортизация производственного оборудования, аппаратуры и транспортных средств (активная часть)	1219	
4	Прочие расходы (внутрицеховое перемещение грузов, возмещение износа малоценных и быстроизнашивающихся инструментов, приспособления, эксплуатация оборудования)	76,5	2% от п. (1 + 2 + 3)
	Всего по смете	2682,6	п. (1 + 2 + 4)

### 10.7. Цеховой персонал

№ п/п	Работник	Категория	Количество	Ставка, р./ч
1	Начальник производства	Руководитель	1	200
2	Начальник лаборатории	Руководитель	1	150
3	Химик-аналитик	Цеховой персонал	4	85
4	Лаборант-колорист	Цеховой персонал	2	80
5	Уборщик производственных помещений	Цеховой персонал	1	70
	Итого по цеховому персоналу		9	



Тарифный фонд заработной платы цеховых рабочих

$$\Phi ЗП_{\text{тар}} = 102 \cdot 8 \cdot 252 \cdot 9 = 1\,850\,688 \text{ р./год.}$$

Тарифный фонд заработной платы цеховых рабочих на тонну

$$\frac{\Phi ЗП_{\text{тар}}}{M_{\text{проект}}} = \frac{1\,850\,688}{3000} = 617 \text{ р./т.}$$

Годовая заработная плата цеховых рабочих

$$\Phi ЗП_{\text{год}} = 1\,850\,688 \cdot (1 + 0,35 + 0,08 + 0,05)(1 + 0,35) = 3\,697\,674,6 \text{ р.}$$

Фонд годовой заработной платы на тонну

$$\frac{\Phi ЗП_{\text{год/т}}}{M_{\text{проект}}} = 1232,6 \text{ р./т.}$$

Отчисления на социальные нужды по заработной плате цеховых рабочих

$$O_{\text{зп}} = \frac{30,2 \cdot 1232,6}{100} = 372,2 \text{ р./т.}$$

Содержание производственных зданий и сооружений

$$З_{\text{зд}} = \frac{(8219534,34 + 106395,41) \cdot 5}{100 \cdot 3000} = 138,8 \text{ р./т.}$$

Ремонт производственных зданий и сооружений

$$З_{\text{рем.зд}} = \frac{(8219534,34 + 106395,41) \cdot 3}{100 \cdot 3000} = 83,2 \text{ р./т.}$$

Амортизация пассивной части ОПФ

$$A_2 = \frac{8219534,34 \cdot 1 + 106395,41 \cdot 4}{100 \cdot 3000} = 28,82 \text{ р./т.}$$

Затраты на охрану труда

$$З_{\text{от}} = \frac{\Phi ЗП_{\text{год}} \cdot 10}{100} = \frac{1232,6 \cdot 10}{100} = 123,26 \text{ р./т.}$$

Затраты на прочие расходы

$$З_{\text{проч}} = \frac{(\Phi ЗП_{\text{год/т}} + O_{\text{зп}} + З_{\text{зд}} + З_{\text{рем.зд}} + A_2 + З_{\text{от}}) \cdot 2}{100};$$

$$З_{\text{проч}} = \frac{(1232,6 + 372,2 + 138,8 + 83,2 + 28,82 + 123,26) \cdot 2}{100} = 39,6 \text{ р./т.}$$

### 10.8. Расходы на вспомогательные нужды

№ п/п	Статья расхода	Сумма
1	Заработная плата цехового персонала	1232,6
2	Отчисления на социальные нужды	372,2
3	Содержание производственных зданий и сооружений	138,8
4	Ремонт производственных зданий и сооружений	83,2
5	Амортизация производственных зданий и сооружений (пассивная часть)	28,82
6	Расходы по охране труда	123,26
7	Прочие расходы, включая износ малоценного и быстроизнашивающегося инвентаря, расходы по испытаниям и прочие цеховые расходы	39,6
	Всего по смете	2018,5

Вся информация по вспомогательным нуждам заносится в табл. 10.8. Общепроизводственные расходы

$$K_{\text{опр}} = 2682,6 + 2018,5 - 1219 - 28,82 = 3453,28 \text{ р./т.}$$

Общезаводские расходы  $K_{\text{озав}}$  (600 – 650% от зарплаты основных производственных рабочих)

$$K_{\text{озав}} = \frac{1899,8 \cdot 650}{100} = 12348,7 \text{ р./т.}$$

Полная себестоимость

$$C = 11630 + 1739 + 1899,8 + 574 + 3453,28 + 1219 + 28,82 + 12348,7 = 32892,6 \text{ р./т.}$$

Прибыль

$$\Pi = \frac{32892,6 \cdot 15}{100} = 4933,89 \text{ р./т.}$$

где 15% – рентабельность.

Отпускная цена

$$\text{ОЦ} = 32892,6 + 4933,89 = 37826,49 \text{ р./т.}$$

Цена с НДС

$$\text{Ц} = 37826,49 + \frac{37826,49 \cdot 18}{100} = 44\,635 \text{ р./т.}$$

Калькуляция себестоимости продукции заносится в табл. 10.9.

*Расчёт единовременных затрат.* Для расчёта единовременных затрат определяем суммарную стоимость оборудования цеха (табл. 10.10).

Суммарная стоимость оборудования цеха, она же стоимость основных фондов, заносится в табл. 10.11 и вычисляются капитальные затраты.

Внеобъектные затраты рассчитываем как трудоёмкость проектных работ:

$$K_{\text{пр}} = 8 \cdot 5 \cdot 24 \cdot 100 = 96\,000 \text{ р.}$$

Стоимость оборотных средств

$$K_{\text{ос}} = \frac{37060739,2 \cdot 30}{100} = 11118221,76 \text{ р.}$$

Капитальные затраты

$$K = K_{\text{оф}} + K_{\text{зд}} + K_{\text{ос}} + K_{\text{пр}} = 56600890,71 \text{ р.}$$

### 10.9. Калькуляция себестоимости продукции

Статья расхода	Сумма, р.
Сырьё, основные и вспомогательные материалы	11 630
Энергоносители	1739
Заработная плата ОПР	1899,8
Отчисления на социальные нужды	574
Общепроизводственные расходы	3453,28
Общезаводские расходы	12348,7
Прибыль	4933,89
Отпускная цена	37826,5
Цена с НДС	44 635

### 10.10. Суммарная стоимость оборудования цеха

№ п/п	Наименование расходов	Стоимость, р.
1	Прейскурантная стоимость оборудования	15264313
2	Неучтённое оборудование	3052862,6
3	Итого	18317175,6
4	Транспортные и заготовительно-складские затраты и стоимость запчастей	3479989,6
5	Итого	21797165,2
	Монтаж:	
6	оборудования	4359433,04
7	трубопроводов	4359433,04
8	КИП	4364991,4
9	Спецработы	2179716,52
	Итого	37060739,2

### 10.11. Капитальные затраты

Стоимость основных фондов, р.	Стоимость производственных площадей, р.	Стоимость оборотных средств, р.	Внеобъектные затраты, р.	Капитальные затраты, р.
37060739,2	8325929,75	11118221,76	96 000	56600890,71

Так как оборудование для производства сульфаминовой кислоты уже существует на предприятии, то для расчёта будут использоваться не капитальные затраты, а затраты на подготовку оборудования для запуска производства (20% от капитальных затрат – 1 320 178 р.)

Денежный поток проекта занесён в табл. 10.12.

Чистый дисконтированный доход проекта

$$\text{ЧДД} = 11\,630\,511 + 10\,744\,121 + 9\,925\,285 + 9\,168\,854 + 8\,470\,073 - 11\,320\,178 = 38\,618\,666.$$

Расчёт индекса доходности проекта:

$$\text{ИД} = \frac{1}{11\,320\,178} \cdot 49\,668\,844 = 4,39.$$

### 10.12. Капитальные затраты

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя по шагам расчёта				
		1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
1	Объём продаж	3000	3000	3000	3000	3000
2	Цена	37826,49	37826,49	37826,49	37826,49	37826,49
3	Выручка (= 1×2)	113 479 470	113 479 470	113 479 470	113 479 470	113 479 470
5	Затраты	986 77 800				
6	Амортизация	3 743 460	3 743 460	3 743 460	3 743 460	3 743 460
7	Проценты по кредитам	0	0	0	0	0
8	Прибыль до вычета налогов	11 058 210				
9	Налоги 20%	2 211 642				
10	Чистый доход	8 846 568				
11	Денежный поток (ДП) (= 11 + 7)	12 590 028				

Срок окупаемости проекта

$$T_{\text{ок}} = \frac{5 \cdot 11\,320\,178}{49\,668\,844} = 1,14.$$

$$Q_6 = \frac{3453,28 + 12348,7 + 1219 + 28,82}{37826,49 - (11630 + 1739 + 1899,8 + 574)} = \frac{17049,8}{21983,69} = 0,775.$$

### 10.13. Основные критерии экономической эффективности производства

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя
1	Годовой объём производства $Q_{\text{пр}}$	натуральная ед.	3000
2	Безубыточный объём производства $Q_{\text{б}}$	натуральная ед.	0,775
3	Запас финансовой безопасности (ЗФБ)	%	99,9
4	Капиталовложения в проект К	р.	1320178
5	Себестоимость ед. продукции С	р.	32892,6
	В том числе:		
	– условно-переменные расходы $Z_{\text{пер}}$	р.	15842,8
	– условно-постоянные расходы $Z_{\text{пост}}$	р.	17049,8
6	Рентабельность продукции R	%	15
7	Цена реализации ед. продукции Ц	р.	44635
8	Максимальный прирост денежных поступлений ДП <sub>t</sub>	р.	125 90 028
9	Норма дисконта E	%	8,25
10	Чистый дисконтный доход ЧДД	р.	38 618 666
11	Внутренняя норма доходности ВНД	%	
12	Индекс доходности инвестиций ИД	доли ед.	4,39
13	Срок окупаемости инвестиций $T_{\text{ок}}$	годы	1,14
14	Горизонт расчёта T	годы	5

Таким образом описанная СППР рассчитывает основные критерии экономической эффективности производства, что позволяет помочь лицу, принимающему решение, быстро оценить различные варианты производства и выбрать наиболее подходящий на данный момент. Может быть использована в химических производствах для оперативного планирования, а также анализа рынка, планирования поставок сырья и выпуска многоассортиментной продукции.

Внедрение такой СППР поможет лицу, принимающему решение, в оценке экономической эффективности того или иного производства. Результатом использования СППР могут стать более эффективные финансовая политика и распределение денежных средств предприятия.

## Вопросы для самопроверки

1. Что такое СППР?
2. Для чего нужны СППР?
3. Где применяются СППР?
4. Свойства СППР.
5. Работа СППР при оценке экономической эффективности химических производств.
6. Архитектура СППР при оценке экономической эффективности химических производств.
7. Процесс получения сульфаминовой кислоты.
8. Основные статьи расходов для расчёта себестоимости продукции.
9. Необходимые виды затрат для расчёта критериев экономической эффективности.
10. Основные критерии экономической эффективности проекта.

## Список литературы к главе 10

1. **Алон, Н.** Вероятностный метод / Н. Алон, Дж. Спенсер. – М. : Бином ; Лаборатория знаний, 2007. – 320 с.
2. **Новак, В.** Математические принципы нечеткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкож. – М. : Физматлит, 2006. – 352 с.
3. **Добронец, Б. С.** Интервальная математика / Б. С. Добронец. – Красноярск, 2004. – 219 с.
4. **Пат. RU 2240977 РФ.** Способ получения сульфаминовой кислоты / А. Н. Утробин, Т. А. Зими́на, С. В. Каретников.
5. **Карпушкин, С. В.** Методика расчёта и выбора механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Химическая промышленность сегодня. – 2011. – № 12. – С. 48 – 55.
6. **Фролов, С. В.** Решение интервальных математических моделей технологических процессов / С. В. Фролов, Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Наука и образование. Инженерное образование. – 2012. – № 9. – <http://technomag.edu.ru/>.
7. **Основные методы** оценки инвестиционных проектов : сайт Дистанционный консалтинг [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.dist-cons.ru/modules/Plan/text5.htm> (дата обращения : 10.11.2012).
8. **Сараев, А. Д.** Системный анализ и современные информационные технологии / А. Д. Сараев, О. А. Щербина // Труды Крымской Академии наук. – Симферополь : СОНАТ, 2006. – С. 47 – 59.

9. **Краткая история** развития систем поддержки принятия решений : сайт Стратегический менеджмент [Электронный ресурс]. – URL : <http://corpportal.ru/History/DataTech/DSS/DSS.aspx> (дата обращения: 07.12.2012).

10. **Система** поддержки принятия решений : сайт Государство. Бизнес. ИТ [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.tadviser.ru/index.php/СППР> (дата обращения: 07.12.2012).

11. **Little, I. D. C.** Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus / I. D. C. Little // Management Science. – 1970. – V. 16. – N 8.

12. **Sprague, R.H.** A Framework for the Development of Decision Support Systems / R. H. Sprague // MIS Quarterly. – 1980. – V. 4. – P. 1 – 26.

13. **Thieranf, R. J.** Decision Support Systems for Effective Planing and Control / R. J. Thieranf. – Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, Inc., 1982.

14. **Edwards, J. S.** Expert Systems in Management and Administration – Are they really different from Decision Support Systems? / J. S. Edwards // European Journal of Operational Research. – 1992. – Vol. 61. – P. 114 – 121.

15. **Turban, E.** Decision support and expert systems: management support systems / E. Turban. – Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1995.

16. **Haettenschwiler, P.** Neues anwenderfreundliches Konzept der Entscheidungs-unterstutzung. Gutes Entscheiden in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft / P. Haettenschwiler. – Zurich : Hochschulverlag AG, 1999. – S. 189 – 208.

17. **Power, D. J.** "What is a DSS?"/ D. J. Power // The On-Line Executive Journal for Data-Intensive Decision Support. – 1997. – V. 1. – N 3.

18. **Alter, S. L.** Decision support systems: current practice and continuing challenges / S. L. Alter. – Reading, Mass. : Addison-Wesley Pub., 1980.

19. **Holsapple, C. W.** Decision Support Systems: A Knowledge-based Approach / C. W. Holsapple, A. B. Winston. – Minneapolis : West Publishing Co., 1996.

20. **Golden, B.** Decision Insight Systems: A Critical Evaluation / B. Golden, A. Hevner, D. J. Power // Computers and Operations Research. – 1986. – V. 13. – N 2/3. – P. 287 – 300.

21. **Power, D. J. A.** Brief History of Decision Support Systems. DSSResources.COM,W.W.W. / D. J. A. Power. – <http://DSSResources.COM/history/dsshistory.html>, version 2.8, May 31, 2003.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Учебное пособие посвящено теоретическим, практическим и методическим вопросам создания автоматизированных систем, предназначенных для проектирования и управления объектами химического и машиностроительного профиля. Оно состоит из четырёх частей, содержащих:

- общие сведения о системах автоматизированного проектирования технологического оборудования (ТО) и геоинформационных системах проектирования и эксплуатации технических объектов;
- структуру, функции и приёмы работы с автоматизированными информационными системами (АИС) компоновок ТО, технологических расчётов теплообменного оборудования, автоматизированного составления месячных графиков ремонтов ТО;
- методики применения средств мультимедиа при создании АИС обучения персонала предприятий химического и машиностроительного профиля;
- сведения о постановках задач, методах их решения и программных средствах, используемых при автоматизированном проектировании технологического оборудования;
- теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования;
- моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе;
- разработку технологии автоматизированного синтеза системы оборотного водоснабжения химического предприятия;
- разработку комплекса виртуальных тренажёров для обслуживающего персонала систем подготовки и очистки воды;
- математические методы в технических расчётах и программные среды, используемые при автоматизированном проектировании технологического оборудования;
- теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования;
- технологию исследования химико-технологических объектов в режиме удалённого доступа;
- технологию интерактивного 3D-моделирования при создании виртуальных тренажёрных комплексов и др.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Хранение и обработка знаний в реляционной базе данных</b> .....	5
1.1. Определение N-ориентированного гиперграфа .....	6
1.2. Соотношения между атрибутами вершин и рёбер .....	8
1.3. Возможные варианты внешних запросов .....	10
1.4. Структура базы данных для представления N-ориентированного гиперграфа и ограничений .....	10
1.5. Синтаксис внутренних запросов в SQL-нотации .....	13
1.6. Выполнение запроса .....	17
Вопросы для самопроверки .....	18
Список литературы к главе 1 .....	19
<b>Глава 2. Применение экспертных систем для проверки правил компоновки</b> .....	20
2.1. Классификация правил .....	27
2.1.1. Правила, ограничивающие принадлежность вершины ребру .....	27
2.1.2. Правила, определяющие свойства ребра в зависимости от свойств вершины .....	29
2.1.3. Правила, определяющие свойства вершин в зависимости от свойств ребра .....	30
2.1.4. Правила, определяющие свойства вершины в зависимости от свойств других вершин .....	31
2.2. Описание метода .....	31
Вопросы для самопроверки .....	34
Список литературы к главе 2 .....	35
<b>Глава 3. Параллельный алгоритм оптимального выбора аппаратурного оформления многоассортиментных производств</b> .....	36
3.1. Постановка задачи .....	38
3.2. Последовательный алгоритм .....	40
3.3. Параллельный вариант алгоритма .....	43
3.3.1. Управляющий процесс .....	44
3.3.2. Рабочий процесс .....	46
3.3.3. Результаты экспериментов .....	48
Вопросы для самопроверки .....	50
Список литературы к главе 3 .....	51

<b>Глава 4. Automated synthesis of water treatment stages in systems of circulating water supply at industrial enterprises</b> .....	54
4.1. Problem statement .....	57
4.1.1. Problem of selecting the structure of the process flow scheme .....	58
4.1.2. Problem of equipment selection .....	65
4.2. Example of a problem solution .....	67
4.3. Notation .....	67
Вопросы для самопроверки .....	68
Список литературы к главе 4 .....	69
<b>Глава 5. Remote access information system for analysis of chemical engineering objects</b> .....	70
5.1. Information-logical Models of Technological Process of Chemical-technological Systems .....	70
Вопросы для самопроверки .....	76
Список литературы к главе 5 .....	77
<b>Глава 6. Математическое моделирование системы автоматического управления температурой нагревательных плит вулканизационного прессы</b> .....	78
6.1. Модель двухпозиционного регулятора .....	79
6.2. Задание свойств изделий .....	82
6.3. Изменение расчётной области .....	85
6.4. Расчётный шаг по времени .....	85
6.5. Алгоритм расчёта температурных полей .....	91
6.6. Результаты расчётов .....	94
Вопросы для самопроверки .....	100
Список литературы к главе 6 .....	101
<b>Глава 7. Автоматизированное проектирование элементов прессового оборудования для изготовления резинотехнических изделий: постановки задач и информационные связи между ними</b> .....	103
7.1. Выбор материалов и определение геометрии нагревательных плит и пресс-форм .....	103
7.2. Формирование профиля температур рабочей поверхности нагревательной плиты .....	106
7.3. Формирование поля температур в объёме вулканизируемого изделия .....	108
7.4. Определение размеров элементов рамы прессы и силового гидроцилиндра .....	110
7.5. Информационная поддержка принятия решений при проектировании прессового оборудования .....	114

7.6. Лабораторный практикум .....	116
7.6.1. Балансовые расчёты нагревательной плиты вулканизационного пресса .....	117
7.6.2. Расчёт числа витков прямоугольного индуктора нагревательной плиты пресса .....	120
7.6.3. Определение положения и тепловыделения индукторов нагревательной плиты вулканизационного пресса .....	123
7.6.4. Определение продолжительности разогрева нагревательной плиты вулканизационного пресса до рабочей температуры ...	125
7.6.5. Оптимизация положения индукторов нагревательной плиты пресса .....	127
Вопросы для самопроверки .....	128
Список литературы к главе 7 .....	129
<b>Глава 8. Development of intelligent control system for research projects</b> .....	130
8.1. Electronic document management system .....	130
8.2. Mathematical model of product catalogs .....	131
8.3. Software for product catalogs .....	133
Вопросы для самопроверки .....	135
Список литературы к главе 8 .....	135
<b>Глава 9. Математические методы при проектировании технических систем</b> .....	137
9.1. Математическая постановка задачи исследования .....	140
9.2. Декомпозиция глобальной задачи исследования .....	145
9.3. Математическое моделирование технической системы .....	146
9.4. Решение уравнений модели .....	148
9.5. Решение поставленной задачи .....	149
Вопросы для самопроверки .....	150
Список литературы к главе 9 .....	150
<b>Глава 10. Системы поддержки принятия решений при оценке экономической эффективности химических производств</b> .....	151
10.1. Исследование процесса получения сульфаминовой кислоты из олеума и карбамида на основе интервальной модели .....	155
10.2. Расчёт текущих затрат и себестоимости производства сульфаминовой кислоты .....	162
Вопросы для самопроверки .....	174
Список литературы к главе 10 .....	174
<b>Заключение</b> .....	176

Учебное издание

НЕМТИНОВ Владимир Алексеевич  
КРАСНЯНСКИЙ Михаил Николаевич  
КАРПУШКИН Сергей Викторович  
МОКРОЗУБ Владимир Григорьевич  
МАЛЫГИН Евгений Николаевич  
ЕГОРОВ Сергей Яковлевич  
БОРИСЕНКО Андрей Борисович  
ФРОЛОВА Татьяна Анатольевна  
НЕМТИНОВА Юлия Владимировна  
ОБУХОВ Артем Дмитриевич

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

В 4 частях

Часть 1

Учебное пособие

Редактор Т. М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию И. В. Евсева

Подписано в печать 16.03.2016.  
Формат 60 × 84 / 16. 10,46 усл. печ. л.  
Тираж 100 экз. (1-й з-д – 60 экз.). Заказ № 108

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел. 8(4752) 63-81-08  
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

ISBN 978-5-8265-1542-6



9 785826 515426