

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

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

## **Часть 3**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по специальности 151701  
"Проектирование технологических машин и комплексов"*



---

Тамбов

◆ Издательство ФГБОУ ВПО "ТГТУ" ◆

2012

УДК 54.058(075)  
ББК Н76я73  
И741

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой "Информационные технологии в образовании"  
ГОУ "Институт развития дополнительного профессионального образования"  
*Т.В. Истомина*

Доктор технических наук, профессор, проректор по информатизации  
ФГБОУ ВПО "ТГТУ"  
*В.Е. Подольский*

Коллектив авторов:

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

И741 Информационные технологии при проектировании и управлении техническими системами : учебное пособие : в 4-х ч. / В.А. Немтинов, С.В. Карпушкин, В.Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. – Ч. 3. – 160 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1064-3.

Охвачен широкий спектр задач математического и программного обеспечения различных подсистем автоматизированного проектирования и управления техническими системами, в частности, описаны: теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования, различные методы прогнозирования ёмкости рынка многоассортиментной малотоннажной продукции; методика проектирования тренажёрного комплекса для обучения персонала технической системы и др. Наличие в пособии разделов на английском языке позволяет использовать его при двуязычной подготовке.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки специалистов 151701 «Проектирование технологических машин и комплексов», а также аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления техническими объектами.

УДК 54.058(075)  
ББК Н76я73

ISBN 978-5-8265-1064-3

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Краткосрочное прогнозирование производительности основного оборудования технических систем</b> .....	10
1.1. Введение в искусственные нейронные сети .....	10
1.2. Факторное прогнозирование .....	15
1.3. Безфакторное прогнозирование .....	18
Вопросы для самопроверки .....	21
Список литературы к главе 1 .....	22
<b>Глава 2. Модернизация химико-технологических систем действующего многоассортиментного производства при изменении планов выпуска продукции</b> .....	23
2.1. Методология определения аппаратурного оформления химико-технологических систем .....	23
2.2. Условия разрешимости задач определения аппаратурного оформления .....	25
2.3. Постановки задач модернизации аппаратурного оформления действующих химико-технологических систем .....	26
2.4. Методика решения задач модернизации аппаратурного оформления действующих химико-технологических систем ...	28
2.5. Пример модернизации аппаратурного оформления химико-технологических систем действующего производства	30
Вопросы для самопроверки .....	32
Список литературы к главе 2 .....	33
<b>Глава 3. Применение метода ветвей и границ для оптимального выбора аппаратурного оформления химико-технологических систем</b> .....	34
3.1. Постановка задачи .....	35
3.2. Алгоритм решения .....	37
3.3. Результаты экспериментов и оптимизация алгоритма .....	39

Вопросы для самопроверки .....	43
Список литературы к главе 3 .....	43
<b>Глава 4. Информационная и логическая модель трассировки технологических трубопроводов (на английском языке) .....</b>	<b>45</b>
Вопросы для самопроверки .....	49
Список литературы к главе 4 .....	49
<b>Глава 5. Методика расчёта и выбора механических перемешивающих устройств вертикальных ёмкостных аппаратов ...</b>	<b>50</b>
5.1. Постановка задачи расчёта и выбора механического перемешивающего устройства .....	51
5.2. Методика решения задачи расчёта и выбора механического перемешивающего устройства .....	57
5.3. Пример применения методики решения задач .....	60
5.4. Система определения оптимальных конструкций механических перемешивающих устройств ёмкостных аппаратов .....	64
5.4.1. Структура и состав системы .....	64
5.4.2. Информационное обеспечение системы .....	68
5.5. Варианты заданий по расчёту и выбору конструкций механических перемешивающих устройств .....	70
Вопросы для самопроверки .....	89
Список литературы к главе 5 .....	89
<b>Глава 6. Моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе .....</b>	<b>90</b>
6.1. Постановка задачи моделирования нагрева пресс формы .....	90
6.2. Условия моделирования нагрева пресс-формы и вулканизируемого изделия .....	93
6.3. Результаты моделирования нагрева пресс-формы и вулканизируемого изделия .....	97
Вопросы для самопроверки .....	101
Список литературы к главе 6 .....	101

<b>Глава 7. Автоматизированная лаборатория удалённого доступа "Проектирование и эксплуатация технологических систем" (на английском языке)</b> .....	103
7.1. Информационные технологии в образовательном процессе	103
7.2. Структура лаборатории удалённого доступа .....	104
Вопросы для самопроверки .....	105
Список литературы к главе 7 .....	105
<b>Глава 8. Технология автоматизированного синтеза системы оборотного водоснабжения химического предприятия (на английском языке)</b> .....	106
8.1. Постановка задачи .....	109
8.1.1. Задача выбора структуры технологической схемы .....	109
8.1.2. Задача выбора оборудования .....	114
8.2. Пример решения задачи .....	115
Вопросы для самопроверки .....	116
Список литературы к главе 8 .....	117
<b>Глава 9. Комплекс виртуальных тренажёров для обслуживающего персонала систем подготовки и очистки воды</b> .....	118
9.1. Методы и алгоритмы разработки виртуальных тренажёров систем подготовки и очистки воды .....	118
9.2. Модель деятельности оператора .....	119
9.3. Тренажёр оператора системы предварительной обработки воды .....	125
9.4. Тренажёр оператора системы биологической очистки сточной воды .....	126
Вопросы для самопроверки .....	127
Список литературы к главе 9 .....	127
<b>Глава 10. Применение виртуальных тренажёров для обучения студентов химико-технологического профиля и повышения квалификации персонала химических предприятий (на английском языке)</b> .....	129
10.1. Виртуальные тренажёры в химической промышленности	129

10.2. Автоматизированные системы обучения и тренинга студентов .....	130
10.3. Комплекс виртуальных тренажёров для операторов химико-технологических систем .....	134
Вопросы для самопроверки .....	136
Список литературы к главе 10 .....	136
<b>Глава 11. Технология создания электронных многоцелевых банков данных (на английском языке) .....</b>	<b>138</b>
Вопросы для самопроверки .....	142
Список литературы к главе 11 .....	142
<b>Глава 12. Организация диалога с пользователями в информационных системах управления производством (на английском языке) .....</b>	<b>143</b>
12.1. Организация диалога в традиционных базах данных .....	143
12.2. Организация диалога в базах данных типов "объект-атрибут-атрибут" .....	148
Вопросы для самопроверки .....	151
Список литературы к главе 12 .....	151
<b>Глава 13. Представление тематических пространственно-распределённых данных в сети интернет .....</b>	<b>152</b>
13.1. Схема взаимодействия компонентов системы .....	153
13.2. Схема представления информации на экране пользователя системы .....	156
Вопросы для самопроверки .....	157
Список литературы к главе 13 .....	158
<b>Заключение .....</b>	<b>159</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития 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 по-

зволяет осуществить комплексное решение задач управления выпуском 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) компонок 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.

Во вторую часть пособия вошли:

- сведения о постановках задач, методах их решения и программных средах, используемых при автоматизированном проектировании технологического оборудования;
- теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования;
- описание технологии поддержки принятия решений для проектирования технологических процессов класса производственных систем сложной структуры (на примере машиностроительных производств);
- описание различных методов прогнозирования ёмкости рынка многоассортиментной малотоннажной продукции с помощью аппарата нейронных сетей;
- методики проектирования тренажёрного комплекса для обучения персонала технической системы.

Третья часть пособия посвящена:

- краткосрочному прогнозированию производительности основного оборудования технических систем;
- модернизации химико-технологических систем действующего многоассортиментного производства при изменении планов выпуска продукции;



- разработке информационно-логической модели трассировки технологических трубопроводов;
- разработке методики расчёта и выбора механических перемещающих устройств вертикальных ёмкостных аппаратов;
- моделированию процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе;
- разработке технологии автоматизированного синтеза системы оборотного водоснабжения химического предприятия;
- разработке комплекса виртуальных тренажёров для обслуживающего персонала систем подготовки и очистки воды;
- разработке технологии создания электронных многоцелевых банков данных;
- организации диалога с пользователями в информационных системах управления производством;
- представлению тематических пространственно-распределённых данных в сети интернет.

Авторы надеются, что данное учебное пособие будет полезно для:

– студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки специалистов 151701 "Проектирование технологических машин и комплексов";

– учащихся магистратуры по направлениям: 150700 "Машиностроение", осваивающих программу "Информационное обеспечение машиностроительного производства; 220100 "Системный анализ и управление", осваивающих программу "Системный анализ проектно-технологических решений";

– аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления ТО.

Наличие в пособии разделов на английском языке позволяет использовать его при двуязычной подготовке.

*Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.740.11.0624 Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы"*

# КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящее время вопросы прогнозирования и оценки важнейших показателей деятельности химического предприятия на будущий отрезок времени становятся особенно актуальными. Ассортимент продукции многоассортиментных малотоннажных химических производств огромен: красители, полупродукты, кинофотоматериалы, продукция бытовой химии, и подвержен постоянным изменениям [1]. В существующей экономической ситуации плановые задания отсутствуют. Перед руководством предприятия встает сложнейшая задача осуществления прогноза спроса на производимую продукцию, который может использоваться для определения производственной программы, производительности основного оборудования, потребностей в сырье и материалах.

## 1.1. ВВЕДЕНИЕ В ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Развитие прогностики как науки в последние десятилетия привело к созданию множества методов, процедур, приёмов прогнозирования. Насчитывается свыше ста методов прогнозирования, в связи с чем перед специалистами возникает задача выбора методов, которые давали бы адекватные прогнозы для изучаемых процессов и систем. В наши дни возрастает необходимость в системах, которые способны не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий с заранее определёнными данными, но и способны сами анализировать вновь поступающую информацию, находить в ней закономерности, производить прогнозирование. В этой области приложений самым лучшим образом зарекомендовали себя искусственные нейронные сети [2] – эффективный математический аппарат для обработки "исторических" данных о процессе.

Нейронная сеть – громадный распределённый параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки.

Процедура, используемая для процесса обучения, называется алгоритмом обучения. Она выстраивает в определённом порядке синаптические веса нейронной сети для обеспечения необходимой структуры взаимосвязей нейронов [3].

Нейрон представляет собой единицу обработки информации в нейронной сети. Модель нейрона, лежащего в основе искусственных нейронных сетей, показана на рис. 1.1. В этой модели можно выделить три основных элемента:

1) набор синапсов или связей, каждый из которых характеризуется своим весом или силой; в частности, сигнал  $X_j$  на входе синапса  $j$ , связанного с нейроном  $k$ , умножается на вес  $W_{kj}$ ;

2) сумматор складывает входные сигналы, взвешенные относительно соответствующих синапсов нейрона;

3) функция активации ограничивает амплитуду выходного сигнала нейрона; она также называется функцией сжатия.

В модель нейрона, показанную на рис. 1.1, включен пороговый элемент, который обозначен символом  $b_k$ , отражающий увеличение или уменьшение входного сигнала, подаваемого на функцию активации.

В математическом представлении функционирование нейрона  $k$  описывается уравнениями

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j;$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – входные сигналы;  $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  – синаптические веса нейрона  $k$ ;  $u_k$  – линейная комбинация входных воздействий;  $b_k$  – порог;  $\varphi()$  – функция активации;  $y_k$  – выходной сигнал нейрона.

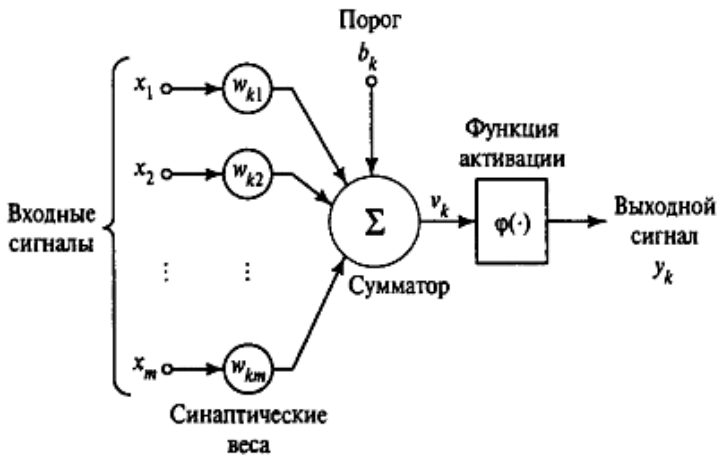


Рис. 1.1. Модель нейрона

Класс задач, которые можно решить с помощью нейронной сети, определяется тем, как сеть работает, и тем, как она обучается. При работе нейронная сеть принимает значения входных переменных и выдаёт значения выходных переменных. Таким образом, сеть можно применять в ситуации, когда имеется определённая известная информация, и нужно из неё получить некоторую пока неизвестную информацию.

Важное условие применения нейронных сетей: необходимо, чтобы между известными входными значениями и неизвестными выходами имелась связь, которая может быть искажена шумом, но она должна существовать.

Функции активации определяют выходной сигнал нейрона в зависимости от индуцированного локального поля  $v$ . Можно выделить три основных типа функций активации:

1. *Функция единичного скачка*, или пороговая функция, тип которой показан на рис. 1.2 и описывается следующим образом:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{если } v \geq 0; \\ 0, & \text{если } v < 0. \end{cases}$$

В технической литературе эта форма функции единичного скачка обычно называется функцией Хэвисайда. Соответственно выходной сигнал нейрона  $k$  такой функции можно представить как

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{если } v_k \geq 0; \\ 0, & \text{если } v_k < 0, \end{cases}$$

где  $v_k$  – индуцированное локальное поле нейрона, т.е.

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k.$$

В модели, называемой в литературе моделью Мак-Каллока-Питца, выходной сигнал нейрона принимает значение 1, если индуцированное локальное поле этого нейрона не отрицательно, и 0 – в противном случае. Это выражение описывает свойство "всё или ничего" модели Мак-Каллока-Питца.

2. *Кусочно-линейная функция* – тип которой показан на рис. 1.3, описывается следующим выражением:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq +\frac{1}{2}; \\ |v|, & +\frac{1}{2} > v > -\frac{1}{2}; \\ 0, & v \leq -\frac{1}{2}. \end{cases}$$

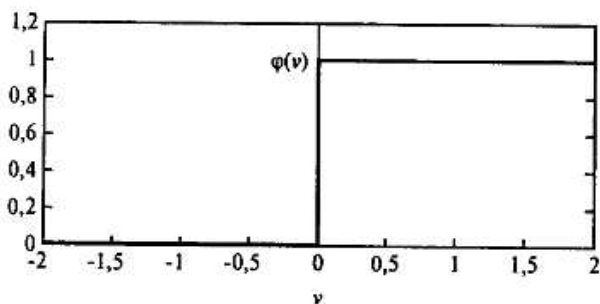


Рис. 1.2. Функция единичного скачка

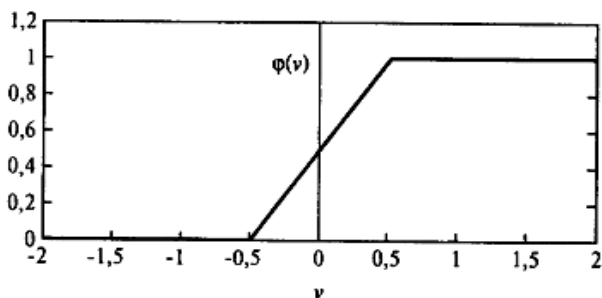


Рис. 1.3. Кусочно-линейная функция

3. *Сигмоидальная функция*, график которой напоминает букву S, является самой распространённой функцией, используемой для создания искусственных нейронных сетей. Это быстро возрастающая функция, поддерживает баланс между линейным и нелинейным поведением. Примером сигмоидальной функции может служить логистическая функция, задаваемая следующим выражением:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)},$$

где  $a$  – параметр наклона сигмоидальной функции, изменяя который можно построить функции с различной крутизной (рис. 1.4).

Первый график соответствует величине параметра, равной  $a/4$ . В пределе, когда параметр наклона достигает бесконечности, сигмоидальная функция вырождается в пороговую. Если пороговая функция может принимать только значения 0 и 1, то сигмоидальная функция принимает бесконечное множество значений в диапазоне  $0 \dots 1$ . Следует заметить, что сигмоидальная функция является дифференцируемой в то время как пороговая – нет. Дифференцируемость активационной функции играет важную роль в теории нейронных сетей [4].

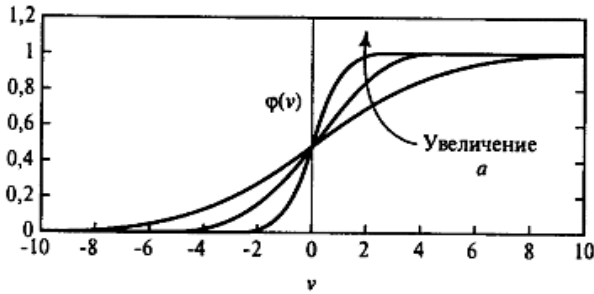


Рис. 1.4. Сигмоидальная функция для различных значений параметра  $a$

Чтобы отразить суть биологических нейронных систем, определение искусственного нейрона даётся следующим образом: искусственный нейрон получает входные сигналы (исходные данные либо выходные сигналы других нейронов нейронной сети) через несколько входных каналов. Каждый входной сигнал проходит через соединение, имеющее определённую интенсивность (или *вес*); этот вес соответствует синаптической активности биологического нейрона. С каждым нейроном связано определённое пороговое значение.

Веса могут быть отрицательными, что означает: синапс оказывает на нейрон не возбуждающее, а тормозящее воздействие (в мозге присутствуют тормозящие нейроны).

Если сеть предполагается для чего-то использовать, то у неё должны быть входы (принимающие значения интересующих нас переменных из внешнего мира) и выходы (прогнозы или управляющие сигналы). Входы и выходы соответствуют сенсорным и двигательным нервам – например, соответственно, идущим от глаз и в руки. Однако в сети может быть ещё много промежуточных (скрытых) нейронов, выполняющих внутренние функции. Входные, скрытые и выходные нейроны должны быть связаны между собой [3].

Простейшая сеть имеет структуру прямой передачи сигнала: сигналы проходят от входов через скрытые элементы и в конце концов приходят на выходные элементы. Такая структура имеет устойчивое поведение. Если же сеть *рекуррентная* (т.е. содержит связи, ведущие назад от более дальних к более ближним нейронам), то она может быть неустойчива и иметь очень сложную динамику поведения. Рекуррентные сети представляют большой интерес для исследователей в области нейронных сетей, однако при решении практических задач наиболее полезными оказались структуры прямой передачи.

Типичный пример сети с прямой передачей сигнала показан на рис. 1.5. Нейроны регулярным образом организованы в слои. Входной слой служит просто для ввода значений входных переменных. Каждый из скрытых и выходных нейронов соединён со всеми элементами предыдущего слоя. Можно было бы рассматривать сети, в которых нейроны связаны только с некоторыми из нейронов предыдущего слоя; однако, для большинства приложений сети с полной системой связей предпочтительнее [5].

При работе сети во входные элементы подаются значения входных переменных, затем последовательно обрабатывают нейроны промежуточных и выходного слоёв. Каждый из них вычисляет своё значение активации. Затем значения активации преобразуются с помощью функции активации, и в результате получается выход нейрона. После того как вся сеть обработает, выходные значения элементов выходного слоя принимаются за выход всей сети в целом.

При прогнозировании нужно знать факторы, которые влияют на спрос.

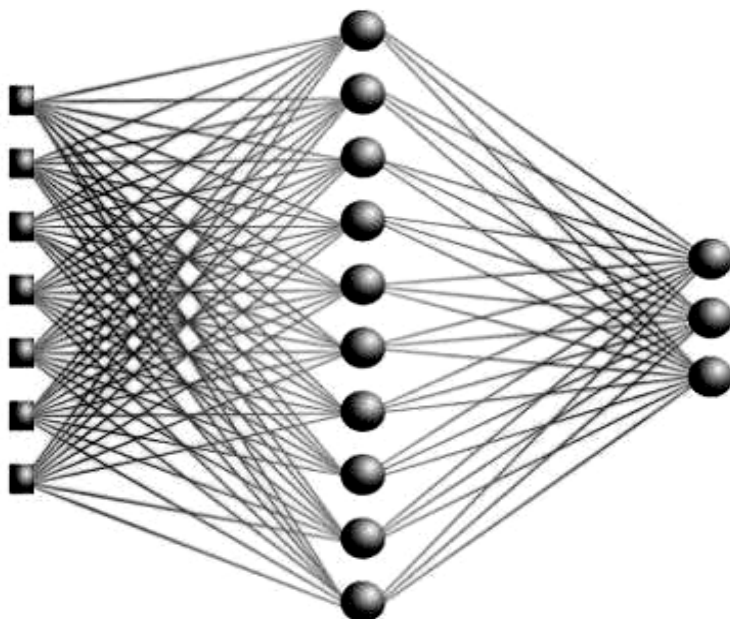


Рис. 1.5. Сеть с прямой передачей сигнала

Предлагается использовать такие факторы, как цена на продукцию, средний доход населения, прожиточный минимум, темпы строительства, цена на продукцию у конкурентов, курс доллара, индекс цен, портфель заказов, уровень безработицы, расходы на рекламу.

## 1.2. ФАКТОРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Постановка задачи прогнозирования формулируется следующим образом.

Для известных объёмов спроса на продукцию ассортимента:  
 $i, i = 1, \dots, I$

$$\begin{aligned}
 & Q_{t-1}^1, Q_{t-2}^1, Q_{t-3}^1, \dots, Q_{t-j}^1, \dots, Q_{t-n}^1; \\
 & Q_{t-1}^2, Q_{t-2}^2, Q_{t-3}^2, \dots, Q_{t-j}^2, \dots, Q_{t-n}^2; \\
 & \dots\dots\dots \\
 & Q_{t-1}^i, Q_{t-2}^i, Q_{t-3}^i, \dots, Q_{t-j}^i, \dots, Q_{t-n}^i; \\
 & \dots\dots\dots \\
 & Q_{t-1}^I, Q_{t-2}^I, Q_{t-3}^I, \dots, Q_{t-j}^I, \dots, Q_{t-n}^I
 \end{aligned}$$

и факторных признаков известных значений:

- цен на продукцию  $X 1_{t-1}, X 1_{t-2}, \dots, X 1_{t-n}$ ;
- среднего дохода населения  $X 2_{t-1}, X 2_{t-2}, \dots, X 2_{t-n}$ ;
- прожиточного минимума  $X 3_{t-1}, X 3_{t-2}, \dots, X 3_{t-n}$ ;
- темпов строительства  $X 4_{t-1}, X 4_{t-2}, \dots, X 4_{t-n}$ ;
- цен на продукцию у конкурентов  $X 5_{t-1}, X 5_{t-2}, \dots, X 5_{t-n}$ ;
- курса доллара  $X 6_{t-1}, X 6_{t-2}, \dots, X 6_{t-n}$ ;
- индекса цен  $X 7_{t-1}, X 7_{t-2}, \dots, X 7_{t-n}$ ;
- портфеля заказов  $X 8_{t-1}, X 8_{t-2}, \dots, X 8_{t-n}$ ;
- уровня безработицы  $X 9_{t-1}, X 9_{t-2}, \dots, X 9_{t-n}$ ;
- расходов на рекламу  $X 10_{t-1}, X 10_{t-2}, \dots, X 10_{t-n}$

определяем выпуск продукции в момент времени  $t$   $Q_t^1, Q_t^2, Q_t^3, \dots, Q_t^i, \dots, Q_t^I$ .



Алгоритм решения задачи прогнозирования включает следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных по продажам за предыдущий период и факторы, влияющие на эти продажи.

2. Создание обучающей, контрольной и тестовой выборок – необходимо для обучения и проверки сети.

3. Формирование архитектуры нейросети (выбор количества слоёв и количества нейронов в каждом слое). Выбор типа сети зависит от вида решаемой задачи и от опыта разработчика, который сможет выбрать наилучший тип сети для конкретной задачи. Если выбор типа сети неясен, то можно выбрать сразу несколько типов, а потом отобрать наилучший.

4. Выбор алгоритма обучения (обратное распространение, Левенберга–Маркара, быстрое распространение, delta-bar-delta [2]). Исследования показали, что для данной задачи предпочтительно выбрать алгоритм обратного распространения.

5. Применение нейросети. Запуск сети для её обучения.

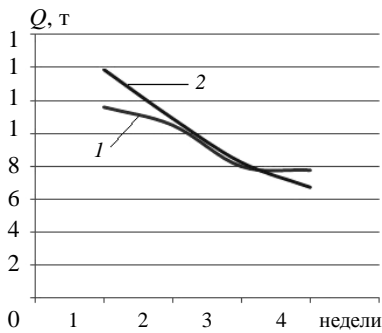
6. Расчёт ошибки. Подгонка весов нейронов для соответствия обучающей и контрольной выборок.

7. Выбор наилучшей сети. Из нескольких сетей выбирается сеть с наименьшей ошибкой. Кросс-проверка – независимая проверка качества прогноза является одной из важных задач в прогнозировании. Предлагается перед проведением анализа исходный временной ряд укоротить на четыре недели. "Хвост" ряда сохраняется для дальнейшего анализа, а после этого строится прогноз "укороченного" ряда и результат сравнивается с отложенными данными. При условии, что по конец наблюдаемого периода на ряд не производилось интервенций, можно ожидать, что мера ошибки, полученной при сопоставлении, будет оценкой ошибки на будущий период. Иными словами, если наш прогноз на 5...10% отличается от наблюдаемых данных, мы можем ожидать, что эта ошибка сохранится и на будущий ненаблюдаемый период.

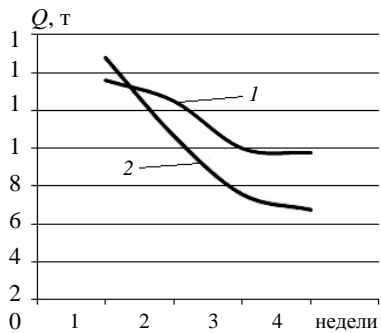
Решим задачу прогнозирования спроса на продукт А и проанализируем результаты. Имеются данные за 84 недели.

После обучения 30 сетей было выбрано четыре, которые использовались для кросс-проверки (рис. 1.6).

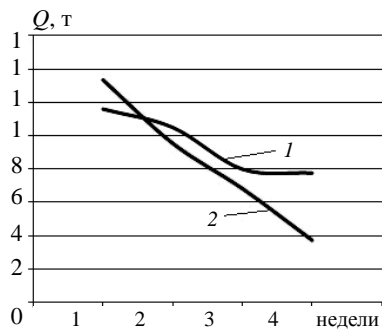
Как видно из графиков, "Сеть № 1" (рис. 1.6, а) имеет меньшую ошибку, следовательно, она будет использоваться для построения краткосрочного прогноза на 12 недель (рис. 1.7).



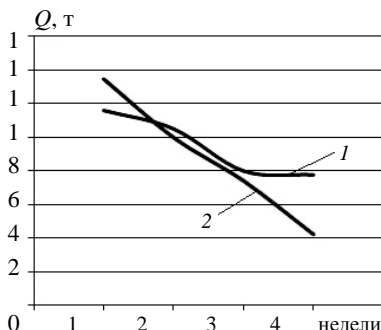
а)



б)



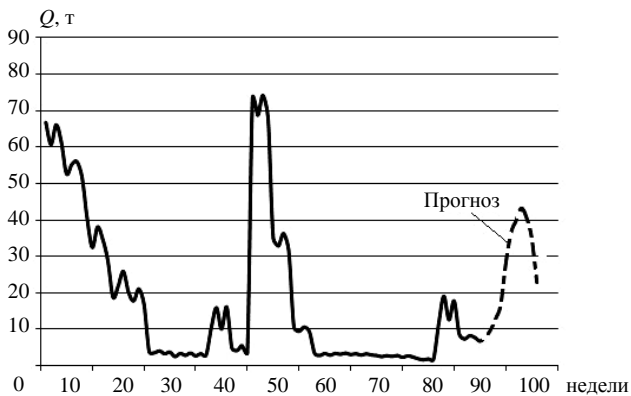
в)



г)

**Рис. 1.6. Кросс-проверка сетей:**

1 – прогноз; 2 – сеть; а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4



**Рис. 1.7. Прогноз спроса с учётом факторов**

### 1.3. БЕЗФАКТОРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Если факторные признаки выявить затруднительно, то можно воспользоваться прогнозированием без учёта факторов, т.е., оперируя только историческими данными о продажах.

Постановка задачи безфакторного прогнозирования формулируется следующим образом.

Для известных объёмов спроса на продукцию ассортимента:  
 $i, i = 1, \dots, I$

$$\begin{aligned} & Q_{t-1}^1, Q_{t-2}^1, Q_{t-3}^1, \dots, Q_{t-j}^1, \dots, Q_{t-n}^1; \\ & Q_{t-1}^2, Q_{t-2}^2, Q_{t-3}^2, \dots, Q_{t-j}^2, \dots, Q_{t-n}^2; \\ & \dots\dots\dots \\ & Q_{t-1}^i, Q_{t-2}^i, Q_{t-3}^i, \dots, Q_{t-j}^i, \dots, Q_{t-n}^i; \\ & \dots\dots\dots \\ & Q_{t-1}^I, Q_{t-2}^I, Q_{t-3}^I, \dots, Q_{t-j}^I, \dots, Q_{t-n}^I \end{aligned}$$

определяем выпуск продукции в момент времени  $t$   $Q_t^1, Q_t^2, Q_t^3, \dots, Q_t^i, \dots, Q_t^I$ .

Алгоритм решения задачи прогнозирования включает следующие этапы:

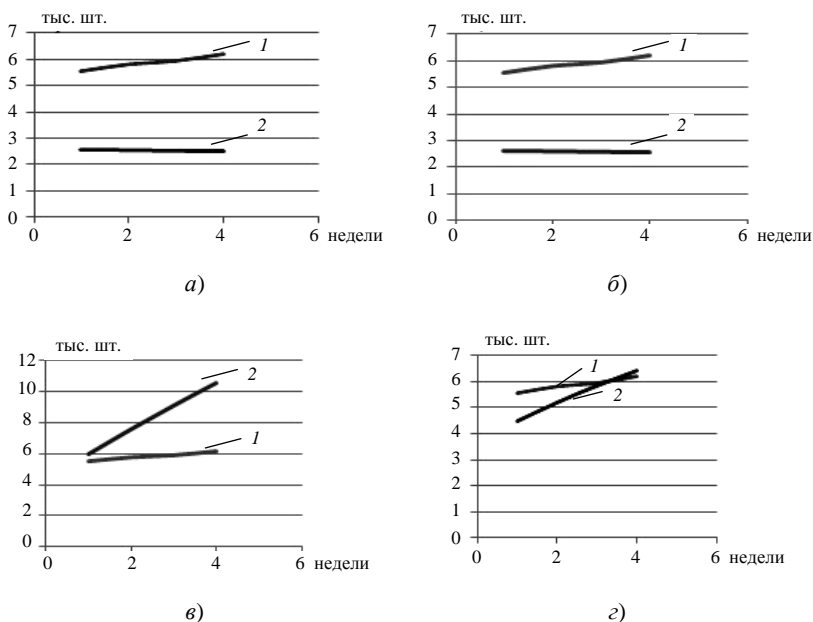
1. Подготовка исходных данных по продажам за предыдущий период.
2. Создание обучающей, контрольной и тестовой выборок – необходимо для обучения и проверки сети.
3. Формирование архитектуры нейросети.
4. Выбор алгоритма обучения (обратное распространение, Левенберга–Маркара, быстрое распространение, delta-bar-delta). Исследования показали, что для данной задачи предпочтительно выбрать алгоритм обратного распространения.
5. Применение нейросети. Запуск сети для её обучения.
6. Расчёт ошибки. Подгонка весов нейронов для соответствия обучающей и контрольной выборок.
7. Выбор наилучшей сети. Из нескольких сетей выбирается сеть с наименьшей ошибкой. Кросс-проверка – независимая проверка качества прогноза является одной из важных задач в прогнозировании. Предлага-

ется перед проведением анализа исходный временной ряд укоротить на четыре недели. "Хвост" ряда сохраняется для дальнейшего анализа, а после этого строится прогноз "укороченного" ряда и результат сравнивается с отложенными данными. При условии, что под конец наблюдаемого периода на ряд не производилось интервенций, можно ожидать, что мера ошибки, полученной при сопоставлении, будет оценкой ошибки на будущий период. Иными словами, если наш прогноз на 5...10% отличается от наблюдаемых данных, мы можем ожидать, что эта ошибка сохранится и на будущий ненаблюдаемый период.

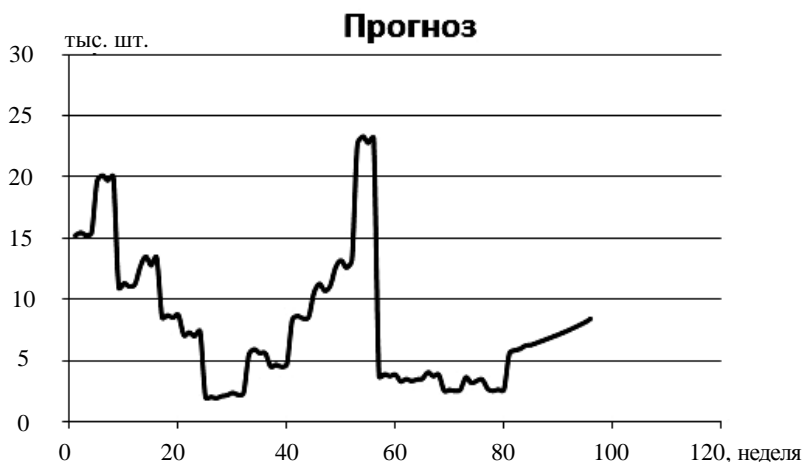
Решение задачи прогнозирования спроса также будет осуществляться на продукте А. Имеются данные за 84 недели.

После обучения 30 сетей было выбрано четыре, которые использовались для кросс-проверки (рис. 1.8 – 1.11).

Как видно из графиков, "Сеть № 4" (рис. 1.11) имеет меньшую ошибку, следовательно, она будет использоваться для построения краткосрочного прогноза на 12 недель (рис. 1.12).



**Рис. 1.8. Кросс-проверка сетей:**  
 1 – история; 2 – сеть; а – № 1; б – № 2;  
 в – № 3; з – № 4;



**Рис. 1.12. Прогноз продаж без учёта детерминантов**

Таким образом, "Сеть № 4" будет использоваться для построения краткосрочного прогноза на 12 недель.

Тесты на правильность прогноза дали положительный результат. Следовательно, факторный прогноз дал наиболее точный прогноз и может быть применён, но выбор значимых факторов и их численных значений – трудоёмкий процесс даже для квалифицированного специалиста в данной области. Таким образом, разработанный алгоритм может быть использован для решения задачи прогнозирования спроса на ассортимент продукции и далее для определения производительности основного оборудования технических систем.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое нейронная сеть.
2. Что такое алгоритм обучения.
3. Назовите три основные элементы искусственной нейронной сети.
4. Какое важное условие применения нейросетей.
5. Какие существуют виды функций активации и в чём их различия.
6. Назовите виды алгоритмов обучения.
7. Опишите алгоритм решения задачи прогнозирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности / В.В. Кафаров, В.В. Макаров. – М. : Химия, 1990. – 320 с.
2. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
3. Ивахненко, А.Г. Перцептроны / А.Г. Ивахненко. – Киев : Наукова думка, 1974. – 162 с.
4. Хайкин, Саймон. Нейронные сети: полный курс / Саймон Хайкин ; пер. с англ. – М. : "Вильямс", 2006. – 1104 с.
5. Минский, М. Перцептроны / М. Минский, С. Пайперт. – М. : Мир, 1971. – 261 с.

### МОДЕРНИЗАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МНОГОАССОРТИМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЛАНОВ ВЫПУСКА ПРОДУКЦИИ

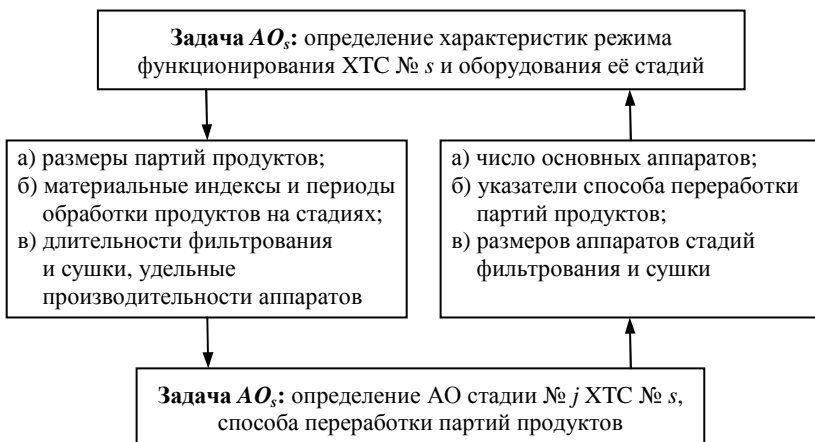
Многоассортиментные химические производства (МХП), примерами которых могут служить производства синтетических красителей и полупродуктов, фармацевтических препаратов, кинофотоматериалов, характеризуются широким ассортиментом продуктов при небольших объёмах (до 1000 т/год) и сравнительно коротких сроках их выпуска.

Основными структурными элементами МХП являются химико-технологические системы (ХТС) – аппаратурно-технологические комплексы, ориентированные на выпуск нескольких продуктов, сходных по способу получения, причём большинство ХТС МХП предназначены для последовательного выпуска продуктов фиксированного ассортимента и функционируют в периодическом режиме, хотя используют и оборудование непрерывного действия.

Определение аппаратурного оформления (АО) ХТС вновь проектируемого МХП – это выбор определяющих геометрических размеров (рабочих объёмов или/и поверхностей), числа аппаратов стадий системы и характеристик режима её функционирования, обеспечивающих выпуск продуктов заданного ассортимента  $I$  в требуемых объёмах  $Q_i$ ,  $i = 1, \dots, I$  за период  $T_p$ , см. [1 – 3]. В последние годы новые МХП в России практически не проектируются и расчёты, связанные с определением АО ХТС и режима функционирования их оборудования, осуществляются при изменении планов выпуска продукции действующих производств (ассортимента, объёмов или/и сроков выпуска продуктов) в связи с изменениями рыночной ситуации.

#### 2.1. МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Разработанная нами методология определения АО ХТС МХП [3] предусматривает представление этой проблемы в виде двухуровневой иерархии задач: на верхнем уровне решается задача оптимизации параметров режима функционирования ХТС в целом и оборудования её аппаратурных стадий (задача  $AO_s$ ), а на нижнем уровне – задачи АО аппаратурных стадий ХТС, т.е. выбора определяющих геометрических размеров и числа их основных аппаратов (задачи  $AO_{sj}$ ), см. рис. 2.1.



**Рис. 2.1. Задачи определения АО ХТС МХП**

Задача  $AO_s$  формулируется как задача нелинейного программирования, а задачи  $AO_{sj}$  – как задачи дискретной оптимизации. Такой подход позволяет избежать затруднения, многократно упоминаемого в научных публикациях по рассматриваемой проблеме (см., например, [4] – [7]) – необходимости решать задачу смешанного дискретно-нелинейного программирования, общепринятая методика решения которой в настоящее время отсутствует.

Для решения задачи  $AO_s$  необходимы некоторые результаты решения задач  $AO_{sj}$ , поэтому методика совместного решения этих задач предусматривает прогноз и итерационное уточнение значений следующих параметров:

- число основных аппаратов стадий ХТС, необходимое для переработки партий каждого продукта  $n_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, I, j \in J_i$ ;
- указатели способа переработки партий продуктов на стадиях  $p_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, I, j \in J_i$  ( $p_{ij} = 0$ , если основные аппараты стадии  $j$  ХТС перерабатывают партии  $i$ -го продукта целиком, принимая их поочередно, а если все аппараты синхронно перерабатывают равные доли партии, то  $p_{ij} = 1$ );
- коэффициенты изменения размеров партий продуктов на стадиях  $r_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, I, j \in J_i$  ( $r_{ij} = 1$ , если на стадии  $j$  ХТС размер партии  $i$ -го продукта не изменяется,  $r_{ij} = \gamma$ ,  $\gamma > 1$ , если партия разделяется на  $\gamma$  равных порций, перерабатываемых поочередно,  $r_{ij} = 1/\gamma$ ,  $\gamma > 1$ , если осуществляется объединение  $\gamma$  целых партий для их совместной переработки);
- определяющие размеры основных аппаратов стадий  $j \in J_s/J_f$ , значения которых зависят от продолжительности переработки партий продуктов (стадии фильтрования и сушки).

Здесь  $J_i$  – множество номеров стадий ХТС, аппараты которых участвуют в переработке партий  $i$ -го продукта.



## 2.2. УСЛОВИЯ РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ

Необходимые условия разрешимости задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = 1, \dots, J$  ( $J$  – число аппаратурных стадий ХТС) позволяют предварительно, только с помощью исходных данных, выявлять необходимость и определять направления изменения значений параметров  $n_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ ,  $j \in (1, \dots, J_i)$ , которые могут обеспечить существование допустимых решений задач.

1. Условие "совместимости" продуктов выбранного ассортимента, т.е. возможности осуществления всех этапов синтеза продуктов в аппаратах, которые могут быть использованы для оснащения стадий ХТС

$$w_i^{\min} \leq w_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2.1)$$

где  $w_i^{\min}$ ,  $w_i^{\max}$  – минимальное и максимальное допустимые значения размера партии  $i$ -го продукта (массы партии, прошедшей все стадии переработки), определяемые по результатам вычислений нижних и верхних оценок определяющих размеров основных аппаратов стадий ХТС, верхних оценок длительностей переработки партий продуктов на стадиях  $j \in Js_i/Jf_i$  и нижней оценки длительностей циклов выпуска партий продуктов ( $T_{цi}^*$ ,  $i = 1, \dots, I$ ).

Здесь  $Js_i$  – множество номеров стадий переработки партий  $i$ -го продукта, основными аппаратами которых являются фильтры и сушилки;  $Jf_i$  – множество номеров стадий переработки партий  $i$ -го продукта, основными аппаратами которых являются рамные и камерные фильтрпрессы, выделяющие твёрдую фазу обрабатываемой суспензии.

2. Условие наличия в множествах  $XS_j$ ,  $j = 1, \dots, J$  размеров стандартных основных аппаратов, пригодных для установки на каждой из аппаратурных стадий ХТС,

$$[X_j^L, X_j^U] \cap XS_j \neq \emptyset, \quad j = 1, \dots, J, \quad (2.2)$$

где  $X_j^L$ ,  $X_j^U$  – минимальное и максимальное допустимые значения определяющего размера основных аппаратов стадии  $j$  ХТС, вычисленные с использованием значений  $w_i^{\min}$ ,  $w_i^{\max}$ ,  $i = 1, \dots, I$ .

3. Условие обеспечения требуемой производительности ХТС

$$\sum_{i=1}^I Q_i T_{цi}^* / w_i^{\max} \leq T_p, \quad (2.3)$$

т.е. возможности выпуска всех продуктов в объёмах  $Q_i$ ,  $i = 1, \dots, I$  за время  $T_p$ .

Для случаев невыполнения условий (2.1) – (2.3) разработаны рекомендации по изменению фиксированных значений  $n_{ij}, p_{ij}, r_{ij}, i = 1, \dots, I, j \in J_i$ , которые могут обеспечить их выполнение. Например, в ситуации  $w_k^{\min} > w_k^{\max}, k \in (1, \dots, I)$  можно попытаться либо уменьшить  $w_k^{\min}$ , либо увеличить  $w_k^{\max}$ . Уменьшить  $w_k^{\min}$  можно за счёт увеличения значения  $u_{kl}$ , т.е. уменьшения значения  $r_{kl}$ , (объединения в аппаратах стадии  $l$  ХТС нескольких партий  $k$ -го продукта для совместной обработки, либо при  $n_{kl} > 1$  и  $p_{kl} = 1$  – отказа от синхронной обработки равных долей партии  $k$ -го продукта в аппаратах стадии  $l$  (перехода к  $p_{kl} = 0$ ). Подробнее о формулировке условий и рекомендациях по их выполнению см. в [3].

Заметим, что выполнение условий (2.1) – (2.3) не гарантирует получения допустимого решения задач, однако позволяет сразу отбросить явно недопустимые комбинации значений  $n_{ij}, p_{ij}, r_{ij}, i = 1, \dots, I, j \in J_i$ . Например, проверка этих условий в ходе определения АО ХТС, состоящей из 11 аппаратурных стадий, на которой предполагалось за  $T_p = 3420$  ч выпустить 7 азокрасителей при совокупной мощности 314 т, позволила выявить необходимость использования двух основных аппаратов на одной из стадий фильтрации и необходимость объединения партий некоторых продуктов на стадиях растворения полуфабрикатов.

### 2.3. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагаемые постановки задачи  $AO_s$  в случае коррекции характеристик режима функционирования ХТС действующего МХП и задач  $AO_{sj}, j = 1, \dots, J$  коррекции АО её стадий при изменении плана выпуска продукции предусматривают возможность введения в состав АО некоторых стадий ХТС дополнительных основных и вспомогательных аппаратов, замены части основного и(или) вспомогательного оборудования каких-либо стадий, а также введения в ХТС дополнительных аппаратурных стадий для реализации стадий синтеза новых продуктов и выбор оборудования для их оснащения (из числа резервных аппаратов производства, либо вновь приобретаемых). Кроме того, анализ практики работы проектно-конструкторских отделов действующих МХП в части расчётов оборудования ХТС при изменении планов выпуска их продукции привёл нас к необходимости учёта возможностей изменения АО, которые практически не рассматривались в научных публикациях:

1) в состав АО стадии ХТС могут быть включены параллельные основные аппараты, имеющие неодинаковое исполнение и различные определяющие геометрические размеры, причём каждый из них может быть использован для переработки партий определённой группы продуктов и не участвовать в выпуске остальных;

2) в аппаратах одной и той же аппаратурной стадии ХТС могут быть последовательно реализованы несколько стадий синтеза одного и того же продукта (например, растворение одного из видов сырья, химическая реакция и выделение продукта).

Заметим, что решения о последовательной реализации ряда стадий синтеза какого-либо продукта с помощью оборудования одной и той же аппаратурной стадии ХТС касаются стадий  $j \in Jb_i$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ , реализуемых в ёмкостных аппаратах, так как основные аппараты других стадий (фильтрования, сушки) обычно специализированы и не могут быть использованы для реализации других процессов.

Математическая модель функционирования АО ХТС действующего МХП при изменении планов выпуска его продукции претерпела, по сравнению с [2], следующие изменения:

– как следствие возможности 1) предусмотрено формирование для каждой стадии  $j$  ХТС множеств  $F_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, I$  номеров основных аппаратов стадий ХТС, участвующих в переработке партий каждого конкретного продукта, а также зависимость некоторых характеристик этих аппаратов (удельной производительности фильтра или сушилки, глубины рамы или камеры фильтр-пресса, максимальной степени заполнения объёма сушилки периодического действия) от их исполнения;

– учтено, что число основных аппаратов стадии  $j$  при их сквозной нумерации соответствует максимальному элементу множеств  $F_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, I$ , т.е.

$$N_j = \max_{i=1, I} \{f | f \in F_{ij}\}, j = 1, \dots, J;$$

– как следствие возможности 2) предусмотрено формирование множеств  $v_{ijc}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ ,  $j \in Jb_i$ ,  $c = 1, \dots, C_{ij}$  значений материальных индексов некоторых аппаратурных стадий по одному и тому же продукту ( $C_{ij}$  – число стадий синтеза  $i$ -го продукта, реализуемых в аппаратах стадии  $j$  ХТС) и соответствующие изменения в ограничениях на значения размеров аппаратов этих стадий.

Целью решения задачи  $AO_s$  является минимизация энергозатрат на технологические цели в течение планового периода функционирования ХТС ( $Tr$ ), а целью решения задачи  $AO_{sj}$  – обеспечение возможности реализации стадий выпуска всех продуктов при минимальных дополнительных затратах на оборудование аппаратурной стадии  $j$  системы,

причём учитываются только затраты на дополнительно привлекаемое основное и вспомогательное оборудование. Возможность высвобождения части основного и вспомогательного оборудования стадий ХТС не учитывается, так как эти аппараты обычно остаются в составе АО ХТС и могут быть использованы при очередных изменениях её производительности по выпускаемым продуктам и/или их ассортименту.

Заметим, что при решении этих задач в условиях ограниченности парка оборудования действующего МХП особую важность приобретает учёт возможности дробления/укрупнения партий продуктов на некоторых стадиях ХТС (см. [1] – [3]). Например, в ситуации

$$\max_{f \in F_{ij}} \{X_{jf} \mid X_{jf} \in XS_j\} < u_{ij} \frac{v_{ijc} w_i}{\Phi_{ijc}^*}, \quad i \in (1, \dots, I), \quad j \in Jb_i, \quad c \in (1, \dots, C_{ij})$$

(размер  $X_{jf}$  максимального основного аппарата, пригодного для установки на стадии  $j$  слишком мал для переработки партий  $i$ -го продукта) можно уменьшить коэффициент изменения размера партии

$$u_{ij} = \frac{p_{ij} + (1 - p_{ij}) n_{ij}}{n_{ij}} \frac{1}{r_{ij}} \quad (2.4)$$

(разделить партию продукта на равные порции для последовательной переработки), если эксперт (опытный технолог) сочтёт это допустимым. Здесь  $w_i$  – размер партии  $i$ -го продукта;  $\Phi_{ijc}^*$  – максимально допустимая степень заполнения аппаратов стадии  $j$  при реализации  $c$ -й стадии синтеза  $i$ -го продукта.

#### 2.4. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Итерационный процесс решения задачи  $AO_s$  и задач  $AO_{sj}, j = 1, \dots, J$  включает:

1) предварительный прогноз значений параметров  $n_{ij}, p_{ij}, r_{ij}, i = 1, \dots, I, j \in J_i$ ;

2) проверку и обеспечение выполнения условий (2.1) – (2.3) существования решений задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = 1, \dots, J$ ;

3) прогноз значений  $X_{jf}, j \in J_{S_f}/J_f, f = 1, \dots, N_j$  и определение в результате решения задачи  $AO_s$  значений  $w_i, i = 1, \dots, I$ , обеспечивающих выпуск всех продуктов в заказанных объёмах  $Q_i, i = 1, \dots, I$  за период  $Tp$ ;

4) определение в результате решения задач  $AO_{sj}, j = 1, \dots, J$  размеров и числа аппаратов каждой стадии системы, а также значений

$n_{ij}, p_{ij}, r_{ij}, i = 1, \dots, I, j \in J_i$ , обеспечивающих возможность переработки партий каждого продукта в аппаратах всех стадий ХТС, участвующих в его выпуске, и минимум затрат на дополнительно привлекаемое оборудование;

5) возврат на п. 3 при несовпадении значений  $n_{ij}, p_{ij}, r_{ij}, i = 1, \dots, I, j \in J_i$ , полученных в результате решения задач  $AO_{sj}, j = 1, \dots, J$ , с их значениями, при которых в п. 2 было обеспечено выполнение условий (2.1) – (2.3).

Изменение плана выпуска продукции действующего МХП часто связано с выполнением заказов по выпуску конкретного нового продукта в заданном объёме к указанному сроку, т.е. при фиксированном значении продолжительности периода выпуска этого продукта, и задачи  $AO_s$  и  $AO_{sj}$  обычно решаются только для одного конкретного продукта.

Предварительно осуществляется выбор аппаратурных стадий ХТС, оборудование которых пригодно для реализации стадий выпуска нового продукта, формируется структура материальных связей между ними и предполагаемый состав их АО, в том числе и стадий, вновь вводимых в ХТС (множества  $XS_j, j = 1, \dots, J$ ). Заметим, что число пригодных для использования на стадии  $j$  основных и вспомогательных аппаратов в данном случае, как правило, невелико (два-три подходящих аппарата, чаще всего – один), поэтому проверка условий (2.1) – (2.3) нередко приводит к получению допустимого решения. Например, при решении задач организации выпуска полупродукта 1,3-фенилендиамина технического на ХТС одного из производств Тамбовского ОАО "Пигмент" изменения значений  $n_j, p_j, r_j, j \in (1, \dots, J)$ , оказавшиеся необходимыми для выполнения условий (2.1) – (2.3), обеспечили выпуск этого полупродукта в требуемом объёме 170 т за 2640 часов с помощью имеющихся основных аппаратов.

Задачи  $AO_{sj}$  для случая организации выпуска одного нового продукта с помощью оборудования действующей ХТС решаются при фиксированном значении размера его партии  $w$ , найденном при решении задачи  $AO_s$ : необходимо выяснить, способно ли АО конкретной стадии  $j$  ХТС осуществить переработку партий такого размера с учётом возможностей изменения значения  $u_j$  (см. (2.4)) и(или) привлечения дополнительного оборудования. Для ответа на этот вопрос проверяется выполнение ограничений на размеры аппаратов, например для основных аппаратов стадий  $j \in Jb_i$  – ограничения

$$\max_{c=1, C_j; f=1, N_j} \left\{ \frac{\Phi_{jc}^* X_{jf}}{v_{jc}} \right\} \leq w u_j \leq \min_{c=1, C_j; f=1, N_j} \left\{ \frac{\Phi_{jc}^* X_{jf}}{v_{jc}} \right\}, \quad (2.5)$$

а для основных аппаратов, оснащаемых рамными или камерными фильтрпрессами для реализации процессов выделения твёрдой фазы суспензии ( $j \in Jf_i$ ) – ограничения

$$w_{ij} \leq \min_{c=1, C_j; f=1, N_j} \left\{ \frac{\delta_{jcf} X_{jf}}{v_{jc}} \right\}, \quad (2.6)$$

где  $\delta_{jcf}$  – толщина осадка (половина глубины рамы или камеры фильтра).

## 2.5. ПРИМЕР МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Предложенная методика коррекции АО ХТС действующего МХП при изменении планов выпуска его продукции протестирована на примерах изменения производительностей реальных производств (данные предоставлены ОАО "Экохимпроект", г. Тамбов). С её помощью решены задачи коррекции АО действующего производства дисперсных красителей ОАО "Пигмент" (г. Тамбов), необходимой для выпуска ассортимента прямых красителей, а также задачи организации выпуска отдельных красителей и полупродуктов с помощью оборудования того же производства.

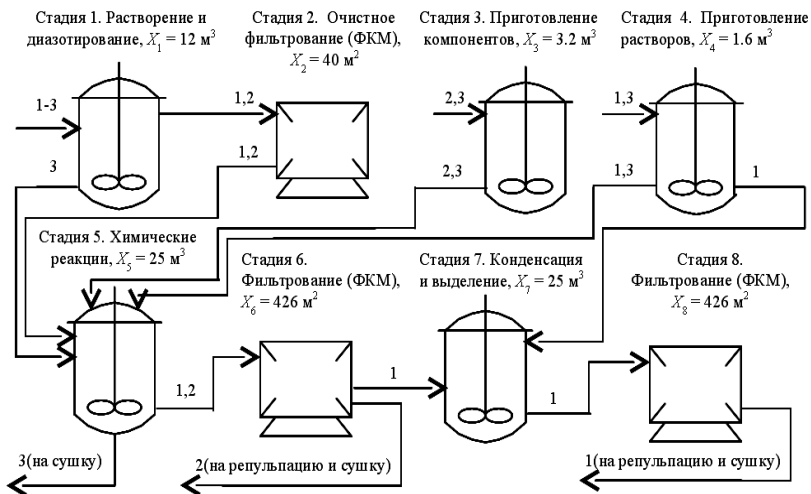


Рис. 2.2. Схема материальных потоков, наименования стадий и размеры основных аппаратов ХТС для выпуска прямых красителей

В качестве примера рассмотрим ХТС, сформированную из резервного оборудования производства полупродуктов и красителей ОАО "Пигмент" (г. Тамбов) для выпуска за  $T_p = 2520$  часов (105 суток при круглосуточной работе) следующих красителей:

- 1) прямой жёлтый СВ 2КМ –  $Q_1 = 25$  т;
- 2) прямой синий СВ 2КМ –  $Q_2 = 20$  т;
- 3) прямой чёрный М (совелан) –  $Q_3 = 200$  т.

Структура материальных потоков этой ХТС при выпуске продуктов, наименования аппаратурных стадий, типы и определяющие размеры их основных аппаратов представлены на рис. 2.2. Все стадии ХТС комплектуются единственным основным аппаратом.

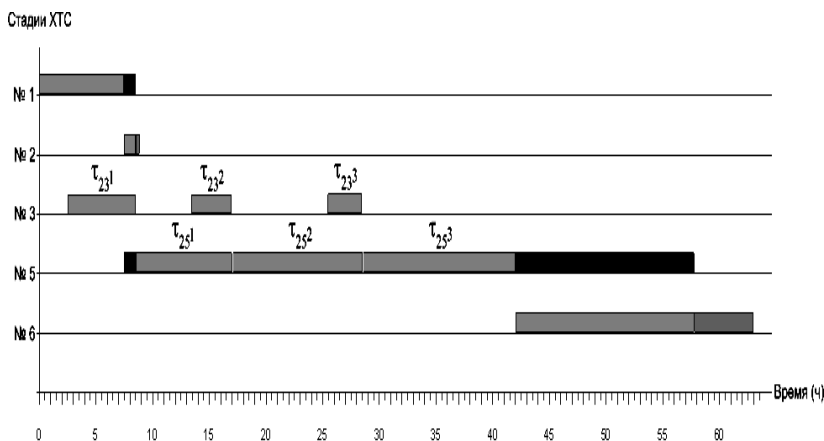
В аппаратах стадий 3, 4, 5 и 7 при выпуске продуктов № 1 и № 2 реализуются несколько стадий их синтеза. Так при выпуске продукта № 1 в аппарате стадии 4 сначала готовится медно-аммиачный комплекс для реакции триазилирования на стадии № 5, а затем – раствор глюкозы для выделения красителя на стадии № 7. В аппарате стадии № 5 последовательно осуществляются реакции диазотирования ДНС-кислоты, азосочетания и триазилирования. В аппарате стадии № 7 последовательно реализуются стадии растворения пасты триазилированного продукта, конденсации и выделения красителя. При выпуске продукта № 2 в аппарате стадии 3 последовательно реализуются стадии растворения Р-соли (для первого азосочетания), растворения И-кислоты (для второго азосочетания) и приготовления металлизующего агента (для металлизации и выделения красителя). В аппарате стадии 5 последовательно реализуются все три упомянутые химические реакции.

При проверке выполнения условий (1) – (3) существования решений задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = 1, \dots, 8$  выявлена необходимость приготовления раствора ацетата натрия в аппарате стадии 3 сразу на две партии третьего продукта ( $r_{33} = 1/2$ ). Результаты решения задачи  $AO_s$  сведены в табл. 2.1.

Диаграмма одного цикла работы основного оборудования ХТС при выпуске продукта № 2, полученная в результате решения задачи  $AO_s$ , представлена на рис. 2.3.

### 2.1. Характеристики режима функционирования ХТС выпуска прямых красителей

№ продукта	Размер партии, т	Межцикловый период, ч.	Цикл работы ХТС, ч.	Число партий, выпускаемых за цикл	Продолжительность выпуска, ч.
1	1,006	51,2	117	1	1338,7
2	1,299	50,28	63,03	1	867,5
3	4,25	10,4	15,4	2	249,7



**Рис. 2.3. Диаграмма цикла работы ХТС при выпуске продукта № 2**

Решение задач  $AO_{sj}$ ,  $j = 1, \dots, 8$  в данном случае свелось к проверке выполнения ограничений (2.5), (2.6) при фиксированных значениях размеров партий продуктов и определяющих размеров основных аппаратов.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие результаты решения задач определения АО стадий ХТС МХП (задач  $AO_{sj}$ ,  $j = 1, \dots, J$ ) являются исходными данными для решения задачи выбора характеристик режима функционирования системы (задачи  $AO_s$ )?

2. Как используются условия разрешимости задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = 1, \dots, J$  в процессе их решения?

3. Какие возможности изменения АО ХТС традиционно учитываются в постановках задач перепрофилирования действующего производства на выпуск новой продукции? Какие новые возможности учтены в предлагаемых постановках задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = 1, \dots, J$ ?

4. Почему задачи  $AO_s$  и  $AO_{sj}$  в ситуации изменения плана выпуска продукции действующего МХП обычно решаются только для одного конкретного продукта?

5. Какой приём используют проектировщики в случае нехватки основных аппаратов действующего производства для реализации всех стадий наработки новых продуктов?



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. Малыгин, Е.Н. Методика определения аппаратурного оформления многопродуктовых химико-технологических систем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 5. – С. 43 – 50.
2. 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.
3. Карпушкин, С.В. Выбор аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С.В. Карпушкин. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2006. – 140 с.
4. Гордеев, Л.С. Интегрированная экспертная система для организации многоассортиментных химических производств / Л.С. Гордеев, М.А. Козлова, В.В. Макаров // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32. – № 3. – С. 322 – 332.
5. Lin, X. Design, synthesis and scheduling of multipurpose batch plants via an effective continuous-time formulation / X. Lin, C.A. Floudas // Computers & Chemical Engineering. – 2001. – Vol. 25. – P. 665 – 682.
6. Multi-objective process design in multipurpose batch plants using a Tabu Search optimization algorithm / L. Cavin, U. Fischer, F. Glover, K. Hungerbühler // Computers & Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 28. – P. 459 – 478.
7. Mokeddem, D. Optimal Solutions of Multiproduct Batch Chemical Process Using Multiobjective Genetic Algorithm with Expert Decision System / D. Mokeddem, A. Khellaf // Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. – 2009. – Art. ID 927426. – 9 p. – doi:10.1155/2009/927426.

### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Выбор аппаратурного оформления химико-технологических систем – одна из основных задач, возникающих при проектировании многоассортиментных химических производств. 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 [1]. Примерами таких производств являются производства химических реактивов, фармацевтических препаратов, красителей и полупродуктов, пищевые производства.

Решением этой задачи является число основных аппаратов каждой стадии системы, а также рабочий объём или площадь рабочей поверхности каждого аппарата, обеспечивающих заданный выпуск каждого продукта. Рабочие объёмы и площади рабочих поверхностей обычно выбираются из множества стандартных значений. Требуется найти оптимальную комбинацию числа и определяющих размеров аппаратов стадий ХТС из всего множества возможных вариантов, при этом критерием оптимальности могут служить, например, суммарные капитальные затраты на оборудование [1]. 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) [2, 3].

Для каждого работоспособного варианта АО ХТС параметры режима функционирования системы (размеры партий продуктов и периоды их выпуска) определяются однозначно, т.е. задачу поиска оптимального варианта АО ХТС можно рассматривать как задачу дискретной оптимизации.

Применение полного перебора вариантов для получения глобального оптимального решения затруднено из-за большой размерности задачи. Например, в работе [4] представлена ХТС, состоящая из

16 технологических 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  $5^{16} - 12^{16}$  (что, примерно, равно  $10^{11} - 10^{17}$ ).

Чаще всего используемые для решения этой задачи подходы, в том числе методы Монте-Карло, генетические алгоритмы, эвристические методы, позволяют получить лишь квазиоптимальные (субоптимальные?) решения.

Ветви и границы – один из популярных методов, используемых для решения оптимизационных задач в различных областях, например, таких как комбинаторная оптимизация, искусственный интеллект и т.д. Также возможно его применение для решения задач частично-целочисленного нелинейного программирования [5]. В основе метода ветвей и границ [6] лежит идея последовательного разбиения множества допустимых решений на подмножества. Затем осуществляется нижняя оценка для целевой функции на данном подмножестве. Если нижняя оценка не меньше наилучшего из найденных решений, то подмножество отбрасывается.

В данной главе представлен алгоритм, основанный на методе ветвей границ, осуществляют его оптимизацию и исследуют возможность его применения для поиска глобального оптимального решения поставленной выше задачи.

### 3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Химико-технологическая система представляет собой множество технологического оборудования (ёмкостей, реакторов, фильтров, сушилок и др.), предназначенного для реализации технологических стадий производства некоторых продуктов. При допущении, что на каждой стадии ХТС может быть установлен один аппарат, задача может быть сформулирована следующим образом.

ХТС представляет собой последовательность  $I$  технологических стадий. Каждая  $i$ -я технологическая стадия системы может быть оборудована 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 и т.д.)  $j$ -го аппарата, которым может быть оборудована  $i$ -я технологическая стадия ХТС.

Каждый вариант ХТС  $\Omega_{e, e = \overline{1, E}}$ , где  $E = \prod_{i=1}^I J_i$  – количество всех возможных вариантов системы, представляет собой упорядоченную совокупность определяющих размеров аппаратов, выбранных из соответствующих множеств. Например, существует ХТС, состоящая из трёх 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

$$J_2 = 3, X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}\};$$

третья – из двух вариантов

$$J_3 = 2, X_3 = \{x_{3,1}, x_{3,2}\}.$$

Общее количество всех возможных вариантов АО ХТС  $E = J_1 J_2 J_3 = 12$ .

Порядок переработки партий продуктов основными аппаратами стадий в ХТС жёстко задан заранее, т.е., например, варианты  $\{x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,2}\}$ ,  $\{x_{1,2}, x_{2,1}, x_{3,1}\}$  допустимы, а варианты  $\{x_{3,1}, x_{2,1}, x_{1,2}\}$ ,  $\{x_{2,2}, x_{3,1}, x_{1,1}\}$  – нет.

Для каждого работоспособного варианта АО ХТС  $\Omega_e$  должны выполняться условия совместного функционирования оборудования различных её стадий  $S(\Omega_e) = 0$  (*ограничение на работоспособность ХТС*).

Кроме того, работоспособный вариант АО ХТС должен обеспечивать выпуск продукции заданного объёма за заданный промежуток времени, т.е.  $T(\Omega_e) \leq T_{\max}$  (*ограничение на длительность функционирования ХТС*), где  $T_{\max}$  – заданное максимальное время требуемого объёма продукции.

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

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

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

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

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

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

Подробно математическая модель функционирования ХТС, включающая в том числе выражения для проверки ограничений, вычисления критерия оптимизации и т.д., представлена в [7].

### 3.2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Всё множество вариантов 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  $X_1$ .

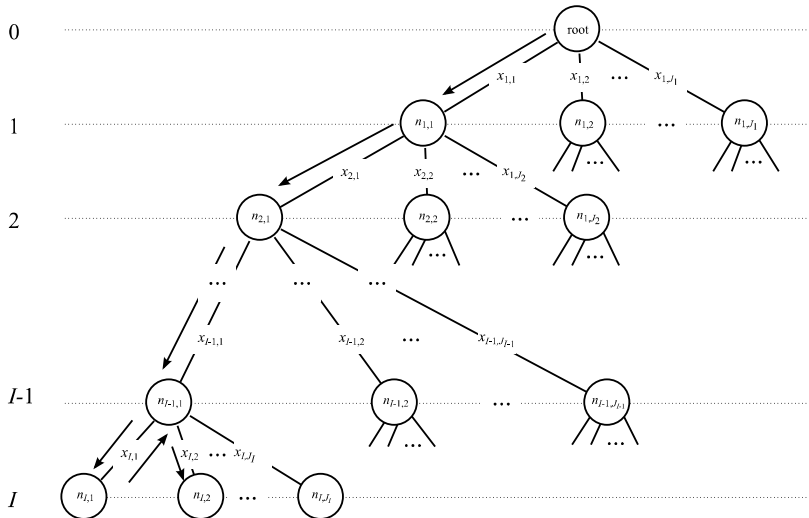


Рис. 3.1. Обход в глубину дерева вариантов

Каждый узел  $n_{i,k}$  яруса  $N_i = \{n_{i,1}, n_{i,2}, \dots, n_{i,k}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $k = \overline{1, K_i}$ ,  $K_i = \prod_{l=1}^j J_l$  соответствует варианту фрагмента ХТС, состоящего 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. Для перебора всех возможных вариантов ХТС используется обход дерева в глубину [8, 9].

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 рекурсивно для всех работоспособных начальных фрагментов схемы. 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 выбранного из соответствующего для этой стадии ряда размеров аппарата) 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 ниже (имена большинства переменных соответствуют именам, используемых в постановке задачи):

```

1 FindSolution () { EnumerateVariants (0); }
2
3 /* рекурсивный обход дерева */
4 EnumerateVariants (i) {
5   if (i < I) {
6     for (j = 1; j <= J[i]; j++) {
7       /* создание нач. фрагмента ХТС (стадии 1 - i)*/
8       W[i] = X[i, j];
9       /* проверка работосп. нач. фрагмента ХТС*/
10      if (PartS(W) == 0) {
11        /* рекурсивный поиск */
12        EnumerateVariants (i + 1); } } }
13 else { /* достигнут конечный узел дерева */
14   /* проверка ограничения (5) */
15   if (T(W) <= Tmax) {
16     /* проверка критерия оптимизации */

```

```

17         if (Cost(W) < minCost) {
18             /* сохранение нового оптимального решения */
19             Wopt = W;
20             minCost = Cost(Wopt); } } }
21 }

```

Обход дерева вариантов начинается с вызова процедуры EnumerateVariants на нулевом ярусе (строка 1). Эта процедура вызывает-ся рекурсивно вплоть до яруса  $I - 1$  (строка 5). Текущий оптимальный вариант ХТС сохраняется в векторе Wopt длины  $I$ , каждый элемент которого хранит выбранный определяющий размер аппарата на каждой стадии. Рабочий вариант ХТС хранится в аналогичном векторе W.

Для сокращения вариантов перебора в оригинальном варианте алгоритма применялась следующая схема. На каждом ярусе  $i$  дерева проверяется ограничение (3.4) (процедура PartS(), строка 10) 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. Переход на следующий уровень рекурсии (вызов процедуры EnumerateVariants () на уровне  $i + 1$ , строка 12) происходит лишь в том случае, если начальный фрагмент ХТС, состоящий из стадий  $1 - i$ , работоспособен, иначе происходит возврат на предыдущий ярус дерева.

Если достигнут конечный узел дерева ( $i = I$ , строка 13), проверяется ограничение (3.5) на длительность функционирования ХТС (процедура T(), строка 15). Если ограничение (3.5) выполняется, то найден новый работоспособный вариант ХТС и далее его стоимость (процедура Cost()) сравнивается со стоимостью текущего наилучшего варианта ХТС minCost (строка 17). Если найдено лучшее решение, оно заменяет текущее оптимальное решение Wopt (строка 19), а его стоимость сохраняется в переменной minCost (строка 20).

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

### 3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

Для проведения численных экспериментов разработана программа на языке программирования C++, реализующая представленный выше алгоритм. В качестве тестового примера использовалась ХТС,

состоящая из 16 аппаратурных стадий ( $I = 16$ ), для каждой из которых доступно пяти стандартных типоразмеров оборудования (см. рис. 3.2).

ХТС должна в течение 7400 часов обеспечить выпуск трёх видов красителей объёмом 2250, 100 и 50 тонн соответственно.

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.

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

Для выявления наиболее "узких" мест алгоритма были проведены оценки времен выполнения отдельных его элементов. Результаты представлены в табл. 3.2.

По представленным результатам видно, что наиболее дорогой операцией является процедура проверки ограничения на длительность функционирования ХТС  $T(W)$ . Для сокращения общего времени работы алгоритма необходимо свести к минимуму количество вызовов этой процедуры, для чего была проведена следующая оптимизация алгоритма.

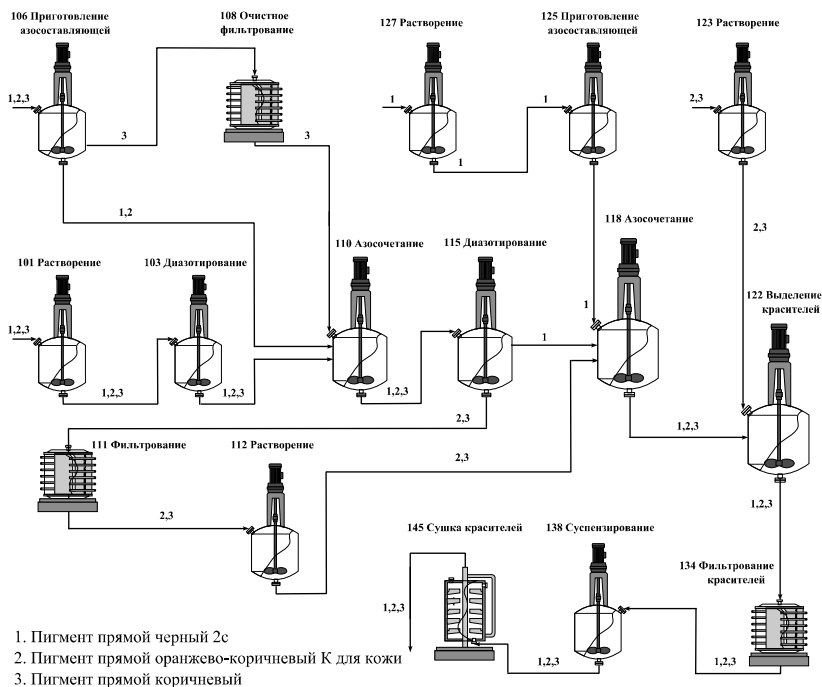


Рис 3.2. Тестовый пример химико-технологической системы



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

№ по схеме	Наименование стадии	Основной размер оборудования
101	Растворение	
103	Диазотирование	
106	Приготовление азосоставляющей	
108	Очистное фильтрование	
110	Азосочетание	
115	Диазотирование	
127	Растворение	
125	Приготовление азосоставляющей	
111	Фильтрование	
112	Растворение	
118	Азосочетание	
122	Выделение красителей	
123	Растворение	
134	Фильтрование красителей	
138	Суспензирование	
145	Сушка красителей	

### 3.2. Оценки времен выполнения элементов алгоритма

Элемент алгоритма	Оценка времени выполнения, мкс
Рекурсивный вызов процедуры EnumerateVariants( $i + 1$ )	0,58
$S(W)$	22,07
$T(W)$	1329,86
$Cost(W)$	2,41

Процедура проверки критерия оптимизации  $Cost(W)$  является сравнительно дешёвой операцией (см. табл. 3.2). Выполнив проверку критерия оптимизации сразу после получения работоспособного варианта ХТС, можно для заведомо неоптимальных решений не проверять ограничение на длительность функционирования ХТС  $T(W)$ . Таким

образом, несмотря на то, что количество вызовов процедуры  $\text{Cost}(W)$  увеличится, заметно сократится количество вызовов процедуры  $T(W)$ , что в итоге приведёт к уменьшению общего времени работы алгоритма. Ниже представлены сделанные в алгоритме изменения.

```

...
13 else { /* достигнут конечный узел дерева */
14     /* проверка критерия оптимизации */
15     if (Cost (W) < minCost) {
16         /* проверка ограничения (5) */
17         if (T(W) <= Tmax ) {
18             /* сохранение нового оптимального решения */
19             Wopt = W;
20             minCost = Cost (Wopt); } } }
...

```

Во второй модификации алгоритма была изменена строка (10) оригинального алгоритма следующим образом:

```

...
10     if (S(W) == 0 && PartCost (W, i) < minCost ) {
...

```

В условии перехода на нижележащие уровни дерева дополнительно сравнивается стоимость начального фрагмента ХТС (процедура  $\text{PartCost}()$ , строка 10), со стоимостью текущего наилучшего варианта ХТС  $\text{minCost}$ . Таким образом, переход на следующий уровень рекурсии (вызов процедуры  $\text{EnumerateVariants}()$  на уровне  $i + 1$ , строка 12) 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 ХТС. В противном случае происходит возврат на предыдущий ярус дерева.

Были проведены вычислительные эксперименты для различного количества возможных вариантов оборудования для каждой стадии (от 2 до 5 вариантов). Замерялось время выполнения как оригинального, так и оптимизированных вариантов алгоритма. Результаты представлены в табл. 3.3.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что в результате оптимизации алгоритма время его выполнения удалось уменьшить в среднем в 1,8 – 2 раза. Более значительное уменьшение времени выполнения для случая трёх вариантов АО на стадии можно

### 3.3. Времена выполнения различных модификаций алгоритма

Количество вариантов АО на стадии	Оригинальный алгоритм, чч:мм:сс	Первая модификация алгоритма, чч:мм:сс	Вторая модификация алгоритма, чч:мм:сс
2	00:00:22	00:00:14	00:00:13
3	01:12:58	0:14:45	00:12:46
4	14:42:24	6:57:09	6:38:10
5	89:33:50	48:27:52	45:55:57

объяснить тем, что для этого набора доступного оборудования существует большее количество работоспособных вариантов ХТС, по сравнению с двумя, четырьмя и пятью вариантами. Для каждого работоспособного варианта в оригинальной версии алгоритма приходится проверять ограничение на длительность функционирования ХТС  $T(W)$ . В модифицированных вариантах этого не происходит.

В целом, несмотря на проведённую оптимизацию алгоритма, время выполнения остаётся значительным. В дальнейшем для сокращения времени работы представляется целесообразным разработка и изучение параллельной версии представленного алгоритма.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Перечислите основные особенности МХП.
2. Сформулируйте задачу выбора 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

1. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности / В.В. Кафаров, В.В. Макаров. – М. : Химия, 1990.
2. Search for Optimal Design of Multiproduct Batch Plants under Uncertain Demand using Gaussian Process Modeling Solved by Heuristics Methods / Youness El Hamzaoui, J.A. Hernandez, M.A. Cruz-Chavez, A. Bassam // Berkeley Electronic Press. – 2010.

3. Mixed-integer nonlinear programming optimization strategies for batch plant design problems / Antonin Ponsich, Catherine Azzaro-Pantel, Serge Domenech, Luc Pibouleau // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2007. – 46(3). – 854–863.

4. Борисенко, А.Б. Синтез аппаратурного оформления многоассортиментных химико-технологических систем / А.Б. Борисенко // *PhD thesis / Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000.*

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

6. Gilles Brassard. *Fundamentals of Algorithmics* / Gilles Brassard, Paul Bratley // Prentice Hall. – 1996.

7. Малыгин, Е.Н. Математическая модель функционирования многопродуктовых химико-технологических систем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // *Теоретические основы химической технологии*. – 2005. – 39(4). – С. 455 – 465.

8. Алгоритмы: построение и анализ / Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. – 2-е изд. – Edition. – Вильямс, 2011.

9. Дональд Э. Кнут. Искусство программирования / Дональд Э. Кнут. Основные алгоритмы. – 3-е изд. – Edition. – Вильямс, 2009. – Т. 1.

### INFORMATION AND LOGICAL MODEL OF TRACING OF TECHNOLOGICAL PIPELINES

For problem formalization we will make following assumptions: trace is made up of the rectilinear fragments located to in parallel coordinate axes; initial and final points of lines are combined with the centers of devices; points of transition from a floor on a floor are combined with the centers of devices-sources of lines.

As a result of the decision of problems of a process equipments choice [1] and placing [2] the initial information for tracing of technological communications is received: N-quantity of devices;  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  – coordinates of the centers of devices;  $(a_i, b_i, c_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  – overall dimensions of devices;  $(X_c, Y_c, Z_c)$  – overall dimensions of an industrial premises.

Let's designate floor number through  $\rho$ . Then for a lining of pipelines parallel to an axis  $OY$  level  $[U_{\rho^*}^y, U_{\rho^*}^{y^*}]$ , and for the pipelines parallel to an axis  $OX$  level  $[U_{\rho^*}^x, U_{\rho^*}^{x^*}]$  is allocated. At each level of pipelines laid at no more than two rows.

Let's enter into consideration matrix  $F(3L)$  for the characteristic of set of lines. Here  $L$ -quantity of communications;  $f_{1j}$  and  $f_{2j}$  – numbers of the devices connected by  $j$ -th line;  $f_{3j} \in \{1, 2, \dots, R\}$  – number of a connecting network to which possesses  $j$ -th line. We will characterize each line by a vector

$$T_j = (x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}, x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}, \dots, x_{jk_j}, y_{jk_j}, z_{jk_j}),$$

where  $j = 1, 2, \dots, L$  – line number;  $(x_{j0}, y_{j0}, z_{j0})$  – coordinates of the beginning of a line (i.e. coordinates of the center of the device  $f_{1j}$ );  $(x_{jk_j}, y_{jk_j}, z_{jk_j})$  – coordinates of the end of a line (i.e. coordinates of the center of the device  $f_{2j}$ );  $(x_{jn}, y_{jn}, z_{jn})$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, k_j - 1\}$  – coordinates of points of an inflection of a line;  $k_j$  – quantity of rectilinear fragments.

Let's consider conditions which should be executed at tracing of pipelines. We will designate through  $m$ -number of a condition and we will unite all lines for which the condition  $m$  in set  $M^m$  is satisfied.

*Condition 1.* Lines from set  $M^1$  are laid within an industrial premise. Let  $d_j$  – diameter of the pipeline of  $j$ -th technological communications;  $l_j$  – a thickness of isolation of  $j$ -th pipeline.

Then for any  $j \in M^i$  and any  $n = 0, 1, 2, \dots, k_j$  there is

$$\begin{cases} \frac{d_j}{2} + l_j + l_d \leq x_{jn} \leq X_c - l_j - l_d - \frac{d_j}{2}; \\ \frac{d_j}{2} + l_j + l_d \leq y_{jn} \leq Y_c - l_j - l_d - \frac{d_j}{2}; \\ \frac{d_j}{2} + l_l + l_d \leq z_{jn} \leq Z_c - l_j - l_d - \frac{d_j}{2}. \end{cases} \quad (4.1)$$

*Condition 2.* For any point of a inflection  $(x_{jn}, y_{jn}, z_{jn})$ ,  $n = 1, 2, \dots, k_j - 1$  of  $j$ -th line  $j \in M^2$ , there is such number  $\rho$  that:

$$z_{jn} \in [U_{\rho^*}^x, U_{\rho^*}^{x^*}] \cup [U_{\rho^*}^y, U_{\rho^*}^{y^*}]. \quad (4.2)$$

I.e. any point of an inflection of a line is in one of the levels allocated for a lining of lines.

*Condition 3.* We take some horizontal fragment  $(x_{jn}, y_{jn}, z_{jn}; x_{jn+1}, y_{jn+1}, z_{jn+1})$  of a line  $T_j \in M^3$ . Then or  $x_{jn+1} \neq x_{jn}$  (the fragment is parallel to an axis), or  $y_{jn+1} \neq y_{jn}$  (the fragment is parallel to an axis).

$$z_{jn}, z_{jn+1} \in [U_{\rho^*}^x, U_{\rho^*}^{x^*}] \wedge z_{jn}, z_{jn+1} \in [U_{\rho^*}^y, U_{\rho^*}^{y^*}]. \quad (4.3)$$

This condition allows defining level of a fragment of a line depending on its direction.

*Condition 4.* In lines possibility of occurrence of stagnant zones is excluded from set  $M^4$ . We will divide set  $M^4$  into two subsets:  $M_c^4$  – pipelines on which liquids flow;  $M_o^4$  – pipelines for gases. If  $j \in M_c^4$  then the pipeline line shouldn't have local minima; if  $j \in M_o^4$  then the pipeline line shouldn't have local maxima. Hence, for any  $j \in M_c^4$  and any  $n_1, n_2, n_3 \in \{0, 1, 2, \dots, k_j\}$  such that  $n_1 > n_2 > n_3$  that inequalities  $z_{jn_1} - z_{jn_2} > 0, z_{jn_3} - z_{jn_2} > 0$  can't be carried out simultaneously.

This condition we will write down in the form of an inequality:

$$\begin{aligned} z_{j,n_1} - z_{j,n_2} > 0 \wedge z_{j,n_3} - z_{j,n_2} > 0, \forall j \in M^4; \\ \forall n_1, n_2, n_3 \in \left\{ 0, 1, 2, \dots, k_j \right\} : n_1 > n_2 > n_3. \end{aligned} \quad (4.4)$$

*Condition 5.* A condition not crossings of lines.

Let  $j', j'' \in M^5$ . We take any points

$$c'(x_{c'}, y_{c'}, z_{c'}) \in T_{j'}, c''(x_{c''}, y_{c''}, z_{c''}) \in T_{j''}.$$

We will define distance as

$$\rho(c', c'') = \sqrt{(x_{c'} - x_{c''})^2 + (y_{c'} - y_{c''})^2 + (z_{c'} - z_{c''})^2}$$

then the condition 5 can be written down in a kind:

$$\rho(c', c'') \geq \frac{d_{j'} + d_{j''}}{2} + l_{j'} + l_{j''} + l_d, \forall j', j'' \in M^5. \quad (4.5)$$

*Condition 6.* The condition 6 consists that lines from set  $M^6$  aren't crossed with columns of a building construction. Let  $j \in M^6$ . We take any point  $c'(x_{c'}, y_{c'}, z_{c'}) \in T_j$ . The condition 6 can be written down in a kind:

$$\left( \left| \bar{x}^K - x_{c'} \right| \geq \frac{a_j + d_j}{2} + l_j + l_d \right) \vee \left( \left| \bar{x}^K - y_{c'} \right| \geq \frac{b_j + d_j}{2} + l_j + l_d \right). \quad (4.6)$$

*Condition 7.* A condition of not crossings of lines with the placed devices. Let  $j \in M^7$ . We take any point  $c'(x_{c'}, y_{c'}, z_{c'}) \in T_j$ . Let further  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  - any of numbers of the placed devices, excepting devices  $f_{1j}$  and  $f_{2j}$ , and  $S_i$  - width of a zone of service of this device. Then

$$\left( \left| x_i - x_{c'} \right| \geq \frac{\bar{a}_i + d_j}{2} + S_i + l_j + l_d \right) \vee \left( \left| y_i - y_{c'} \right| \geq \frac{b_i + d_j}{2} + S_i + l_j + l_d \right). \quad (4.7)$$

*Condition 8.* On conditions of production zones, forbidden for a lining of pipelines should be provided. Let's designate through  $(x_m, y_m, z_m)$   $m = 1, 2, \dots, k_m$  - coordinates of the centers of such zones;  $(\bar{a}_m, \bar{b}_m, \bar{z}_m)$  - their overall dimensions. Then for all  $j \in H^8$  and any point  $c'(x_{c'}, y_{c'}, z_{c'}) \in T_j$  it is had

$$\left( \left| \bar{x}_m - x_{c'} \right| \geq \frac{\bar{a}_m + d_j}{2} + l_j + l_d \right) \vee \left( \left| \bar{y}_m - y_{c'} \right| \geq \frac{\bar{b}_m + d_j}{2} + l_j + l_d \right) \vee \left( \left| \bar{z}_m - z_{c'} \right| \geq \frac{\bar{c}_m + d_j}{2} + l_j + l_d \right). \quad (4.8)$$

*Condition 9.* This condition is shown by safety precautions to pipelines with explosive, combustible, inflammable and aggressive substances. Let  $M_{\text{ед}}^9$  – set of pipelines on which explosive, combustible, inflammable substances are transported;  $M_{\text{жА}}^9$  – set of pipelines on which acids and other aggressive substances are transported. Let's choose  $M^9 = M_{\text{ед}}^9 \cup M_{\text{жА}}^9$ . The pipelines entering into set  $M^9$  settle down as follows: if the distance between points  $c' \in T_j \in M_{\text{ед}}^9$ ,  $c'' \in T_j \in M_{\text{жА}}^9$  doesn't surpass the set size  $l_{\text{еж}}$ , then  $z_{c'} \geq z_{c''}$ . Thus for any points  $c' \in T_j \in M_{\text{ед}}^9$ ,  $c'' \in T_j \in M_{\text{жА}}^9$  it is had

$$\left( (\rho(c', c'') \leq l_{\text{еж}}) \wedge (z_{c'} \geq z_{c''}) \right) \vee \left( \rho(c', c'') \geq l_{\text{еж}} \right). \quad (4.9)$$

*Condition 10.* The length of the pipelines united in set  $M^{10}$  shouldn't exceed in advance set sizes  $\sigma_j$ . Thus for any  $j \in M^{10}$ :

$$\sum_{n=0}^{k_j} \left( |x_{jn+1} - x_{jn}| + |y_{jn+1} - y_{jn}| + |z_{jn+1} - z_{jn}| \right) \leq \sigma_j. \quad (4.10)$$

As criterion of economic efficiency of the design decision we will consider cost of capital expenses for a lining of pipelines

$$I = \sum_{j=1}^L (S_{1j} \varphi_j + S_{2j} K_j). \quad (4.11)$$

Where  $S_{1j}$  – cost of unit of length of  $j$ -th pipeline;

$$\varphi_j = \sum_{n=0}^{K_j-1} \left( |x_{jn+1} - x_{jn}| + |y_{jn+1} - y_{jn}| + |z_{jn+1} - z_{jn}| \right) m - \text{Length of } j\text{-th}$$

pipeline;  $S_{2j}$  – expenses for technical realization of one turn of the pipeline of  $j$ -th line;  $K_j$  – quantity of turns in  $j$ -th line.



Thus the problem of trace of technological communications can be formulated as follows:

$$\text{To find } T_j = \left( x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}; x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}; \dots; x_{jk_j}, y_{jk_j}, z_{jk_j} \right), j = 1, 2, \dots, L$$

so that conditions (4.1) – (4.10) have been satisfied and the criterion (11) reached a minimum.

The developed model is used by working out of information system of support of design decisions on configuration multiassortment manufactures [3].

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какова необходимость автоматизации трассировки технологических трубопроводов?
2. В чём трудность автоматизации трассировки трубопроводов?
3. Как проверяется адекватность разработанной модели?
4. Какие допущения использованы при формализации задачи и как это отражается на конечном решении?
5. Какие алгоритмы трассировки вы знаете?
6. Как реализуются ограничения модели в системе?

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

1. Egorov, S.J. Automating the layout of equipment in the hangar type workshops. Part 1. Process equipment placing / S.J. Egorov, V.A. Nemtinov, M.S. Gromov // The Chemical industry. – 2003. – N 8. – P. 21 – 28.
2. Egorov, S.J. Automating the layout of equipment in the hangar type workshops. A part 3. Information-graphic system of three-dimensional equipment layout / S.J. Egorov, V.A. Nemtinov, M.S. Gromov // the Chemical industry. – 2003. – N 8. – P. 35 – 39.
3. Automated Information System for industrial object layout decision. Part 1. Analytical and Procedural models. / S.J. Egorov, V.A. Nemtinov, V.G. Mokrozub, I.V. Milovanov // Information technology in designing and manufacture. – 2009. – N 4. – P. 3 – 11.

### МЕТОДИКА РАСЧЁТА И ВЫБОРА МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЁМКОСТНЫХ АППАРАТОВ

В данной главе рассматривается методика автоматизированного расчёта и выбора механических перемешивающих устройств вертикальных ёмкостных аппаратов, разработанная в результате исследования влияния геометрических характеристик корпуса аппарата, физико-химических и теплофизических характеристик перемешиваемой среды, режима перемешивания, условий пригодности вала мешалок и герметизирующей способности его уплотнения, условий теплообмена в аппарате на следующие параметры конструкции перемешивающего устройства:

- тип мешалки, расчётной характеристикой которого при турбулентном режиме перемешивания является коэффициент её гидравлического сопротивления ( $\zeta$ );
- число мешалок на валу устройства ( $z_m$ );
- диаметр мешалки ( $d_m$ );
- частота вращения вала устройства ( $n$ );
- диаметр вала ( $d$ );
- параметры мешалок, используемых для перемешивания при переходном и ламинарном режимах: число горизонтальных траверс рамной и ленточной мешалок ( $n_T$ ), шаг между траверсами ленточной мешалки ( $l_T$ ) и число её лопастей ( $n_L$ ), высота шнековой мешалки ( $H_M$ ) и шаг винтовой линии лопасти ( $t_L$ ).

В качестве основы этого исследования выбрана рекомендованная НИИХИММАШ [2, 3] методика расчёта:

- затрат мощности на перемешивание ( $N$ ) в вертикальном ёмкостном аппарате при турбулентном режиме;
- параметров циркуляции и турбулентной диффузии перемешиваемой среды;
- параметров, характеризующих качество перемешивания различных сред при турбулентном режиме: продолжительности гомогенизации взаимно-растворимых жидкостей, распределения концентрации твёрдой фазы суспензий по высоте и радиусу аппарата, скорости перемещения капель дисперсной фазы и их размера при перемешивании несмешиваемых жидкостей, среднего удельного газосодержания среды и

размера пузырьков при перемешивании газожидкостных систем, продолжительности растворения твёрдого полидисперсного материала;

– мощности перемешивания при ламинарном и переходном режиме;

– параметров циркуляции и продолжительности гомогенизации перемешиваемой среды при ламинарном и переходном режиме;

– диаметра вала перемешивающего устройства (наиболее распространённого жёсткого консольного вала постоянного сечения), для которого выполняются условия виброустойчивости, жёсткости и прочности;

– коэффициента теплоотдачи от перемешиваемой среды при различных конструкциях аппарата и режимах перемешивания;

– теплового потока, который может обеспечить имеющееся в аппарате теплообменное устройство.

Расчёт удельной утечки рабочей среды в зоне уплотнения вала перемешивающего устройства осуществляется согласно [9].

Методика включает математическую постановку, метод и алгоритм решения задачи выбора параметров механического перемешивающего устройства и мотор-редуктора, оптимальных для организации перемешивания конкретной среды в конкретных условиях с точки зрения приведённых затрат.

## 5.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЁТА И ВЫБОРА МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Постановка задачи является модернизацией постановки, представленной в [7], и объединяет случаи ламинарного и турбулентного режима перемешивания, так как на производстве нередко случаи, когда по ходу технологического процесса турбулентный режим становится переходным, а затем и ламинарным.

В качестве критерия оптимальности конструкции механического перемешивающего устройства предлагается использовать сумму амортизации затрат на мешалки, вал и мотор-редуктор, а также затрат на электроэнергию, потребляемую устройством в течение года:

$$Z = Ek [z_M s_M + s_B(j_B, d, L_2) + s_P(t_P, n_P, N_P, M_P)] + s_3(T_P, N), \quad (5.1)$$

где при турбулентном перемешивании стоимость мешалки  $s_M = s_M(\zeta, j_M, d_M)$ ,

– для рамной мешалки при ламинарном перемешивании  $s_M = s_M(j_M, d_M, n_T)$ ,

– для ленточной мешалки  $s_M = s_M(j_M, d_M, n_{л}, n_T, l_T)$ ,

– для шнековой мешалки  $s_M = s_M(j_M, d_M, H_M, t_{л})$ ;

$Ek$  – нормативный коэффициент окупаемости для оборудования (0,15);  $j_m$  – признак материала, из которого изготовлена мешалка (сталь, титановый сплав);  $s_b(j_b, d, L_2)$  – зависимость стоимости вала устройства от материала, из которого он изготовлен ( $j_b$ ), его диаметра и длины ( $L_2$ ), определяемой высотой корпуса аппарата, конструкцией стойки привода (см. [4, 5]) и высотой расположения нижней мешалки над днищем;  $s_p(t_p, n_p, N_p, M_p)$  – зависимость стоимости мотор-редуктора от его типа ( $t_p$ ), частоты вращения выходного вала ( $n_p$ ), мощности электродвигателя ( $N_p$ ) и крутящего момента на выходном валу ( $M_p$ );  $s_3(T_p, N)$  – затраты электроэнергии за время работы перемешивающего устройства в течение года  $T_p$ , которое определяется нормами режима реализации конкретного процесса и календарным планом работы оборудования, [6].

Необходимо выбрать значения параметров механического перемешивающего устройства, при которых функция (5.1) достигает минимума и выполняются нижеследующие ограничения:

1. На параметры мешалки и гидродинамическую обстановку в аппарате:

$$d_m \in Sd_{mk}, \quad (5.2)$$

где  $Sd_{mk}$  – множество значений диаметров стандартных мешалок типа  $k$ , например, для шнековой: 0,4; 0,56; 0,71; 0,8; 1,0; 1,12; 1,25 м;

$$G_{D^*} \leq G_D \leq G_D^*, \quad (5.3)$$

где  $G_{D^*}$ ,  $G_D^*$  – граничные значения критерия гидродинамического подобия (отношения диаметров аппарата и мешалки  $G_D = D/d_m$ ) для мешалки выбранного типа, например, для турбинной  $G_{D^*} = 3$ ,  $G_D^* = 6$ ; для шнековой  $G_{D^*} = 1,8$ ;  $G_D^* = 5$ ;

$$n_T \in \begin{cases} [2, 3, 4] - \text{для рамной мешалки;} \\ [3, 4, 5] - \text{для ленточной мешалки;} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$n_T \in [1, 2]; \quad (5.5)$$

$$H_M \leq H, \quad (5.6)$$

где  $H$  – высота заполнения аппарата;  $H_M$  – высота мешалки (для ленточной  $H_M = (n_T - 1) l_T$ );

$$t_{\text{л}} = \begin{cases} 2l_{\text{т}} - \text{для ленточной мешалки;} \\ k_{\text{ш}} H_{\text{м}} - \text{для шнековой мешалки,} \end{cases} \quad (5.7)$$

где  $k_{\text{ш}} \in [0,25; 0,33; 0,5; 1]$  – возможные значения отношения шага винтовой линии лопасти шнековой мешалки к её высоте;

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{ап}} + M_{\text{вн}}, \quad (5.8)$$

где  $M_{\text{кр}}$ ,  $M_{\text{ап}}$ ,  $M_{\text{вн}}$  – крутящий момент, возникающий при вращении лопастей мешалок, и моменты сил сопротивления вращению, возникающие на стенках корпуса аппарата и внутренних устройствах при турбулентном перемешивании [1, 2];

$$H - h_{\text{м}} > h_{\text{в}}, \text{ если } R_{\text{вн}} \leq 0,1DH, \quad (5.9)$$

где  $h_{\text{в}}$ ,  $h_{\text{м}}$  – глубина центральной воронки, образующейся при турбулентном перемешивании и высота расположения верхней мешалки над дном аппарата;  $R_{\text{вн}}$  – суммарное гидравлическое сопротивление внутренних устройств, установленных в аппарате, [1, 2].

2. На частоту вращения вала перемешивающего устройства и его диаметр:

$$n \in Sn_{\text{р}}, \quad (5.10)$$

где  $Sn_{\text{р}}$  – множество стандартных значений частот вращения выходных валов мотор-редукторов (0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,63; ...; 100; 125; 160; 200; 250; 315  $\text{мин}^{-1}$ );

$$d \in D_{\text{в}}, \quad (5.11)$$

где  $D_{\text{в}}$  – множество стандартных значений диаметров валов механических перемешивающих устройств: 25, 40, 50, 65, 80, 95, 110, 130 мм [3, 4];

$$d \geq \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}}, \quad (5.12)$$

где  $A_1, A_2$  – вспомогательные расчётные комплексы [3];

$$\frac{2\pi n}{\omega_{\text{кр}}^1} \leq \xi, \quad (5.13)$$

где  $\omega_{\text{кр}}^1$ ,  $\xi$  – первая критическая угловая скорость вала и константа условия его виброустойчивости, [3];

$$\Delta_z^Q \leq \Delta_z^{\text{доп}}, \quad (5.14)$$

где  $\Delta_z^Q$ ,  $\Delta_z^{\text{доп}}$  – динамическое смещение вала в опасном по жёсткости сечении и его допускаемое значение [3, 5];

$$n_{\text{п}} \geq n_{\text{п}}^{\text{доп}}, \quad (5.15)$$

где  $n_{\text{п}}$ ,  $n_{\text{п}}^{\text{доп}}$  – запас прочности в опасном сечении вала по прочности и его допускаемое значение [3].

3. На величину удельной утечки рабочей среды в зоне уплотнения вала перемешивающего устройства:

$$U \leq U_{\text{зад}}, \quad (5.16)$$

где  $U$  – утечка рабочей среды в зоне уплотнения, величина которой зависит от типа уплотнения (манжета, сальник, торцовое), диаметра вала и параметров перемешиваемой среды [9];  $U_{\text{зад}}$  – значение удельной утечки, определяемое требуемым классом негерметичности уплотнения вала.

4. На тепловой поток, обеспечиваемый теплообменным устройством аппарата, если перемешиваемая среда нагревается или охлаждается:

$$\Phi^{\text{п}} \geq \Phi, \quad (5.17)$$

где  $\Phi$  – тепловой поток, необходимый для реализации технологического процесса в аппарате;  $\Phi^{\text{п}}$  – значение теплового потока, который может быть обеспечен конкретным теплообменным устройством (рубашкой, змеевиком) в заданных условиях, с учётом соотношений для определения коэффициента теплоотдачи от перемешиваемой среды [1, 2].

5. На характеристики мотор-редуктора:

$$NK_{\text{п}} \leq N_{\text{р}}, \quad (5.18)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент пусковых перегрузок, определяемый значением  $G_D$  и типом установленных в аппарате внутренних устройств:

1,5 – для аппаратов без внутренних устройств при  $G_D > 1,5$ ,

2 – для аппаратов без внутренних устройств при  $G_D \leq 1,5$ ,

1,2 – для аппаратов с отражательными перегородками,

1,3 – для аппаратов с другими внутренними устройствами;

$$M_{\text{р}} \geq \begin{cases} M_{\text{кр}} \rho n^3 d_{\text{м}}^5 & \text{– при турбулентном перемешивании;} \\ N/(2\pi n) & \text{– при ламинарном перемешивании,} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$n_{\text{р}} \geq n, \quad (5.20)$$

где  $n_{\text{р}}$  – частота вращения выходного вала мотор-редуктора;

6. На значения параметров качества перемешивания:

а) для случая турбулентного перемешивания взаимно-растворимых жидкостей

$$\tau_{\eta} \leq \tau_{\text{зад}}, \quad (5.21)$$

где  $\tau_{\eta}$ ,  $\tau_{\text{зад}}$  – расчётное время гомогенизации смеси жидкостей [1, 2] и его заданное значение (например, указанное в регламенте процесса);

б) для случая турбулентного перемешивания малоконцентрированной суспензии (объёмная доля твёрдой фазы не превышает 0,1, массовая – 0,2)

$$\Delta X_{\text{max}} \leq \Delta X_3, \quad (5.22)$$

где  $\Delta X_{\text{max}}$ ,  $\Delta X_3$  – относительная разность концентраций взвешенных частиц по высоте аппарата [1, 2] и её максимально допустимое значение, а если  $R_{\text{вн}} \leq 0,1DH$  и в аппарате устанавливаются мешалки с горизонтальными лопастями (лопастные, пропеллерные, турбинные, дисковые), то

$$X_{\text{cp}R} = \frac{X_{\text{cp}}}{X_R} \geq X_{R3}, \quad (5.23)$$

где  $X_{\text{cp}R}$ ,  $X_{R3}$  – отношение концентрации взвешенных частиц у стенки аппарата к их средней концентрации [1, 2] и его минимально допустимое значение;

в) для случая турбулентного перемешивания высококонцентрированной суспензии

$$\begin{cases} f > f_{\text{кр}}, R_{\text{вн}} \leq 0,1DH; \\ \text{Pe} > \text{Pe}_{\text{пр}}, R_{\text{вн}} > 0,1DH, \end{cases} \quad (5.24)$$

где  $f$ ,  $f_{\text{кр}}$  – частота пульсаций среды у поверхности осадка, скорость которых выше критической, и критическая частота пульсаций, обеспечивающая подъём осадка [1, 2];  $\text{Pe}$ ,  $\text{Pe}_{\text{пр}}$  – число Пекле и приведённое число Пекле, обеспечивающее отсутствие осадка на днище аппарата, [1, 2];

$$\Delta \phi \leq \Delta \phi_{\text{max}}, \quad (5.25)$$

где  $\Delta \phi$ ,  $\Delta \phi_{\text{max}}$  – расчётная степень неоднородности распределения взвешенных частиц по высоте аппарата, [1, 2] и её максимально допустимое значение;

г) для случая турбулентного перемешивания несмешиваемых жидкостей

$$\text{Pe} \leq 0,3, \quad (5.26)$$

где  $\text{Pe}$  – число Пекле, рассчитанное для скорости осаждения (всплывания) капель дисперсной фазы, [1, 2];

$$d_k \leq d_{k \max}, \quad (5.27)$$

где  $d_k$ ,  $d_{k \max}$  – расчётный диаметр капель дисперсной фазы [1, 2] и его максимальное допустимое значение;

д) для случая турбулентного перемешивания газожидкостных систем

$$\varphi \geq \varphi_{\text{зад}}, \quad (5.28)$$

где  $\varphi$ ,  $\varphi_{\text{зад}}$  – среднее удельное газосодержание перемешиваемой среды [1, 2] и заданная объёмная доля газовой фазы в аппарате;

$$d_{\text{п}} \leq d_{\text{п max}}, \quad (5.29)$$

где  $d_{\text{п}}$ ,  $d_{\text{п max}}$  – расчётный диаметр пузырьков газовой фазы [1, 2] и его максимальное допустимое значение;

е) для случая растворения частиц полидисперсной твёрдой фазы при турбулентном перемешивании можно использовать одно из двух ограничений:

$$\max_i \{ \tau_{\text{п}i} \} \leq \tau_{\text{зад}}, \quad (5.30)$$

где  $\tau_{\text{п}i}$ ,  $\tau_{\text{зад}}$  – расчётное время полного растворения частиц  $i$ -й фракции твёрдой фазы [1, 2] и заданная продолжительность её растворения, либо

$$X_{\text{п}} \leq X_{\text{п max}}, \quad (5.31)$$

где  $X_{\text{п}}$ ,  $X_{\text{п max}}$  – расчётная массовая концентрация частиц твёрдой фазы, не растворившихся за время  $\tau_{\text{зад}}$  [1, 2] и её максимально допустимое значение;

ж) на время гомогенизации среды при ламинарном перемешивании

$$\tau_{\eta} \leq \tau_{\text{зад}}, \quad (5.32)$$

где расчётное время гомогенизации ( $\tau_{\eta}$ ) определяется с использованием значений параметров циркуляции перемешиваемой среды при ламинарном режиме [1, 2].

Очевидно, что ограничения (5.2) – (5.20) являются общими для процессов перемешивания любых сред, а из ограничений (5.21) – (5.32) необходимо выбирать те, которые соответствуют процессу перемешивания конкретной среды.

Здесь необходимо отметить:

1. Если по ходу реализации одного и того же процесса режим перемешивания может измениться (с турбулентного на переходный или ламинарный), то возможными типами мешалок являются только якорная и рамная, а при решении задачи следует учитывать необходимые ограничения из числа (5.2) – (5.9), (5.19), (5.21) – (5.32).



2. В течение периода  $T_n$  рассматриваемый аппарат может участвовать в переработке партий нескольких продуктов и осуществлять различные стадии их синтеза, поэтому постановка задачи выбора конструкции перемешивающего устройства такого аппарата может включать несколько наборов ограничений из числа (5.2) – (5.9), (5.19), (5.21) – (5.32), различных для разных периодов его эксплуатации.

## 5.2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСЧЁТА И ВЫБОРА МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Задача (5.1) – (5.32) относится к классу задач дискретной оптимизации, поскольку значения определяемых параметров конструкции механического перемешивающего устройства вертикального ёмкостного аппарата выбираются из числа стандартных. Число стандартных значений диаметров валов перемешивающих устройств, параметров конструкций стандартных мешалок и мотор-редукторов невелико, поэтому предлагаемый метод решения задачи основан на стратегии перебора:

а) перебор возможных комбинаций типов мешалок, частот их вращения и стандартных значений параметров их конструкции, для каждой из которых осуществляется расчёт значения центростремительного критерия Рейнольдса:

$$Re_{ц} = \frac{nd_M^2}{\nu},$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость перемешиваемой среды, и определение режима перемешивания ( $Re_{ц} > 1000$  – турбулентный,  $Re_{ц} \leq 80$  – ламинарный,  $80 < Re_{ц} \leq 1000$  – переходный), проверка выполнения необходимых ограничений из числа (5.2) – (5.10), а также ограничений на значения параметров качества перемешивания соответствующей среды из числа (5.21) – (5.32);

б) при положительном результате проверки соответствующая комбинация параметров мешалки дополняется минимальным стандартным значением  $d$ , удовлетворяющим ограничениям (5.11) – (5.15);

в) при необходимости для рассматриваемой комбинации параметров перемешивающего устройства проверяется выполнение условия (5.16) пригодности уплотнительного устройства вала устройства и условия (5.17) пригодности теплообменного устройства аппарата;

г) из всех комбинаций типа мешалки, значений параметров её конструкции и диаметра вала привода, удовлетворяющих всем ограничениям, выбирается оптимальная – по минимальному значению критерия (5.1) без учёта стоимости мотор-редуктора;

д) для оптимальной комбинации осуществляется подбор наименее дорогостоящего из серийно выпускаемых мотор-редукторов, для которых выполняются условия (5.19) – (5.21).

Алгоритм решения задачи предусматривает реализацию нескольких вложенных циклов перебора значений параметров механического перемешивающего устройства согласно (5.2), (5.4), (5.5), (5.7), (5.10), (5.11), проверку выполнения ограничений (5.3), (5.6), (5.8), (5.9), (5.12) – (5.20), а также тех ограничений из числа (5.21) – (5.32), которые соответствуют реализуемому процессу.

Перебор типов мешалок осуществляется в следующем порядке: мешалки с горизонтальными лопастями, якорные, рамные мешалки, мешалки для ламинарного перемешивания. В цикле перебора стандартных значений диаметров мешалки фиксированного типа рассчитывается значение критерия гидродинамического подобия  $G_D = D/d_m$  и проверяется выполнение условия (5.3). В цикле перебора стандартных значений частот вращения валов перемешивающих устройств рассчитываются значения центробежного критерия Рейнольдса и определяется режим перемешивания. При  $Re_{ц} > 1000$  блокируется выбор ленточных и шнековых мешалок, в противном случае – мешалок с горизонтальными лопастями.

В ситуации  $Re_{ц} > 1000$  осуществляется перебор числа мешалок на валу перемешивающего устройства ( $z_m = 1, \dots, 5$ ), если это мешалка с горизонтальными лопастями, а для якорных и рамных мешалок принимается  $z_m = 1$ . Вводятся характеристики внутренних устройств аппарата (труб, змеевиков, отражателей и т.п.). Рассчитывается гидравлическое сопротивление каждого устройства [1, 2] и их суммарное значение  $R_{вн}$ . Проверяется выполнение условия  $R_{вн} \leq 0,1DH$ . При выполнении этого условия уравнение (5.8) решается методом бисекции [8] относительно параметра профиля окружной скорости перемешиваемой среды  $\psi_1$ , проверяется выполнение условия (5.9). Если же  $R_{вн} > 0,1DH$ , то уравнение (5.8) составляется и решается тем же методом относительно осредненного значения окружной скорости перемешиваемой среды  $u_{ср}$ .

Для каждой приемлемой комбинации типа мешалки и значений  $d_m, n, z_m$  осуществляется расчёт значений параметров качества перемешивания конкретной среды и проверка выполнения соответствующих ограничений. При выполнении ограничений в качестве возможной конструкции перемешивающего устройства запоминается:

– при турбулентном перемешивании, а также ламинарном и переходном режиме перемешивания якорной мешалкой – комбинация типа мешалки, значений  $d_m$  и  $n$ , числа мешалок  $z_m$ ;

- при ламинарном и переходном режиме перемешивания рамной мешалкой – комбинация значений  $d_m$ ,  $n$  и числа траверс  $n_T$ ;
- при ламинарном и переходном режиме перемешивания ленточной мешалкой – комбинация значений  $d_m$ ,  $n$ ,  $n_T$ , числа лопастей  $n_L$  диаметра вала  $d$  и шага между траверсами  $l_T$ ;
- при ламинарном и переходном режиме перемешивания шнековой мешалкой – комбинация значений  $d_m$ ,  $n$ ,  $d$ , шага винтовой линии лопасти  $t_L$ , и высоты мешалки  $H_m$ .

Для этой конструкции рассчитываются затраты мощности на перемешивание  $N$  и стоимость мешалки  $s_m$  как функция её массы и материала, из которого она изготовлена. При турбулентном перемешивании и использовании для ламинарного перемешивания якорной или рамной мешалки выбирается минимальный стандартный диаметр вала перемешивающего устройства  $d$ , удовлетворяющий условию (5.12). Для ленточной и шнековой мешалки проверяется выполнение этого условия для значения  $d$ , являющегося параметром рассматриваемой конструкции перемешивающего устройства. Для выбранного значения  $d$  проверяется выполнение условий виброустойчивости (5.13), жёсткости (5.14) и прочности вала (5.15). Если все они выполняются, определяется стоимость вала  $s_b$  как функция его длины, диаметра и материала.

Если проверка герметизирующей способности уплотнения вала необходима, определяется величина удельной утечки рабочей среды в зоне уплотнения  $U$  [9] и проверяется выполнение условия (5.16). Если в аппарате осуществляется теплообмен, определяется коэффициент теплоотдачи от перемешиваемой среды  $\alpha$ , коэффициент теплоотдачи от теплоносителя (хладагента)  $\alpha_T$  [1, 2] и средняя разность температур  $\Delta t_{cp}$  рассчитывается значение теплового потока  $\Phi^P$ , который может быть обеспечен конкретным теплообменным устройством в заданных условиях и проверяется выполнение ограничения (5.17). При выполнении всех ограничений производится расчёт затрат электроэнергии за время  $T_n$  работы перемешивающего устройства рассматриваемой конструкции в течение года  $s_3(T_n, N)$ , а затем – расчёт значения критерия оптимальности (5.1) без учёта стоимости мотор-редуктора. Минимальное значение критерия и соответствующие ему параметры перемешивающего устройства запоминаются.

По окончании перебора всех возможных комбинаций типов мешалок, стандартных значений частот вращения их валов и параметров конструкции проверяется наличие хотя бы одной комбинации, характеризующей допустимую конструкцию перемешивающего устройства. Если таких комбинаций нет, необходимо несколько ослабить ограничения из

числа (5.16), (5.21) – (5.32), чтобы понять причину отсутствия допустимых решений задачи и соответственно изменить исходные данные.

Для комбинации параметров конструкции перемешивающего устройства, которой соответствует минимум критерия (5.1) без учёта стоимости мотор-редуктора, определяются типоразмеры всех стандартных мотор-редукторов, параметры которых (частота вращения выходного вала  $n_p$ , крутящий момент на выходном валу  $M_p$  и мощность электродвигателя  $N_p$ ) удовлетворяют ограничениям (5.18) – (5.20). Из всех подходящих выбирается мотор-редуктор минимальной стоимости.

Алгоритм предусматривает возможность ввода фиксированного значения любого параметра конструкции перемешивающего устройства и тогда перебор его стандартных значений не производится.

### 5.3. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В качестве примера применения предлагаемой методики рассмотрим задачу подбора наиболее эффективного перемешивающего устройства для аппарата, где осуществляется химическая реакция получения сульфаминовой кислоты из олеума (25%) и карбамида, загружаемого в аппарат порциями, размер которых уменьшается от 20% общей массы в начале процесса до 2% – в конце, т.е. можно считать, что в аппарате перемешивается суспензия.

Вначале вязкость перемешиваемой среды невелика и режим перемешивания является турбулентным, а после предпоследней загрузки карбамида вязкость среды увеличивается настолько, что режим перемешивания становится переходным. Задача решается для максимальной вязкости перемешиваемой среды, при которой режим перемешивания ещё остаётся турбулентным, а затем – для вязкости среды в самом конце процесса, когда режим перемешивания приближается к ламинарному, причём ламинарный режим рассматривается только для конструкций перемешивающего устройства, которые оказались приемлемыми при турбулентном режиме.

В данном случае подходящими для организации перемешивания являются только якорные и рамные мешалки, так как только эти два типа используются для перемешивания как при турбулентном, так и при ламинарном режиме [1, 2].

Исходные данные для решения задачи:

- внутренний диаметр аппарата  $D = 1,8$  м;
- высота заполнения аппарата  $H = 1,3$  м (в процессе загрузки карбамида изменяется в пределах 1,25...1,35 м);

- внутренние устройства – труба перекачки;
- высота погруженной части трубы  $h_t = 1,3$  м;
- внешний диаметр трубы  $d_t = 0,089$  м;
- радиус расположения трубы  $r_t = 0,85$  м;
- максимальная динамическая вязкость перемешиваемой среды при турбулентном перемешивании  $\mu_t = 1$  Па·с;
- плотность жидкой фазы перемешиваемой среды  $\rho_{ж} = 1935$  кг/м<sup>3</sup>;
- массовая доля твёрдой фазы  $X_{cp} = 0,008$ , т.е. суспензия мало-концентрированная;
- средний размер частиц твёрдой фазы  $d_{cp} = 1,25$  мм;
- плотность твёрдой фазы  $\rho_t = 1112$  кг/м<sup>3</sup>;
- максимально допустимое значения относительной разности концентраций взвешенных частиц по высоте аппарата  $\Delta X_3 = 0,05$ ;
- вал перемешивающего устройства жёсткий, консольный, постоянного сечения, изготовлен из стали 16ГС, эмалирован;
- длина вала  $L_2 = 3,75$  м, длина пролёта  $L = 0,9$  м;
- координата опасного сечения по прочности в пролёте  $z_1 = 0,9$  м;
- координата опасного сечения по жёсткости на консоли  $z_2 = 0,41$  м;
- тип уплотнения вала – торцовое типа ТД, способное обеспечить класс негерметичности 1-1, [9];
- необходимая температура перемешиваемой среды  $t_c = 70$  °С;
- тепловой поток, необходимый для отбора тепловых эффектов процесса и поддержания заданной температуры  $\Phi = 81,33$  кВт;
- средний коэффициент теплопроводности среды при температуре  $t_c$   $\lambda = 0,65$  Вт/(м·К);
- средняя теплоёмкость среды при температуре  $t_c$   $c = 1270$  Дж/(кг·К);
- теплообменное устройство – цилиндрическая рубашка;
- высота рубашки  $H_t = 1,5$  м;
- площадь поверхности теплообмена  $F = 8,7$  м<sup>2</sup>;
- хладагент – обратная вода;
- начальная температура воды  $t_1 = 20$  °С;
- конечная температура воды  $t_2 = 26$  °С;
- материал корпуса аппарата – сталь 16ГС, эмалированная;
- толщина стенки корпуса аппарата  $\delta_{ст} = 16$  мм;
- время работы перемешивающего устройства в течение года  $T_n = 2150$  ч;
- динамическая вязкость среды при перемешивании в переходном режиме  $\mu_n = 17,5$  Па·с;

– требуемая степень неоднородности перемешиваемой среды при переходном режиме  $\eta = 0,9$ ;

– максимально допустимая длительность гомогенизации среды при переходном режиме  $\tau_{\text{зад}} = 1$  ч;

В рассматриваемой ситуации при турбулентном перемешивании выполнение условия  $R_{\text{вн}} = \zeta_{\text{т}} h_{\text{т}} d_{\text{т}} < 0,1DH$  гарантировано. Критерий оптимальности конструкции перемешивающего устройства рассматриваемого аппарата имеет вид

$$Z = Ek [s_{\text{м}} + s_{\text{в}}(j_{\text{в}}, d, L_2) + s_{\text{р}}(t_{\text{р}}, n_{\text{р}}, N_{\text{р}}, M_{\text{р}})] + s_{\text{з}}(T_{\text{п}}, N),$$

где стоимость якорной мешалки  $s_{\text{м}} = s_{\text{м}}(j_{\text{м}}, d_{\text{м}})$ , стоимость рамной мешалки  $s_{\text{м}} = s_{\text{м}}(j_{\text{м}}, d_{\text{м}}, n_{\text{т}})$ .

Необходимо определить тип мешалки (якорная или рамная), диаметр мешалки  $d_{\text{м}}$ , частоту вращения  $n$  вала устройства и его диаметр  $d$ , число горизонтальных траверс рамной мешалки  $n_{\text{т}}$ , при которых критерий  $Z$  достигает минимума и выполняются ограничения:

1) на параметры мешалки и гидродинамическую обстановку:

$$d_{\text{м}} \in SdM_k,$$

$$G_{D^*} \leq G_D \leq G_D^*,$$

$$\begin{cases} M_{\text{кр}} = M_{\text{ап}} + M_{\text{вн}}; \\ H - h_{\text{м}} > h_{\text{в}}, \end{cases} \text{ если } \text{Re}_{\text{ц}} = \frac{nd_{\text{м}}^2}{\nu} \geq 1000,$$

$$n_{\text{т}} \in [2, 3, 4] \text{ – для рамной мешалки ;}$$

2) на частоту вращения вала перемешивающего устройства и его диаметр:

$$n \in Sn_{\text{р}};$$

$$d \in D_{\text{в}};$$

$$d \geq \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}};$$

$$\frac{2\pi n}{\omega_{\text{кр}}^1} \leq \xi;$$

$$\Delta_z^Q \leq \Delta_z^{\text{доп}};$$

$$n_{\text{п}} \geq n_{\text{п}}^{\text{доп}};$$

3) на удельную утечку рабочей среды в зоне уплотнения вала:

$$U \leq 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{м} \cdot \text{с};$$

4) на тепловой поток, обеспечиваемый теплообменным устройством аппарата:

$$\Phi^p \geq \Phi;$$

5) на характеристики мотор-редуктора:

$$NK_n \leq N_p,$$

где  $K_n = 1,3$  для турбулентного и  $K_n = 2,0$  для переходного режима перемешивания;

$$M_p \geq \begin{cases} M_{кр} \rho n^3 d_M^5, & \text{если } Re_{ц} > 1000; \\ \frac{N}{2\pi n}, & \text{если } Re_{ц} \leq 1000; \end{cases}$$

$$n_p \geq n;$$

6) на значение относительной разности концентраций взвешенных частиц по высоте аппарата при турбулентном перемешивании:

$$\Delta X_{\max} \leq \Delta X_3;$$

7) на продолжительность гомогенизации перемешиваемой среды при переходном режиме:

$$\tau_{\eta} \leq \tau_{\text{зад}}.$$

Результаты решения этой задачи для турбулентного режима перемешивания приведены в табл. 5.1.

### 5.1. Оптимальные конструкции перемешивающего устройства для турбулентного перемешивания

Тип мешалки	Количество возможных конструкций	Оптимальная конструкция	Заграты мощности на перемешивание $N$ , Вт	Приведённые заграты на устройство (без мотор-редуктора) $Z$ , р.
Якорная	8	$d_M = 1,4 \text{ м}; n = 45 \text{ мин}^{-1}; d = 0,08 \text{ м}$	2331	19 150
Рамная	6	$d_M = 1,6 \text{ м}; n = 31,5 \text{ мин}^{-1}; d = 0,08 \text{ м}$	2115	21 110

Решение задачи при переходном режиме для оптимальной конструкции перемешивающего устройства с якорной мешалкой показало, что эта конструкция является приемлемой, так как затраты мощности на перемешивание составили 1812 Вт, а продолжительность гомогенизации перемешиваемой среды  $\tau_1 = 2685$  с, т.е. меньше  $\tau_{\text{зад}}$ . Удельная утечка рабочей среды в зоне уплотнения не превышает  $4,87 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/м/с.

Что касается характеристик мотор-редуктора для оптимальной конструкции перемешивающего устройства, то необходимый крутящий момент при турбулентном режиме составил 445,4 Н·м, а при ламинарном – 332,2 Н·м. Мощность электродвигателя, необходимая для турбулентного режима перемешивания равна 3,03 кВт, а для переходного – 3,62 кВт. Следовательно, частота вращения выходного вала мотор-редуктора должна быть равна 45 мин<sup>-1</sup>, крутящий момента выходном валу превышать 445,4 Н·м, а мощность электродвигателя – превышать 3,62 кВт. Подходящими являются шести типоразмеров мотор-редуктора МПО-2М-15. Типоразмер наиболее подходящего – МПО-2М-15-32,1-5,5/45 стоимостью 31 560 р. (в ценах 2002 г.).

Результаты решения этой задачи внедрены в действующее производство сульфаминовой кислоты (цех № 33) ОАО "Пигмент", г. Тамбов.

#### 5.4. СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЁМКОСТНЫХ АППАРАТОВ

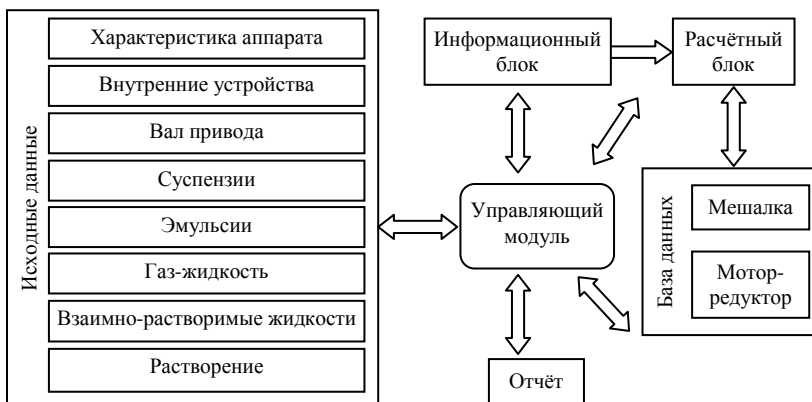
Система MixerOptimization, разработанная в среде Visual Basic, реализует алгоритм решения задачи определения оптимальных конструкций механических перемешивающих устройств ёмкостных аппаратов.

##### 5.4.1. Структура и состав системы

Структура и состав системы представлены на рис. 5.1. Главным звеном, координирующим её работу, является управляющий модуль. Он осуществляет следующие функции:

- проверку корректности исходных данных и указание на ошибки;
- выбор методики расчёта затрат мощности на перемешивание с учётом значения центробежного критерия Рейнольдса и суммарного гидравлического сопротивления внутренних устройств;
- проверку корректности исходных данных и указание на ошибки;
- выбор методики расчёта затрат мощности на перемешивание с учётом значения центробежного критерия Рейнольдса и суммарного гидравлического сопротивления внутренних устройств;





**Рис. 5.1. Структура и состав системы MixerOptimization**

- выбор методики расчёта параметров качества перемешивания конкретной среды;
- проверку выполнения ограничений на значения параметров качества перемешивания для различных сред;
- выбор методики расчёта вала перемешивающего устройства в зависимости от его конструкции (консольный, однопролётный);
- проверку возможности обеспечения удельной утечки рабочей среды в пределах требуемого класса негерметичности уплотнения вала;
- проверку возможности обеспечения теплового потока, необходимого для реализации процесса;
- учёт (по указанию пользователя) дополнительных ограничений на конструкцию механического перемешивающего устройства, таких как заданное число мешалок, фиксированный тип мешалки, частота вращения вала и т.п.;
- обработку аварийных ситуаций, возникающих в процессе работы системы, и выдачу рекомендаций по их устранению;
- управление взаимодействием расчётного блока с информационным блоком и базой данных;
- обеспечение передачи данных в блок создания итогового отчёта и его вывод на экран.

Модуль "Исходные данные" обеспечивает ввод информации об аппарате, перемешиваемой среде и требуемых условиях реализации процесса, а также, при необходимости, модификацию исходных данных, к которым относятся:

- геометрические размеры аппарата – диаметр и высота его заполнения перемешиваемой средой;

- физические свойства и параметры перемешиваемых сред – состав, плотность, динамическая или кинематическая вязкость компонентов и т.п.;
  - типы и геометрические размеры установленных в аппарате внутренних устройств (трубы, отражательные перегородки, змеевик и т.д.);
  - конструкция и геометрические размеры вала устройства, координаты опасных сечений по жёсткости и прочности;
  - требуемые значения параметров качества перемешивания;
  - тепловой поток, который необходимо обеспечить;
  - время работы устройства в течение календарного года;
  - фиксированные параметры перемешивающего устройства (при наличии дополнительных ограничений на его конструкцию, например заданный тип мешалки, их число на валу, частота вращения вала и т.п.).
- Окна ввода данных об аппарате, перемешиваемой среде и внутренних устройствах представлены на рис. 5.2.

**Исходные данные для выбора конструкции привода МПУ**

Диаметр аппарата, м .....	2
Высота заполнения аппарата средой, м .....	3,5
Уровень заполнения аппарата средой	<input type="radio"/> Полностью заполнен <input checked="" type="radio"/> Со свободной поверхностью
Плотность жидкой фазы суспензии, кг/м.куб.....	1160
Плотность материала твёрдой фазы, кг/м.куб.....	1720
Кинематическая вязкость суспензии, 10 <sup>-6</sup> м.кв./с.....	4,24
Средний диаметр взвешенных частиц, м.....	0,000008
Концентрация твёрдой фазы в суспензии (масс.доли) .....	0,05
<b>Время работы МПУ, (сут. в год) .....</b>	<b>330</b>

**Параметры качества перемешивания**

Относительная разность концентраций взвешенных частиц по высоте аппарата не более .....	0,05
Отношение средней концентрации к концентрации на радиусе не менее .....	0,85

а)

<b>Внутренние устройства</b>		Ok	
<input checked="" type="checkbox"/> Одиночная труба			
<input type="checkbox"/> Одиночная пластина			
<input type="checkbox"/> Отражательные перегородки			
<input type="checkbox"/> Отражатели			
<input type="checkbox"/> Змеевики			
<b>Одиночная труба</b>			
наружный диаметр трубы, м	высота погрузочной части трубы, м	число труб	радиус расположения трубы, м
0,108	3,5	1	0,9

б)

**Рис. 5.2. Окна ввода исходных данных:**

а – параметры аппарата и перемешиваемой среды (малоцентрированная суспензия); б – информация о внутренних устройствах

Модуль "Расчётный блок" осуществляет:

- расчёт значения центростремительного критерия Рейнольдса;
- расчёт суммарного гидравлического сопротивления внутренних устройств;
- расчёт глубины центральной воронки;
- расчёт мощности, затрачиваемой на перемешивание;
- расчёт значений параметров качества перемешивания конкретной среды;
- расчёт необходимого диаметра вала перемешивающего устройства;
- расчёт удельной утечки рабочей среды в зоне уплотнения вала;
- расчёт коэффициентов теплоотдачи от перемешиваемой среды и теплоносителя, коэффициента теплопередачи и значения теплового потока, который может быть обеспечен конкретным теплообменным устройством в заданных условиях;
- перебор стандартных значений параметров механического перемешивающего устройства, которые не зафиксированы пользователем;
- взаимодействие с базой данных посредством SQL-запросов;
- расчёт значения критерия для конкретной конструкции устройства.

Модуль "Информационный блок" обеспечивает пользователя и расчётный блок информацией справочного характера:

- порядок определения гидравлического сопротивления наиболее часто встречающихся внутренних устройств;
- значения необходимых для расчётов характеристик наиболее распространённых мешалок;
- значения коэффициентов трения различных сальниковых набивок о поверхность вала перемешивающего устройства;
- формулы для расчёта необходимых физических свойств веществ для случаев перемешивания различных сред;
- зависимости значений физико-механических свойств металлов, наиболее часто используемых для изготовления валов механических мешалок, теплофизических параметров некоторых рабочих сред, характерных для многоассортиментных химических производств, а также наиболее часто применяемых теплоносителей и хладагентов от температуры.

Модуль "Отчёт" формирует текстовый файл с подробным протоколом работы системы, который включает:

- исходные данные (как введённые пользователем, так и полученные в результате работы информационного блока);

- значение центробежного критерия Рейнольдса и указание на режим перемешивания;
- при турбулентном перемешивании результаты расчёта гидравлического сопротивления внутренних устройств и глубины воронки;

### Результаты расчёта

psi1=0,53653    Mkr=0,2132

**Стандартные значения параметров конструкции привода мешалки**

№	Коеф-т сопр-я	Стандартные значения число мешалок	диаметр мешалки	число об/мин
1	1,28	1	1,6	63
2	1,28	1	1,6	80
3	1,28	1	1,7	40
4	1,28	1	1,7	50
5	1,28	1	1,7	63
6	1,28	1	1,7	80
7	1,28	1	1,8	31,5
8	1,28	1	1,8	40
9	1,28	1	1,8	50
10	1,28	1	1,8	63

**Расчет оптимальных параметров перемешивающего устройства**

Тип мешалки: рамная

Кoeffициент сопротивления: 1,28

Число мешалок: Z<sub>M</sub>=1

Диаметр мешалки, м: d<sub>M</sub>=1,8

Частота вращения, об/мин: n=31,5

Потребляемая мощность, Вт: N=2660,542

Стоимость привода (без мотор-редуктора), руб.: Z=51574,37563890

Крутящий момент, Нм: M<sub>Kp</sub> = 812,0842

Время окончания расчета: 9:47:48

Время, затраченное на расчет: 0:00:07

**Подбор мотор-редуктора**

**Оптимальная конструкция МПУ определенного типа**

Тип мешалки	Диаметр мешалки	Частота вращения	Мощность, Вт	Стоимость, руб.
Шестиплостная	0	0	0	0
Рамная	1,8	31,5	2660,542	51574,38

а)

Выбор редуктора по числу оборотов

Число оборотов, 1/с: 31,5

Обороты в мин	Тип	Типоразмер	Исполнение	Передач число	Вых моме
32	МПО-2-18	МПО-2-18-45,5-7,5 / 32	В, ВК	45,5	2037
32	ПЗМ-40	ПЗМ-40-0,75/32	П/ВК	28	220
32	ПЗМ-40	ПЗМ-40-0,75/32	П/ВК	28	220
??	ПЗМ-50	ПЗМ-50-1,6/??	П/ВК	??	460

Выбор редуктора по крутящему моменту

Крутящий момент, Нм: 812,0842

Типоразмер	Исполнение	Передач число	Вых момент Нм	ЭД типоразмер	ЭД мощн
МПО-2-18-45,5-11 / 32	В, ВК	45,5	2987	АИРТ 32М4	11
МПО-2-18-45,5-7,5 / 32	В, ВК	45,5	2037	АИРТ 32М4	7,5
ПЗМ-65-3,0/32	П/ВК	28,7	900	АИРТ12МА6	3

б)

**Рис. 5.3. Окна вывода результатов работы системы:**  
а – выбор оптимальных параметров МПУ; б – выбор мотор-редуктора

- результат расчёта мощности перемешивания;
- результаты расчёта значений параметров качества перемешивания конкретной среды;
- допустимые конструкции устройства (тип, число, частота вращения и параметры конструкции мешалок), способные обеспечить требуемое качество перемешивания;
- результаты определения диаметра вала для допустимых конструкций устройства;
- результаты проверки пригодности выбранного уплотнения вала с точки зрения значения утечки рабочей среды;
- результаты проверки пригодности теплообменного устройства аппарата для обеспечения требуемого теплового потока;
- оптимальную конструкцию механического перемешивающего устройства и типоразмеры мотор-редукторов, подходящих для неё с точки зрения обеспечения частоты вращения выходного вала, крутящего момента, приложенного к жидкости при вращении лопастей мешалки, и мощности электродвигателя;
- конструкцию привода и тип мотор-редуктора, обеспечивающие минимум критерия.

Рисунок 5.3 иллюстрирует форму представления основных результатов работы системы.

#### **5.4.2. Информационное обеспечение системы**

База данных системы содержит значения характеристик наиболее распространённых механических мешалок, применяемых в промышленных аппаратах (лопастная, трёхлопастная, фрезерная, турбинная открытая, турбинная закрытая, рамная, якорная, ленточная, шнековая), а также характеристик серийно выпускаемых мотор-редукторов и приводов (МРВ-02, МРВ-04, МПО-1, МПО-2, МР-1, МР-2, МР-3, ПЭМ, ПЭМ 1А, ПЭМ 2). База разработана на основе документов [17, 18] и каталога продукции ЗАО "Завод Тамбовполимермаш".

Для мешалок указанных типов в базе их характеристик содержатся значения следующих параметров:

- коэффициент гидравлического сопротивления;
- коэффициент расхода;
- интервал допускаемых значений критерия гидродинамического подобия  $G_D$ ;
- диаметры серийно выпускаемых мешалок и соответствующие значения их массы (для стальных мешалок).

Для каждого из упомянутых мотор-редукторов и приводов в базе их характеристик содержится следующая информация):

- типоразмер устройства;
- частота вращения выходного вала (в 1/мин);
- момент на выходном валу (Н·м);
- типоразмер электродвигателя;
- мощность электродвигателя (КВт);
- стоимость устройства (р. в ценах 2002 г.).

С помощью данной системы определены конструкции перемешивающих устройств ряда аппаратов Тамбовского ОАО "Пигмент" (см. раздел 2.3):

- сульфуратора R2407 (цех № 33, производство 4-толуидин-3-сульфоната);
- реактора R2506 (цех № 32, производство лака ПФ-060);
- реактора K480Ж (цех № 20, производство отбеливателя ОБ);
- реакторы 1b, 1c, 1d (цех № 19, производство клея ПВА);
- реакторы производства сульфаминовой кислоты (цех № 33).

Таким образом, методика выбора оптимальной конструкции механического перемешивающего устройства вертикального ёмкостного аппарата реализована в виде системы MixerOptimization, результаты работы которой использованы при реконструкции реальных промышленных аппаратов.

Система успешно прошла процедуру государственной регистрации.

## 5.5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ПО РАСЧЁТУ И ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Для заданной конструкции механического перемешивающего устройства определить затраты мощности на перемешивание и значения параметров качества перемешивания при реализации указанного процесса. Определить оптимальную конструкцию устройства для заданных значений параметров качества перемешивания и подобрать стандартный мотор-редуктор с помощью информационной системы MixerOptimization.

*Замечание.* При определении затрат мощности на перемешивание и значений параметров качества перемешивания для заданной конструкции механического перемешивающего устройства необходимо найти значение характеристики перемешиваемой среды, записанной курсивом. При определении оптимальной конструкции устройства считать записанные в табл. 5.2 – 5.7 значения этих характеристик заданными.











































## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как определяются затраты на электроэнергию, потребляемую механическим перемешивающим устройством в течение года?
2. Какова максимально допустимая глубина центральной воронки при механическом перемешивании?
3. Какой метод оптимизации рекомендуется применять для решения задачи расчёта и выбора механического перемешивающего устройства? Почему?
4. По какой причине режим перемешивания при реализации технологического процесса может измениться с турбулентного на переходный и ламинарный, если частота вращения мешалки неизменна?
5. Почему предлагаемый метод решения задачи расчёта и выбора механического перемешивающего устройства предусматривает выбор мотор-редуктора только для оптимальной конструкции устройства?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

1. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
2. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчёта ; Введ. с 01.01.1986. – Л. : РТП ЛенНИИХиммаша, 1985. – 257 с.
3. Руководящий технический материал РДРТМ 26-01-72-82: Валы вертикальных аппаратов с перемешивающими устройствами, методы расчёта; Введ. с 01.07.1983. – Л. : РТП ЛенНИИХиммаша, 1982. – 140 с.
4. Васильцов, Э.А. Аппараты для перемешивания жидких сред : справ. пособие / Э.А. Васильцов, В.Г. Ушаков. – Л. : Машиностроение, 1979. – 272 с.
5. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчёта химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А.С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой. – 2002. – Т. 1. – 852 с.
6. Малыгин, Е.Н. Календарное планирование работы многоассортиментных производств / Е.Н. Малыгин, Т.А. Фролова, М.Н. Красноярский // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32, № 5. – С. 568 – 576.
7. Малыгин, Е.Н. Выбор конструкции механического перемешивающего устройства вертикального ёмкостного аппарата / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Н.Н. Афанасьева // Химическая промышленность. – 2004. – № 5. – С. 253 – 259.
8. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 432 с.
9. Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника : справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев. – М. : Машиностроение, 1994. – 448 с.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПРЕСС-ФОРМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ИНДУКЦИОННОМ ВУЛКАНИЗАЦИОННОМ ПРЕССЕ**

Производство резиновых изделий, согласно данным Центра развития Национального исследовательского университета – Высшей школы экономики [1], имеет устойчивую тенденцию к увеличению. Например, индекс промышленного производства резиновых и пластмассовых изделий в ноябре 2010 г. относительно декабря 2009 г. составил 138,4%. В связи с этим возникает необходимость создания нового и усовершенствования старого оборудования, обладающего более высокой производительностью и осуществляющего выпуск качественной продукции с наименьшим процентом брака.

Наиболее часто резинотехнические изделия (РТИ) изготавливаются методом горячего прессования, который можно представить в виде последовательности следующих операций: вулканизуемая смесь помещается в матрицу пресс-формы, прижимается пуансоном и нагревается при заданных температуре и давлении. Регулирование температуры осуществляется по двухпозиционному закону на основе измерения температуры с помощью контрольных термопар. Широко применяемым оборудованием для горячего прессования являются гидравлические вулканизационные прессы с индукционным способом нагрева плит.

Следует отметить, что 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 плиты, к которым предъявляются особые требования.

В данной работе на примере моделирования процесса нагрева пресс-формы для производства резиновых уплотнений на вулканизационном прессе предпринята попытка проанализировать температурные особенности этого способа изготовления РТИ. На основе результатов анализа сформулирована задача проектирования нагревательных плит прессов для изготовления конкретной продукции.

#### **6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА ПРЕСС-ФОРМЫ**

Предельной задачей обогрева пресс-форм на вулканизационном прессе является создание заданного температурного поля во всём объёме прессуемого изделия. Для её выполнения необходимо рассчи-

тивать процессы распространения тепла в системе "плита – пресс-форма – изделие". Важно отметить, что данную задачу необходимо рассматривать как трёхмерную нестационарную, учитывая нелинейные зависимости теплофизических свойств материалов от температуры нагрева. Кроме того, на температурное поле оказывает влияние вулканизация, которая является сложным физико-химическим процессом и состоит из множества последовательно-параллельных стадий с различными тепловыми эффектами [2].

Нам не известны работы, где задачи распространения тепла в пресс-форме рассмотрены в полном объёме описанных выше проблем. Как правило, моделируются двумерные задачи при допущениях о постоянстве свойств материала изделия и нагревательной плиты в рамках определённых температурных интервалов. Однако, по справедливым замечаниям самих авторов, для эффективного моделирования температурного поля пресс-формы и вулканизируемого изделия необходимо рассчитывать трёхмерные модели [3]. Это можно сделать, используя для компьютерного моделирования современные САД- и САЕ-системы.

Одной из главных проблем при моделировании нагрева пресс-формы на плите прессы является задача теплового расчёта плит. В общем случае индукционный нагрев является сложным процессом. Для его точного описания следует рассматривать серию связанных задач: электромагнитную, тепловую, гидродинамическую, механическую, металлургическую [4]. В инженерных расчётах систем индукционного нагрева рассматриваются две первые задачи.

Моделирование процесса индукционного нагрева в инженерных системах расчёта относится к классу связанного анализа, состоящего из квазистационарной электромагнитной задачи и задачи расчёта нестационарного температурного поля. Блок-схема связанного анализа представлена на рис. 6.1, где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала плиты, Ом·м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала плиты;  $T$  – температура нагрева плиты, К;  $H$  – напряжённость электрического поля в объёме плиты, В/м.

Как показали численные эксперименты [5], наиболее сложным с точки зрения задания исходных данных и расчёта является гармонический электромагнитный анализ. При его реализации с помощью САЕ-систем, использующих метод конечных элементов, возникают следующие трудности. Во-первых, это задание размеров конечно-элементной (КЭ) сетки вблизи индукторов. Глубина проникновения электромагнитной волны в сплошное ферромагнитное тело определяется по формуле [6]:

$$\Delta = 500 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

где  $f$  – частота тока, Гц.



**Рис. 6.1. Алгоритм связанного анализа расчёта устройств индукционного нагрева**

Для стали 45 при частоте тока  $f = 50$  Гц глубина составляет  $\sim 2,1$  мм. Для достижения адекватных результатов размеры КЭ вблизи индукторов должны быть в несколько раз меньше полученного значения. С увеличением длины витка индуктора значительно возрастает размер сеточной модели. В отдельных случаях при соблюдении этих рекомендаций число элементов только в системе "основание–индуктор–крышка" (см. рис. 6.2) достигает 1,5 миллиона. Поэтому расчёт реальных конструкций с необходимой плотностью сетки принципиально невозможен даже на современных персональных компьютерах ввиду недостаточности аппаратных ресурсов.

Во-вторых, это необходимость учёта изменения электромагнитных свойств материалов плиты и индукторов. Наименее изученная характеристика, которая оказывает большое влияние на весь расчёт – магнитная проницаемость материала плиты. Зависит она, главным образом, от напряжённости электромагнитного поля. Имеющиеся данные, представленные в [7], носят эмпирический характер и малопригодны для проведения инженерных расчётов нагревательных плит.

Результатом решения задачи электромагнитного анализа является тепловыделение, которое используется при решении задачи теплового анализа в качестве объёмного граничного условия. Однако, если известен метод нахождения тепловыделений индукторов, то возможно проведение только теплового анализа, реализация которого не вызывает больших трудностей. Для исключения электромагнитного анализа введём следующие допущения.

1. Задачи определения мощности, выделяемой в пазах индукторов, и распространения тепла в материале плиты решаются независимо друг от друга, поскольку требуемая температура нагрева плиты не превосходит температуру Кюри ( $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [7].

2. Тепловыделение осуществляется равномерно во всём объёме паза под каждый индуктор, для определения значений мощностей тепловыделений используется методика, основанная на экспериментальных исследованиях индукционного нагрева ферромагнитной стали [7]. Характеристики материала объёма, заполняемого индуктором и специальной органосиликатной композицией, соответствуют свойствам материала плиты.

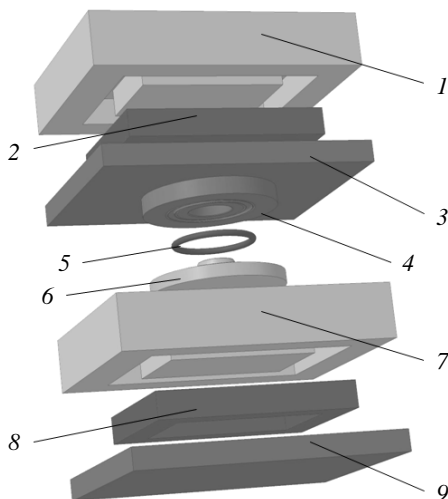
3. Тепловые эффекты вулканизации резинового уплотнения незначительны по сравнению с мощностями индукторов и ими можно пренебречь.

Моделирование процесса нагрева пресс-формы на вулканизационном прессе с индукционным методом обогрева плит проводилось в системе COMSOL [8] и, как в любой системе конечно-элементного анализа, состояло из серии связанных задач: построения геометрии, задания свойств материалов, определения физической модели и построения КЭ сетки.

## 6.2. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА ПРЕСС-ФОРМЫ И ВУЛКАНИЗИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

В качестве примера рассмотрена система нагрева пресс-формы с помощью двух плит длиной  $l = 500$  мм, шириной  $s = 410$  мм, и высотой  $h = 70$  мм с четырьмя индукторами прямоугольной формы размерами  $172 \times 127$  мм в пазах сечением  $25 \times 25$  мм. Ввиду симметричности конструкции плиты и с целью уменьшения объёма вычислений геометрическая (расчётная) модель разработана для четверти нагревательной плиты, см. рис. 6.2.

Геометрическая модель моделируемой системы состоит из девяти элементов. Между четвертями верхней и нижней плиты (основания 1 и 7, индукторы 2 и 8, крышки 3 и 9 соответственно) располагается пресс-форма (матрица 4 и пуансон 6) с вулканизуемым резиновым кольцом 5.



**Рис. 6.2. Геометрическая модель моделируемого объекта (разнесено):**

- 1 – основание плиты 1; 2 – индуктор; 3 – крышка плиты 1;  
 4 – матрица; 5 – кольцо; 6 – пуансон; 7 – основание плиты 2;  
 8 – индуктор; 9 – крышка плиты 2

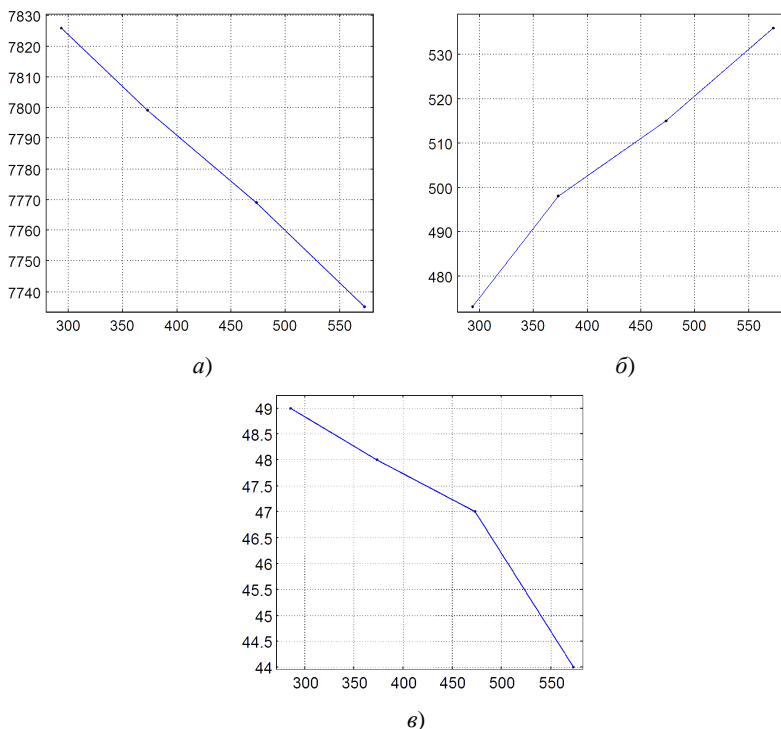
Позиционирование пресс-формы на поверхности плиты осуществлялось таким образом, чтобы обеспечивалась концентричность осей симметрии индукторов и пресс-формы. Данное расположение является скорее "естественным", чем наиболее подходящим для получения требуемого температурного поля внутри изделия.

Пресс-форма соответствует ГОСТ 26619–85 "Пресс-формы одноместные для изготовления манжет гидравлических устройств". Диаметр матрицы и пуансона 124 мм, диаметр вулканизуемого кольца 6 мм. Выбор именно этого типоразмера обусловлен необходимостью соответствия габаритов одной пресс-формы размерам четверти нагревательной плиты.

Трёхмерная геометрическая модель разработана в системе трёхмерного твёрдотельного моделирования КОМПАС-3D.

При разработке модели геометрия отдельных элементов была упрощена. Из моделей оснований и крышек были исключены отверстия для крепёжных элементов и термопар, в пуансоне и матрице не учтены фаски и галтели. Данное упрощение позволяет уменьшить необходимое количество КЭ сетки и сократить время расчёта.

Свойства стали 45, из которой изготовлены основания и крышки плит, взяты из [9] (см. рис. 6.3). Для интерполяции зависимостей значений теплофизических свойств от температуры использована кусочно-линейная зависимость.



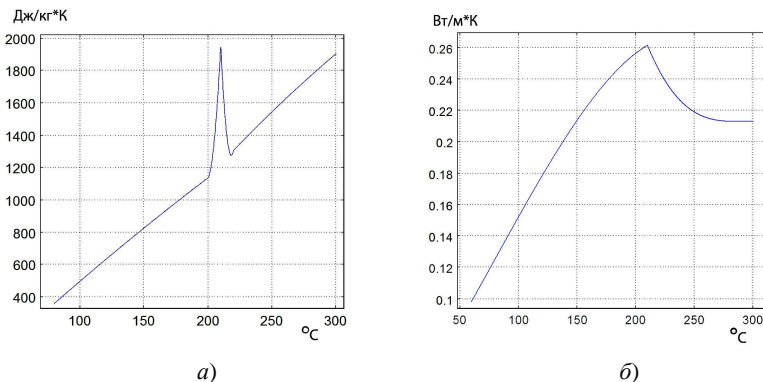
**Рис. 6.3. Зависимость теплофизических свойств стали 45 от температуры (град К):**

*a* – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ; *б* – теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
*в* – теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Согласно принятым допущениям, индукторы (элементы 2 и 8 на рис. 6.2) можно рассматривать как комбинации параллелепипедов, изготовленных из стали 45, объёмы которых соответствуют объёмам пазов в плитах (элементы 1 и 7 на рис. 6.2).

В качестве материала вулканизуемого изделия выбран бутадиенстирольный каучук (СКС), содержание стирольных звеньев в котором составляет 23% [10]. Это наиболее распространённый из СКС тип каучука общего назначения. По объёму выпуска СКС занимают первое место среди всех синтетических каучуков. На их основе изготавливают многочисленные РТИ – конвейерные ленты, рукава, профили.

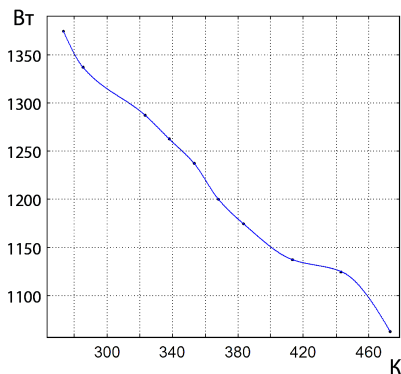
Для учёта влияния вулканизации на температурное поле были использованы зависимости теплофизических свойств каучука от температуры из встроенной в COMSOL библиотеки материалов [11]. Плотность является величиной постоянной, равной  $956 \text{ кг}/\text{м}^3$ , зависимости теплоёмкости и теплопроводности от температуры представлены на рис. 6.4.



**Рис. 6.4. Зависимость свойств каучука СКС-23 от температуры (°C):**  
*a* – теплоёмкость, Дж/кг·К; *б* – теплопроводность, Вт/м·К.

Как видно, изменение теплоёмкости в интервале температур 80...300 °C (рис. 6.4, *a*) и теплопроводности в интервале 60...300 °C (рис. 6.4, *б*) носит сложный характер. Во многом именно такие зависимости свойств каучука от температуры делают практически невозможным применение численных методов для решения задач распространения тепла в вулканизуемых материалах.

Мощности индукторов плиты нелинейно меняются с течением времени нагрева. Чтобы учесть это, предварительно были рассчитаны значения выделяемой мощности для разных значений температуры нагрева согласно инженерной методике, описанной в [7]. Полученные значения представлены на рис. 6.5, для интерполяции использован кубический сплайн.



**Рис. 6.5. Зависимость мощности индуктора от температуры**



Согласно принятым допущениям, в качестве источников тепла были заданы два объёмных источника 2 и 8 (см. рис. 6.2) с соответствующими рис. 6.5 зависимостями мощности от температуры нагрева.

Для данной задачи необходим учёт теплообмена плит и пресс-формы с окружающей средой. В COMSOL имеются возможности расчёта конвективного и лучистого теплообмена, однако, с целью уменьшения нагрузки на вычислительные ресурсы компьютера, для учёта внешнего теплообмена предварительно рассчитывались значения коэффициентов теплоотдачи согласно рекомендациям [12].

Для построения КЭ модели был использован тетраэдрический тип сетки. Максимальный размер элемента 4 мм, минимальный – 0,25 мм. В итоге, сгенерированная сетка имеет 2002421 элемент. Отметим, что при реализации только теплового анализа отпадает необходимость в использовании более плотной сетки вблизи индукторов для адекватного электромагнитного анализа. Тем самым, уменьшается общее время расчёта. Сетка наибольшей плотности формируется непосредственно в вулканизуемом кольце, поскольку целью исследования является нахождение температурного поля именно в объёме изделия.

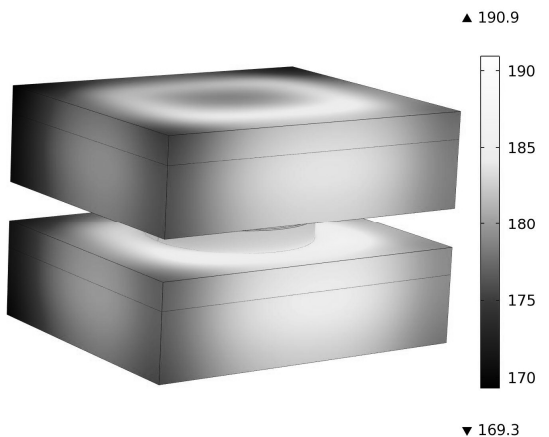
### 6.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА ПРЕСС-ФОРМЫ И ВУЛКАНИЗИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

С использованием COMSOL был произведён нестационарный тепловой расчёт системы, изображённой на рис. 6.2. Конечное время нагрева составило 2450 с, ему соответствует средняя объёмная температура резинового кольца 180 °С, что является оптимальной температурой вулканизации СКС [10]. Шаг по времени составил 50 с. Моделирование было проведено в программе COMSOL 4.0 на компьютере со следующей конфигурацией: четырёхъядерный процессор Intel Core 2 Quad Q6600 с частотой одного ядра 2,4 МГц, оперативная память 8 Гб, операционная система Microsoft Windows Server 2008×64. Продолжительность расчёта составила 72,3 минуты.

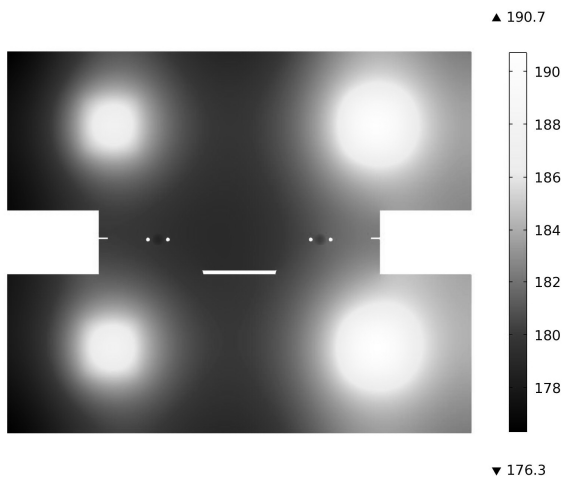
Полученное в результате объёмное температурное поле системы, представлено на рис. 6.6, *а*, на рис. 6.6, *б* – температурное поле поперечного сечения системы, на рис. 6.7 – температурное поле продольного сечения резинового кольца. Максимальный перепад температур по объёму моделируемой системы составил 21,6 °С. Наибольшая температура 190,9 °С наблюдается на внутренних поверхностях первой и второй плиты. Минимальная температура 169,3 °С наблюдается на наружных углах плит.

Максимальная разница температур в поперечном сечении моделируемой системы (см. рис. 6.6, *б*) составляет 14,4 °С. Наибольшая

температура 190,7 °С наблюдается в объёме индукторов, наименьшая 176,3 °С – на торцах плит. Отметим наличие объёмного перегрева системы в её центральной области (правая часть на рис. 6.6, б), который вызван неоптимальным расположением индукторов в объёме плиты и пресс-формы на поверхности плиты. Можно сделать вывод, что этим вопросам необходимо уделять повышенное внимание.



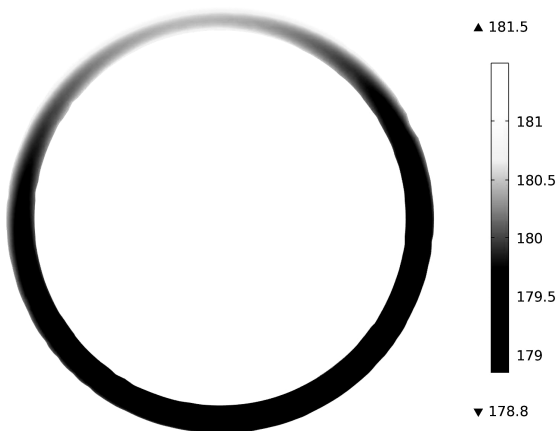
а)



б)

**Рис. 6.6. Температурные поля:**

*a* – четверти моделируемой системы; *б* – поперечного сечения системы



**Рис. 6.7. Температурное поле продольного сечения резинового кольца**

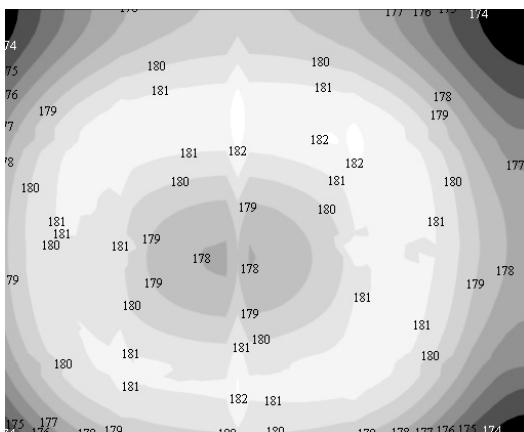
Как видно из рис. 6.7, максимальный перепад температур в продольном сечении кольца составляет  $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура  $181,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответствует внешней поверхности кольца, находящейся вблизи центра плиты, минимальная  $178,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  – противоположной внутренней части кольца.

По методике, изложенной в [13], был произведён тепловой расчёт только нагревательной плиты (основание 7, индуктор 8, крышка 9, см. рис. 6.2). Ввиду симметрии расчётная модель включает четверть плиты.

Температурное поле, соответствующее средней температуре по поверхности  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при расчётном шаге по длине и ширине  $5\text{ мм}$ , представлено на рис. 6.8. Минимальную температуру  $173,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеют края расчётной модели, которые соответствуют центру плиты, углам и торцам плиты. Максимальная температура  $182,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается на поверхности непосредственно над индуктором, расположенной ближе к центру плиты. Как видно, данная плита формирует температурное поле с перепадом температур на поверхности около  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, даже при использовании нагревательных плит, формирующих температурное поле с существенным перепадом температур, конечный перепад температур внутри вулканизуемого изделия составляет менее  $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этот показатель является удовлетворительным для проведения процесса вулканизации.

Отметим, что традиционно качество нагревательных плит оценивается по степени равномерности температурного поля на их рабочей поверхности. Считается, что при вулканизации перепад температур по рабочей поверхности современных плит должен находиться в пределах  $\pm 1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 6.8.** Температурное поле четверти плиты 500×410 мм

Однако, как показал численный эксперимент, пятикратное увеличение этого перепада не приводит к неприемлемой неравномерности температурного поля в объёме изделия.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В каждом конкретном случае промышленного использования существующих и проектирования новых индукционных нагревательных плит следует принимать во внимание специальные требования к формируемому температурному полю в объёме нагреваемого тела, целесообразность использования существующих технологий и ассортимент выпускаемой на прессе продукции.

2. Неравномерность температурного поля по рабочей поверхности плиты в пределах  $\pm 5$  °С не является критичной для проведения вулканизации РТИ.

3. Использование современных САД- и САЕ-систем является перспективным направлением в области моделирования нагрева пресс-форм на индукционных плитах, поскольку позволяет учесть нелинейные зависимости энергетических и теплофизических характеристик в процессе вулканизации.

4. Методически обоснованным является проведение численных экспериментов для наиболее распространённых пресс-форм и используемых каучуков по нахождению объёмных температурных полей в вулканизуемых изделиях. Такой подход позволит сформировать правила для оптимального проектирования нагревательных плит под конкретные процессы и рекомендации по расположению пресс-форм.

Таким образом, задача проектирования нагревательных плит прессов для производства резинотехнических изделий состоит в определении количества и местоположения индукторов в плите, начальной мощности каждого индуктора, количества и местоположения стандартных пресс-форм на рабочей поверхности плиты, при которых неравномерность температурного поля в вулканизуемых изделиях указанного вида и размеров не превышает требуемой.

В заключение заметим, что особое внимание при проектировании и эксплуатации нагревательных плит вулканизационных прессов следует уделять вопросам оптимального управления изменением температуры плит для получения заданного температурного поля.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему приняты допущения, позволившие исключить электромагнитный анализ из моделирования процесса нагрева системы "плита–пресс-форма–изделие"?
2. Почему оказалось достаточным моделировать только четверть реальной системы "плита–пресс-форма–изделие"?
3. Как учитывалось при моделировании изменение мощности индукторов в процессе разогрева нагревательных плит пресса?
4. Почему температурное поле в вулканизируемом изделии может быть более равномерным, чем в системе "плита–пресс-форма–изделие"?
5. Почему при проектировании нагревательных плит прессов обычно ставится задача получения равномерного температурного поля по рабочей поверхности плиты?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 6

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. Блох, Г.А. Органические ускорители вулканизации каучуков [Текст] / Г.А. Блох. – М. : Химия, 1964.
3. Завьялов, А.В. Разработка информационных моделей температурных полей при вулканизации резинотехнических изделий [Текст] / А.В. Завьялов // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы 6 Международной теплофизической школы / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. II. – С. 26–27.
4. Tavakoli, M. Computational modeling of induction heating process / M. Tavakoli, H. Karbaschi, F. Samavat // Progress in electromagnetics research letters, 2009. – Vol. 11. – P. 93 – 102.

5. Карпушкин, С.В. Виртуальное моделирование температурных полей индукционных нагревательных плит [Текст] / С.В. Карпушкин, С.В. Карпов, А.О. Глебов // Сборник тезисов Всероссийской конференции по результатам проектов, реализованных в рамках Федеральных целевых программ "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы, "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы" в области информационно-телекоммуникационных технологий. – М., 2010. – С. 56 – 57.

6. Слухоцкий, А.Е. Индукторы [Текст] / А.Е. Слухоцкий ; под ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1989. – 69 с.

7. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали [Текст] / А.Б. Кувалдин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

8. Multiphysics modeling and simulation – COMSOL [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.comsol.com>. Загл. с экрана.

9. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов [Текст] / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. ; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Синтетический каучук [Текст] / под ред. И.В. Гарманова. – 2-е изд. перераб. – Л. : Химия, 1983. – 560 с.

11. Material library – COMSOL [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.comsol.com/products/material-library/>. Загл. с экрана.

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

13. Малыгин, Е.Н. Методика теплового расчёта нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий [Текст] / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.С. Крушатин // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 11. – С. 48 – 56.

### **AUTOMATED REMOTE ACCESS LABORATORY "DESIGNING AND EXPLOITATION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS"**

#### 7.1. INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATIONAL PROCESS

The application of the achievements of modern information technologies in training process opens the access to new information sources, new opportunities for creative work and makes independent learning more efficient.

Creation of learning environment includes the development of mathematical models of under-research processes, algorithms of problem-solving and databases, possibilities of carrying out distance experiment on remote equipment and result processing. The application of means of mathematical and computer modeling in development of new methods and forms of education makes possible visual presentation of studying objects and registration of the dynamics of their characteristics.

Centralization of methodological aids, software, lab equipment and a wide access to distributed information resources in Internet allows to prompt updating of the learning environment content in accordance with new knowledge and technologies. Creation of lab remote access installations enables the implementation of practical studies and laboratory works using very expensive and unique equipment. We can avoid the unnecessary production of lab equipment. In this case we can see the direct economical effectiveness of the implementation of new information technologies in the training process.

Creation and development of the concept of lab remote access installations ensure the providing of educational services within the framework of distance learning program.

Creation of the automated remote access laboratory allows to carry out laboratory works on design and exploitation of technological systems and is conditioned by the necessity of acquiring practical skills in development and control of chemical production. Every student has an opportunity to go through the whole process: from the moment of decision-taking on the volume of production output till the moment of creation of schedule of developed production functioning and the graph of the equipment maintenance. Active enterprises cannot give such opportunity to the students on account of some objective reasons: the equipment is used for production purposes, high cost of used materials and safety precautions.

## 7.2. ORGANIZATION OF REMOTE ACCESS LABORATORY

The automated remote access laboratory "Designing and exploitation of chemical technological systems" includes (fig. 7.1):

1. Semi-industrial chemical technological system imitating the production of synthetic dye-staff and semi-products.
2. Complex of electronic training aids and training programmes, including principle theoretical fundamentals, information maintenance of laboratory works, description of mathematical models and algorithms of calculations carried out on the 1 basis of laboratory.
3. Training and industrial system of automated calculations and designing the elements of chemical equipment.
4. Package of applied programs for modelling technological processes and control of chemical technological systems.
5. Software of remote access to the lab resources and information exchange with users.

Software of the laboratory is based on the mathematical models of designing processes and exploitation of technological systems worked out at the Department of Flexible Automated Manufacturing Systems. It allows us to make prompt calculations, to analyse the received information, to carry out the corrections of initial data and to receive new results without any material expenses.

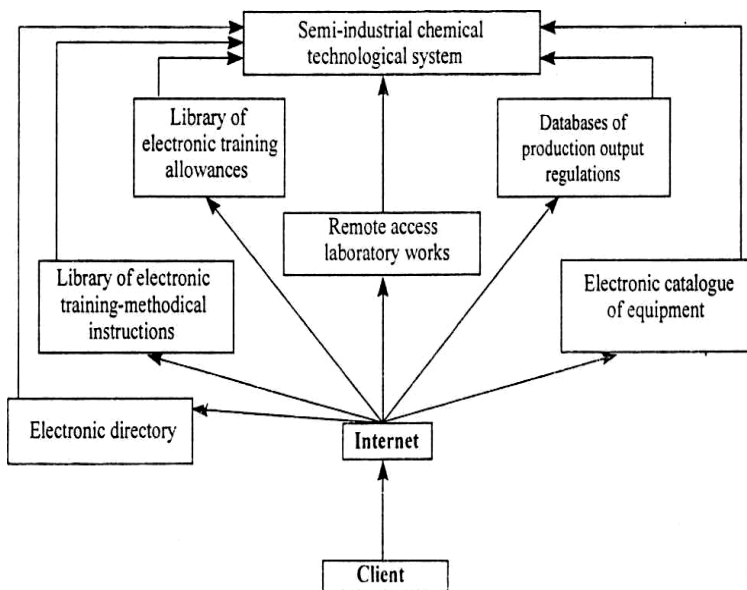


Fig. 7.1. Organization of remote access laboratory



The diversity of chemical productions, large capacity of initial data, necessary for carrying out calculations, requires the development of production output databases. The application of remote access technologies facilitates this process as it allows to introduce and correct new information.

This complex can be used on one laboratory scale, in High Education Institutions and in the Internet network. Laboratory software was created with the use of Clarion, MathCAD (development of applications for local network), html- technologies and Java for development of network applications available in the Internet.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы возможности применения современных информационных технологий в образовательном процессе?
2. Какова необходимость использования технологий удалённого доступа в инженерном образовании?
3. Какие преимущества получает студент при выполнении лабораторных работ на установках с удалённым доступом?
4. Опишите примерную структуру лаборатории удалённого доступа.
5. Какие основные направления использования лабораторий удалённого доступа?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 7

1. Automated Remote Access Laboratory "Design and Exploitation of Technological Systems" / E.N. Malygin, M.N. Krasnyansky, S.V. Karpushkin, V.G. Mokrozub // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов, 2000. – Т. 6, № 2. – С. 332 – 335.
2. Технология организации открытого удалённого компьютерного доступа к лабораторным ресурсам на базе среды программирования LabVIEW / М.Н. Краснянский, Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, В.Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – М., 2001. – № 8. – С. 41 – 46.
3. Новые информационные технологии в открытом инженерном образовании (учебное пособие) / Е.Н. Малыгин, М.Н. Краснянский, С.В. Карпушкин, В.Г. Мокрозуб. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 124 с.
4. Лаборатория удалённого доступа в системе открытого инженерного образования / М.Н. Краснянский, Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, В.Г. Мокрозуб // Открытое образование. – М., 2004. – № 1. – С. 32 – 38.
5. Интернет-технологии в инженерном образовании. Автоматизированные лабораторные практикумы и виртуальные тренажёры / М.Н. Краснянский, С.В. Карпушкин, Д.Л. Дедов // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG. – Germany, 2010. – 132 с.

### **AUTOMATED SYNTHESIS OF RECYCLING WATER SUPPLY SYSTEMS AT CHEMICAL ENTERPRISES**

Nowadays many sectors of economy use water for manufacturing of target products. After water goes through different processes at the enterprises or is used in household purposes, it loses its initial quality and adversely affects the state of natural water reservoirs which receive this wastewater. One of the most water-intensive sectors of the economy and, simultaneously, one of the most intense "generators" of polluted waste water is chemical industry. In order to eliminate water pollutants dump into water reservoirs in a relatively short period of time, it is necessary to develop and gradually implement self-contained systems of water recycling. Such systems allow: to significantly reduce industrial consumption of fresh water, to use fresh water only for drinking purposes and to fill losses in recycling systems, to significantly reduce or even eliminate losses of valuable raw materials and supplies occurred with sewage dumping. Effective and reliable operation of such systems is only possible when the choice of appropriate equipment is made taking into account all production requirements and environmental conditions.

Analysis of literature [1, 5 – 9] shows that these papers are mostly focused on the issues related to hardware design for existing technological schemes, and to a lesser extent on selection of the most suitable technological scheme for concrete conditions and criteria specified by consumers.

Therefore the purpose of this paper is to develop the procedure of automated synthesis of water preparation stages that determine the effectiveness of recycling water supply (RWS) system of a chemical enterprise.

The RWS system consists of two parts. The first includes stages of target products manufacturing processes, technological processes that use water for heating or cooling of equipment (reactionary mass in it). The other part contains stages which provide restoration of consumer characteristics of water and its supply to the main technological scheme.

Stages of water preparation are: cleaning, cooling (heating), adding (if necessary) and water injection. Fig.8.1 shows possible variants of water preparation stages that implement various technological processes; Fig. 8.2 depicts possible variants of water preparation schemes for RWS system.

In general, the problem of automated synthesis of water treatment stages for a self-contained FWS system includes: structure generation for a technological scheme, choice of type, quantity and basic geometric dimensions of equipment for each stage of the chosen scheme.

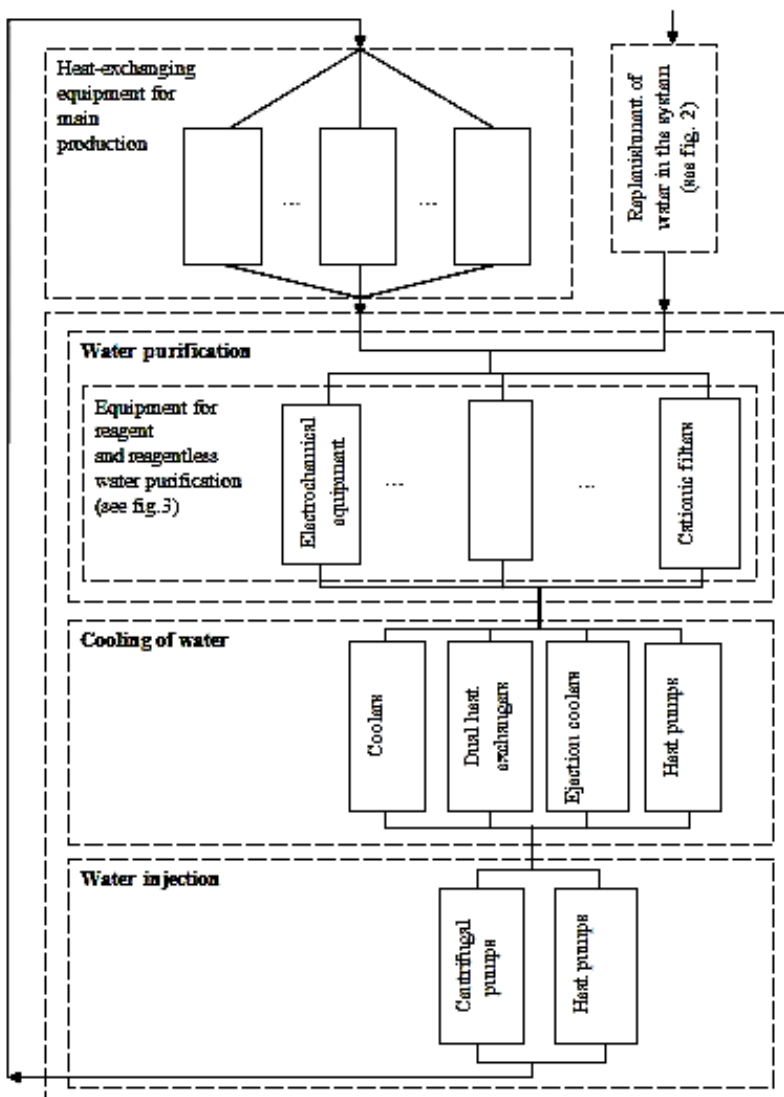


Fig. 8.1. Possible variants of water recycling scheme

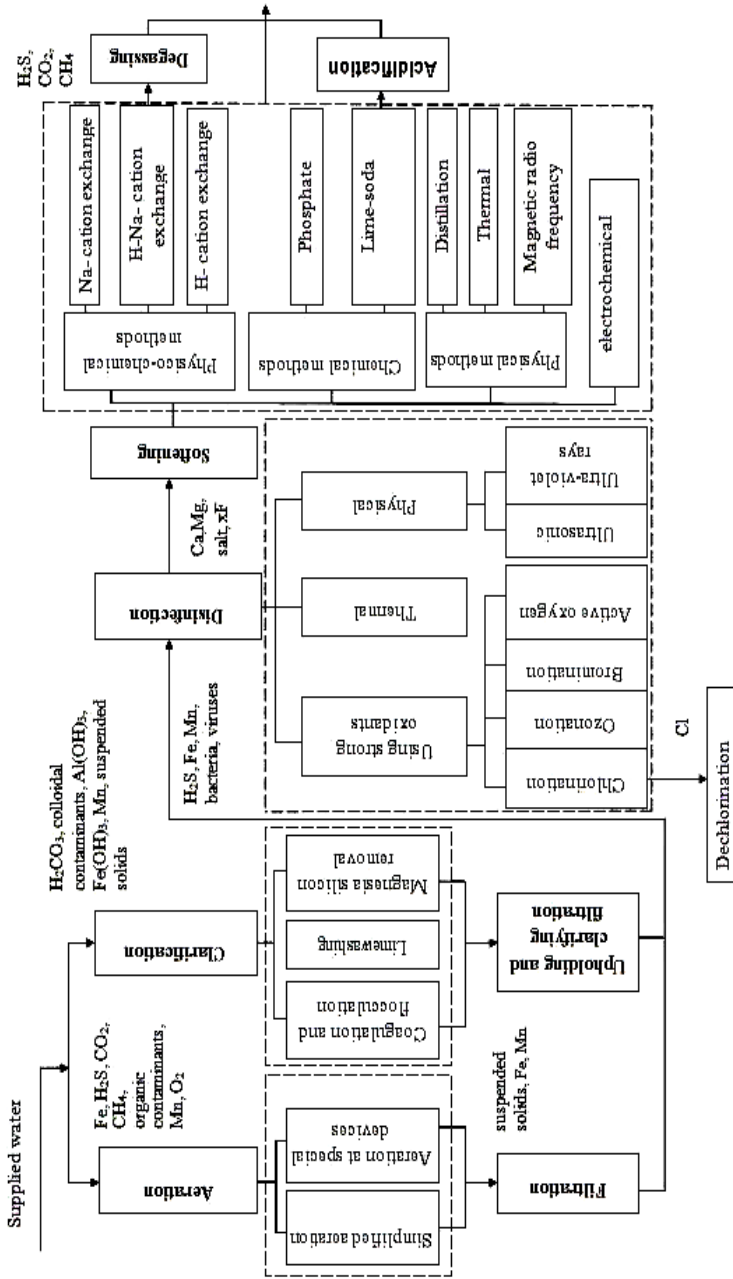


Fig. 8.2. Possible variants of water preparation in RWS system

## 8.1. STATEMENT OF THE PROBLEM

Input parameters are: efficiency of technological scheme for target products manufacturing, pressure in the scheme, initial and final temperature of the target product and recycling water, heat-exchange surface, characteristics of main equipment, target products and recycling water (viscosity, density, thermal conductivity coefficient, specific heat, pH, total hardness, alkalinity, content of calcium, iron, sulfates, total dissolved solids), scheme of the main part of RWS system and pipelines diameters.

In the formalized form, the problem is to find the minimum value of an objective function:

$$I_{opt} = \min_{w \in W} F_w \quad (8.1)$$

subject to constraints:

$$T_{out} \leq T^{\lim}, C_{out} \leq C^{\lim} \quad (8.2)$$

and operators which represent mathematical models of decision support for variants generating of:

– structural chart of an auxiliary part of RWS system:

$$\Psi : G \times T_{in} \times T_{out} \times T^{\lim} \times C_{in} \times C_{out} \times C^{\lim} \rightarrow K ; \quad (8.3)$$

– hardware design for the structure chart of an auxiliary parts of RWS system:

$$\Omega : G \times T_{in} \times T_{out} \times T^{\lim} \times C_{in} \times C_{out} \times C^{\lim} \times k_{opt} \rightarrow R \cdot \quad (8.4)$$

Problem (8.1) – (8.4) belongs to a class of combinatorial problems. If stated as above, the solution to this problem cannot be obtained due to high dimensionality of system variables set, complexity of mathematical models of technological processes at each stage, etc. For these reasons the procedure of RWS system synthesis consists of a sequential consideration of two sub-problems of smaller dimension which in addition have independent values for design process:

– variants generation for technological schemes structures of an auxiliary part of a RWS system and their optimal choice;  
 – calculation of hardware design for the chosen technological scheme.

If there is no solution for the second stage of synthesis, decision maker (DM) chooses a different solution form the set of solutions obtained at the first stage. This choice is based on the rules discussed below.

### 8.1.1. Problem of selection of technological scheme structure

Problem of selection of technological scheme of an auxiliary parts of RWS system from a set of possible variants on the basis of mathematical optimality criteria is, as a rule, rarely solved due to complexity of imposed

system conditions and a large set of evaluation criteria as well. The most advanced method for solving of this problem type is the use of expert systems [1]. In order to choose an optimal structure of a process from a set of variants it is necessary to clearly define the evaluation criteria, which are divided into three groups: cost, reliability and safety. In this case, it is recommended to use an integrated assessment based on allocation of weights between these summing groups subjected to specific conditions.

In this paper we propose the following problem statement for technological scheme structure generation: find a sequence of process steps of the system such that under conditions:

$$T_{out} \leq T^{\lim}, \quad C_{out} \leq C^{\lim}, \quad (8.5)$$

for the operator represented by a mathematical model of variants generation for structural schemes of an auxiliary part of RWS system (8.3), the following equation holds:

$$k_{opt} = \arg \min_{k \in K} Q_1(k). \quad (8.6)$$

As we propose to use multi-criteria selection of the optimal technological scheme structure, it is necessary to choose normalization and ranking methods for the set of criteria and a multi-criteria selection method. In this paper the optimality criterion  $Q_1$  represents the sum of weighted relative losses of the following criteria: reduced costs for implementation of an auxiliary part of RWS system, reliability of the system, technological effectiveness and the safety of process [2].

Integral criterion  $Q_1$  is

$$Q_1(k) = \sum_{i=1}^4 (\rho_i \omega_i(k)), \quad (8.7)$$

Here  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  are the weights.

$$\rho = \{\rho_i\} = \left\{ \rho_i : \rho_i > 0, i = 1, \dots, 4, \sum_{i=1}^4 \rho_i = 1 \right\}, \quad (8.8)$$

where  $\rho_i, \omega_i(k)$  – weighted loss of the  $i$ -th criterion;  $\omega_i(k) = \omega_i(F_{i_r}(k))$ , ( $i = 1, \dots, 4, k \in K$ ) – monotonic functions which convert each objective function  $F_{i_r}(k)$  to dimensionless form;  $F_{11}(k)$  – economic criteria which includes costs of implementation of the system;  $F_{12}(k)$  – criterion of reliability of system functioning;  $F_{13}(k), F_{14}(k)$  – criteria of technological effectiveness and criterion of safety respectively. Here we find minimum value for function  $F_{11}(k)$ , and maximum values for functions  $F_{12}(k), F_{13}(k), F_{14}(k)$ .

Functions  $\omega_i(k)$  ( $k \in K$ ) are written as:

$$\omega_{11}(k) = \frac{F_{11}(k) - F_{11}^0}{F_{11}^{\max} - F_{11}^0}, \quad \omega_{12}(k) = \frac{F_{12}(k) - F_{12}^0}{F_{12}^0 - F_{12}^{\min}}, \quad (8.9)$$

$$\omega_{13}(k) = \frac{F_{13}(k) - F_{13}^0}{F_{13}^0 - F_{13}^{\min}}, \quad \omega_{14}(k) = \frac{F_{14}(k) - F_{14}^0}{F_{14}^0 - F_{14}^{\min}}. \quad (8.10)$$

Here

$F_{11}^{\min}$  – maximum value of minimized function  $F_{11}(k)$  ( $k \in K$ ) on a feasible set  $K$ ;

$F_{12}^{\min}$ ,  $F_{13}^{\min}$ ,  $F_{14}^{\min}$  – minimum values of maximized functions  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$  ( $k \in K$ ) on a feasible set  $K$ ;

$F_{11}^0$ ,  $F_{12}^0$ ,  $F_{13}^0$ ,  $F_{14}^0$  – optimal values of objective functions  $F_{11}(k)$ ,  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$  ( $k \in K$ ) respectively on a feasible set  $K$ . Values of  $\omega_i(k)$  ( $i=1, \dots, 4, k \in K$ ) range from 0 to 1.

We need to find a compromise variant ( $k \in K$ ) that will not be optimal for objective functions  $F_{11}(k)$ ,  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$ , but it will satisfy the integral criterion  $Q1(k)$ .

In order to find a single solution of a complex problem one has to set the weights  $\rho_i$  ( $i=\overline{1,4}$ ), which satisfy (8) and reflect relative importance of objective functions  $F_{11}(k)$ ,  $F_{12}(k)$ ,  $F_{13}(k)$ ,  $F_{14}(k)$  ( $k \in K$ ). In this case the most effective methods are ranking method and allocation of weights [3] (the latter is used in this paper).

Economic criterion. During the process of filling in a database of water preparation methods at each stage we take into account estimated consolidated cost of their implementation. This criterion does not provide exact cost value, as at this stage we have data only about water preparation stages based on which we can give approximate cost estimation of schemes functioning for an auxiliary part of a RWS system using expert estimations [4]. Components of criterion  $F_{11}(k)$  are:

$$F_{11} = \sum_{i=1}^{N_k} S_{ik}(G) + \sum_{i=1}^{N_k} S'_{ik}(G, m_{ik}), \quad k \in K. \quad (8.11)$$

It should be noted that different expendable materials can be used in implementation of process steps, for instance, we can use

oxyethylidenebiphosphone acid, nitrilotrimetilfosfonic acid and others to implement the complexone technology.

Criterion of equipment reliability. Reliability is a property of equipment to perform its functions maintaining its initial characteristics within acceptable limits, corresponding to the terms and conditions of its use, maintenance and repair within time span. Reliability is a complex property, thus, it can comprise no-failure operation, maintainability and conceivability separately or in combination depending on equipment functions and operational conditions for the equipment unit and for its parts:

$$F_{12} = \max_K \prod_{i=1}^{N_k} P_{t_{ik}}, \quad k \in K. \quad (8.12)$$

Data on reliability indicators for individual types of equipment is listed in Table. 8.1.

Criteria of reliability and safety can be described similarly.

Using data from a database created during purification, water cooling (heating) and other processes design and defining the aim, for example, quality of water in the system, we can find a combination of technological stages to achieving this aim with the use of decision-making mechanism. Fragment of such database is shown in Table. 8.1. The database contains rules, empirical knowledge and general data that is available to experts.

For a formalized description of data sets required to solve the above problems it is necessary to create a structured database. Data structure for this research area is displayed as a set of informational and logical models (ILM) and rule-based models (RBM) of decision support systems. Data normalization requirements for such models should be fulfilled and models themselves should be represented in canonical form.

In general view, an ILM for selecting of technological schemes of water purification stages and of appropriate hardware design represents a sum of data sets and links between them written in the form of production rules.

A coherent system is formed by combining several process steps with different efficiency (e.g. water purification process). First, we choose feasible variants of system structure using data about parameters of water at each technological stage and linked stages. Then we choose an optimal scheme for the auxiliary part of RWS system based on estimations of consolidated reduced costs, reliability, technological effectiveness and safety criteria.

Feasible set of technological schemes for RWS systems is formed using a heuristic algorithm. At first we formulate relationships between technological stages that allow to receive required water parameters, input and output of the main equipment used at certain stages, links between current and proceeding stages and other similar relationships in the form of rules.



### 8.1. Fragment of a database for water preparation process

Stage	Method	Equipment	Equipment reliability (0...1)	Technological effectiveness, rank (0...10)	Probability of fire/explosion (0...1)
Water treatment	Electro-chemical	APU-150	0.78	6.5	$3.5 \cdot 10^{-4}$
		...	...	...	...
	Acoustic	Water King 1	0.68	5.2	$2.6 \cdot 10^{-4}$
		Acoustic -T2	0.73	5.3	$3.1 \cdot 10^{-4}$
		Ekoacoustic	0.7	5.3	$3.0 \cdot 10^{-4}$
		USP-300	0.63	4.8	$2.7 \cdot 10^{-4}$
		...	...	...	...
	Magnetic	AktiMAG TS156	0.86	8.5	$3.5 \cdot 10^{-4}$
		...	...	...	...
	Complexion e technology	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	D-V4450	0.86	5.8	$1.7 \cdot 10^{-4}$
		...	...	...	...
Water cooling	Coolers	Rosinka-5	0.80	8.5	$2.5 \cdot 10^{-4}$
		EKM	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	$2.2 \cdot 10^{-4}$
		...	...	...	...
	Dual heat exchangers		0.84	8.3	$2.7 \cdot 10^{-4}$
	Ejection Coolers	OVE-25-03-13	0.79	7.9	$2.6 \cdot 10^{-4}$
		ROSA	0.83	8.1	$2.1 \cdot 10^{-4}$
		...	...	...	...
	Thermal pumps		0.87	7.4	$1.5 \cdot 10^{-4}$
...		...	...	...	
Water injection	Pumps	Centrifugal pumps	0.82	6.0	$4.8 \cdot 10^{-4}$
		Turbine pumps	0.81	6.0	$4.5 \cdot 10^{-4}$

Since dimension space of combination set does not exceed 1000, and taking into account high performance of modern personal computers, the solution can be obtained by exhaustive search through all possible combinations of schemes.

### 8.1.2. Choice of equipment

The next step at synthesis of water preparation stages for RWS systems is calculation and choice of standard equipment sizes for a selected technological scheme.

Most types of equipment have standardized sizes (e.g. cooling towers, pumps, etc.). Ejection coolers, dual heat exchangers and heat pumps can be manufactured according to individual orders.

This problem can be stated as follows: for each stage of an auxiliary parts of RWS system we have to find type of equipment, its geometric dimensions and quantity of each type that provide normal functioning regime of the whole system:

$$r_{opt} = \arg \min_{r \in R} Q_2(r) \quad (8.13)$$

subject to constraints:

$$T_{out} \leq T^{lim}, C_{out} \leq C^{lim} \quad (8.14)$$

for the operator represented by a mathematical model of decision-making support for hardware design variants generation for an auxiliary part of RWS system (8.4).

Components of the criterion are:

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{Nt} n_i \alpha_i V_i^{\beta_i} + \sum_{i=1}^{Nt} \sum_{l=1}^{Kl} m'_{il} st_l \quad (8.15)$$

Mathematical model of decision making for hardware design selection for specific equipment types includes formulae for calculation of equipment volumes and parameters based on the notions shown in [5 – 9, etc.]. All methods of calculation for certain equipment types of RWS system for software design problem are presented as a base of calculation modules.

Since the number of standard sizes for each equipment type is not large (for example, cooling towers "Rosinka" have only five sizes) it is appropriate to use full exhaustive search for calculation of its required quantity. By doing so we achieved the global minimum of reduced cost criterion for the given problem.

## 8.2. EXAMPLE OF PROBLEM SOLUTION

To solve problems (8.5) – (8.12) and (8.13) – (8.15) we have developed an information system which includes a database of equipment used in RWS systems and software that allows user to select an optimum scheme of RWS system and equipment with necessary characteristics.

Automated synthesis procedure for a RWS system of a chemical enterprise was implemented at modernization of RWS system of the public corporation "Pigment" (Tambov). Based on the proposed approach we selected the scheme which includes the following equipment: electrochemical water purification apparatus "APA-150"; cooler Rosinka, centrifugal pump 150-125-315 with characteristics: (supply – 200 cu.m / h, pressure – 32 m, with engine capacity of 30 kVt/1500), with initial water characteristics: pH – 7.8, chlorides 269 mg / l, sulphate – 332 mg / l, hardness – 9.2 mEq / L, iron – 3.2 mg / l, suspended solids – 16 mg / l, transparency of – 20 cm.

The proposed procedure of automated synthesis of technological scheme for recycling water supply system for a chemical enterprises using the theory of expert systems allows to choose the most suitable water purification system for specific conditions and criteria set by consumers under conditions of large-scale dimension of variants.

### Notations

$C_{in}$ ,  $C_{out}$  и  $C^{lim}$  – total concentration of contaminants in water at the beginning and at the end of production cycle for a target product, and their maximum allowed values;

$F_w$  – integral criterion for the w-th variant of RWS system;

$G$  – water discharge;

$K$  – set of variants for structural schemes of RWS systems;

$k_{opt}$  – optimal variant of technological scheme of an auxiliary part of RWS system;

$m_{ik}$  – expenditure rate for materials needed for water purification process at the i-th stage of the k-th variant of RWS system;

$m'_{il}$  – expenditure norm of l-th material needed for water purification processes at the i-th stage;

$N_k$  – number of stages for the k-th variant of RWS system;

$N_t$  – number of stages in the scheme;

$N_l$  – number of expenditure materials types;

$n_i$  – number of main units of equipment at the  $i$ -th stage;

$Pb_{ki}$  – static probability of fire (explosion) at the  $i$ -th stage of the  $k$ -th variant of CW system;

$Pt_{ki}$  – probability of non-failure work of equipment on the  $i$ -th stage of the  $k$ -th variant of CW system;

$Q_1, Q_2$  – criteria for selection problems for technological scheme structure and equipment for RWS system respectively;

$R$  – set of hardware design variants for RWS system auxiliary part;

$r_{opt}$  – optimal hardware design variant for RWS system;

$S_{ik}(G, m_{ik})$  – consolidated capital expenditures (cost of basic and auxiliary equipment) for implementation of processes at the  $i$ -th stage of the  $k$ -th variant of RWS system;

$S'_{ik}(G, m_{ik})$  – consolidated operating expenses for implementation of processes at the  $i$ -th stage of the  $k$ -th variant of RWS system, including the cost of expendable materials (complexones, electricity, etc.);

$st_l$  – unit cost of the  $l$ -th type of expendable material;

$Te_{ki}$  – technological effectiveness of water preparation at the  $i$ -th stage including: type of process and equipment with the corresponding expendable materials;

$T_{in}, T_{out}$  и  $T^{lim}$  – set of temperature levels at the beginning and at the end and maximum feasible value of the minimum temperature of water to produce the target product;

$V_i$  – main size of equipment unit at the  $i$ -th stage;

$W = K \times R$  – set of synthesis variants for RWS system;

$w_{opt} = \{k_{opt}; r_{opt}\}$  – an optimal variant;

$\alpha_i, \beta_i$  – coefficients reflecting dependence of equipment cost at the  $i$ -th stage on material type and basic size;

$\rho_i$  – weight coefficients;

$\psi, \Omega$  – functional operators;

$\rho_i \omega_i(k)$  – weighted loss for the  $i$ -th criterion.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему в настоящее время в литературе основное внимание уделяется вопросам, связанным с расчётами аппаратурного оформления известных технологических схем?

2. Почему задача синтеза стадий водоподготовки разбивается на две подзадачи?
3. Из каких соображений в задаче формирования варианта структуры технологической схемы используется интегральный критерий?
4. Какие методы используются при задании весовых коэффициентов для отдельных критериев задачи?
5. Какие методы можно использовать при решении задачи синтеза стадий водоподготовки?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 8

1. Мережко, А.Г. Информационная система для анализа и моделирования технологий водоподготовки / А.Г. Мережко, С.П. Орлов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 233 – 236.
2. Малыгин, Е.Н. Автоматизированный синтез системы очистки газовых выбросов для многоассортиментных малотоннажных химических производств / Е.Н. Малыгин, В.А. Немтинов, Ю.В. Немтинова // Теоретические основы химической технологии. – 2003. – Т. 27, № 3. – С. 613 – 620.
3. Михалевич, В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевич, В.Л. Волкович. – М. : Наука, 1982. – 286 с.
4. Немтинов, В.А. Применение теории нечетких множеств и экспертных систем при автоматизированном выборе элемента технической системы / В.А. Немтинов, С.Я. Егоров, П.И. Пахомов // Информационные технологии. – 2009. – № 10. – С. 34 – 38.
5. Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 256 с.
6. Нечаев, А.П. Развитие оборотных и бессточных систем водоснабжения / А.П. Нечаев. – М. : ВНИЦентр, 1980.
7. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий : справочное пособие / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с
8. Беликов, С.Е. Водоподготовка : справочник / С.Е. Беликова. – М. : Аква-Терм, 2007. – 240 с.
9. Иванов, В.Г. Водоснабжение промышленных предприятий / В.Г. Иванов. – СПб. : Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 537 с.