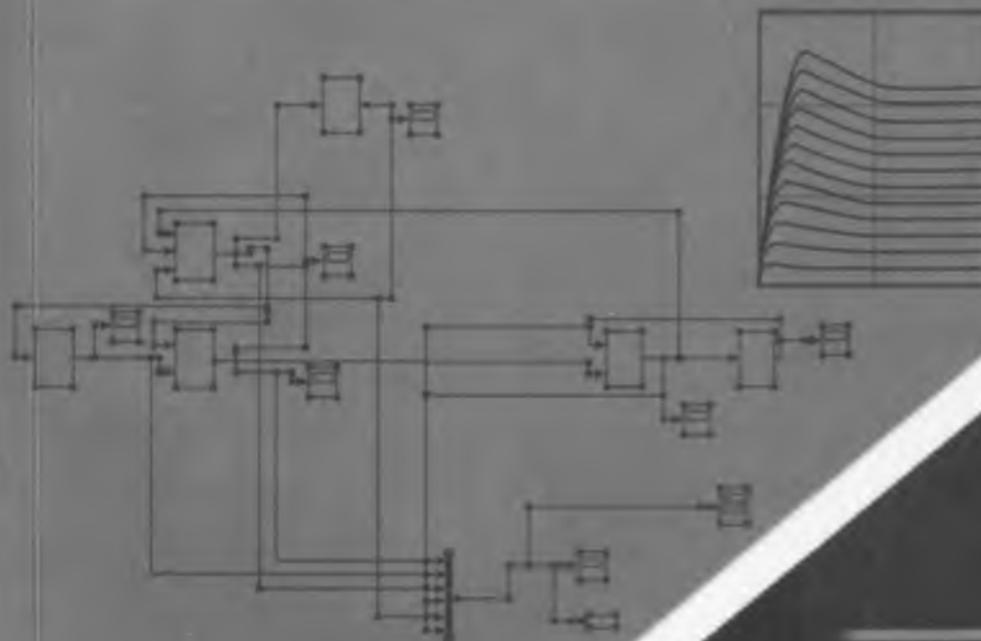


А. АРТЫКОВ

**Компьютерные методы  
анализа и синтеза  
химико-технологических  
систем**



681.3

A-86

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

А. АРТИКОВ

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ  
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА  
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

*Рекомендовано Министерством высшего и среднего  
специального образования Республики Узбекистан  
в качестве учебника для магистрантов  
технологических специальностей*

1579

У 5441

УДК: 004:54(075)

ББК 35я73

А-86

Рецензенты: *О. Сафаров* — докт. техн. наук, проф. БТИВТ;  
*Д. П. Мухитдинов* — докт. техн. наук, доц. ТГТУ;  
*Т. Р. Шамуратов* — доц. БТИВТ;  
*И. Юнусов* — доц. ТХТИ

**Артиков А.**

Компьютерные методы анализа и синтеза химико-технологических систем: учебник для магистрантов технологических специальностей / Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан. — Т.: «Voriz-nashriyot», 2012. — 160 с.

В учебнике последовательно рассматриваются вопросы многоступенчатого системного анализа, моделирования, принятия решения в выборе оптимальной системы с учетом глубинных явлений и эффектов. Приведены примеры синтеза механических, теплообменных, массообменных, тепломассообменных технологических систем и систем с химическими преобразованиями в продукте переработки.

Предназначен для магистрантов технологических специальностей, будет полезен инженерам, научным работникам и другим специалистам.

ББК 35я73

## ОТ АВТОРА

В настоящее время, когда все больше развивается технический прогресс, растет наша потребность в широком использовании новых современных средств в быту, промышленности, различных аспектах нашей жизни. В частности, несомненно важна роль новых современных методов и средств в глубоком изучении технологических систем и процессов в производстве. В этом большое значение имеет применение методов системного анализа, моделирования, автоматизированного расчета и поиска оптимальных решений. В целях глубокого изучения данных новаций в учебном процессе и был создан настоящий учебник. В нем такие важные вопросы, как системный анализ, математическое моделирование процессов, перевод созданных математических моделей в компьютерные модели, определение оптимальных систем и условий и внедрение их в практику приведены на примерах различных процессов. В приведенных компьютерных моделях использованы возможности прикладной программы «Matlab». Примеры, использованные для каждого процесса, взяты из научных работ и диссертаций моих учеников.

При формировании данного предмета и в развитии его содержания всестороннюю помощь оказал ректор ТКТИ проф. С.М. Турбожонов, за что выражаю ему свою искреннюю признательность.

Появлению данного предмета способствовало также выполнение Европейской программы TEMPUS: JEP\_25221\_2004.

Выражаю благодарность принимавшим участие в редактировании учебника доцентам И. И. Юнусову, Б. Т. Хамидову, участвовавшему в его переоформлении Ф. Касимову и всем моим ученикам, внесшим свой вклад в сбор и обобщение материала. Благодарю сотрудников кафедры ИАБ и в целом коллектив ТХТИ, оказавшим поддержку при подготовке и написании учебника.

*Профессор А. Артиков*

## Т Е М А 1. ВВЕДЕНИЕ

### П л а н

- 1.1. Роль и значение дисциплины
- 1.2. Цель и задачи изучения дисциплины
- 1.3. Требования к знаниям магистров
- 1.4. Знания, необходимые для изучения дисциплины

### 1.1. Роль и значение дисциплины

С обретением независимости в Узбекистане происходят коренные изменения во всех сферах жизни общества. На современном этапе осуществления экономических реформ особый приоритет отдается модернизации производства [1]. При этом большое значение имеют системный анализ, моделирование, расчет и выбор оптимальных решений.

Получение образования в Узбекистане гарантировано Конституцией Республики Узбекистан. Образование как могучий стимул для раскрытия личности поможет каждому проявить свои способности и талант, сформировать современное мировоззрение. Образование на основе национальной идеи приобретает особую актуальность в наши дни. Идея национальной независимости, выражая коллективные интересы нации, стала нерушимым бастионом для защиты национальной независимости, культуры и духовности народа. Большое внимание уделяется подготовке кадров, преданных Родине, с глубокими знаниями и высоким профессионализмом. Реализация Национальной программы по подготовке кадров способствует совершенствованию системы непрерывного образования и воспитания, уважению ценностей, обычаев и традиций всех народов многонационального Узбекистана. Быстрое развитие новой техники и технологий, системы связи (Интернет и др.) привело к расширению обмена достижениями технического прогресса и обогащению духовных ценностей, науки и прогресса.

Одним из этапов получения высшего образования в республике является магистратура. Для подготовки специалистов высокой квалификации разработаны стандарты образования, учебные планы, программы и ряд учебно-методических документов. С целью повышения качества подготовки магистров по химической технологии в Узбекистане, в числе первых в мировой практике, введен в учебный план новый предмет «Компьютерные методы анализа и синтеза химико-технологических систем».

Дорогой магистрант, Вы необыкновенная и многогранная личность, обладаете многими знаниями, имеете большие возможности. Изучая данный предмет, шаг за шагом углубляясь в изучаемую систему, Вы последовательно будете переходить от простого к сложному способу анализа и в дальнейшем сможете использовать универсальный ключ системного анализа при всех своих исследованиях, увеличивая свои положительные привычки и повышая самодисциплину.

Как в жизни, так и в технологии решения принимаются человеком. Для получения правильных решений человек обращается к различным методам и средствам анализа и синтеза. Учебник написан для оказания помощи при использовании подхода многоступенчатого анализа и моделирования, принятии решения в выборе оптимальной системы с учетом глубинных явлений и эффектов. В этом Вам на помощь придут разработанные и представленные в Учебнике компьютерные модели. Вы сможете без особого труда и быстро рассчитать исследуемый технологический процесс и выбрать оптимальную систему.

Широкое применение современных средств вычислительной техники, развитие компьютерных прикладных программ для решения различных задач, управления производственными процессами требуют от магистра любого профиля соответствующего образования и умения на должном уровне обладать методами моделирования, оптимизации и инженерного расчета процессов и аппаратов химической технологии. Появившиеся компьютерные программные обеспечения позволили разработать новые многоступенчатые методы моделирования и синтеза оптимальных химико-технологических систем и преподавать данный предмет на новом качественном уровне.

«Компьютерные методы анализа и синтеза химико-технологических систем» — предмет, в котором описываются основные способы анализа, моделирования технологических процессов и выбора решений по формализации оптимальных технологических систем. На основе предыдущего бакалаврского предмета «Основы моделирования химико-технологических процессов» рассматривается связь между химико-технологическими процессами и химико-технологическими системами. Приводятся: углубленная классификация моделей и видов моделирования; новые подходы к системному, многоступенчатому анализу и формализации компьютерной модели; последовательное ознакомление с методологией выбора оптимальных технологических систем. В частности, механические системы (пе-

ремешивание, измельчение) рассмотрены на двух—трех; теплообменные системы — на трех—четыре; системы дистилляции, сушки, ректификации — на пяти—шести; системы, включающие химические преобразования — на шести—девяти иерархических уровнях.

## 1.2. Цель и задачи изучения дисциплины

### *Цель курса:*

- ознакомление с компьютерными методами синтеза оптимальных технологических систем на основе системного анализа математического моделирования технологических процессов;
- привитие магистрантам навыков корректной постановки задач анализа и синтеза химико-технологических систем путем последовательного перехода от простого исследования к сложному, применения методов многоступенчатого анализа, компьютерного моделирования процессов, принятия решений в оптимальном выборе системы с учетом глубинных явлений и эффектов;
- обучение методологии расчетных исследований технологических процессов на компьютерах и использование их для решения задач проектирования и инженерного расчета процессов, аппаратов, установок химической технологии и систем управления.

## 1.3. Требования к знаниям магистров

### *Магистр должен иметь представление:*

- о проблемах управления качеством промышленной продукции;
- об объектах переработки и процессах, которым подвергается сырье в ходе технологического процесса;
- о математическом описании закономерностей протекания технологических процессов и функционирования химических и смежных производств;
- о законах механики, термодинамики, гидродинамики, гидравлики и т. д. и технологических процессах, обеспечивающих получение продукции наивысшего качества;
- о проблемах рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов;
- о системном подходе к исследованию технологического процесса;
- об основах математического моделирования технологических процессов;

- об основах оптимизации технологических процессов;
- о средствах вычислительной техники, компьютерных программах, приемлемых для исследования технологических процессов;
- о математическом моделировании закономерностей протекания технологических процессов и функционирования химических и смежных производств;
- о проблемах управления качеством промышленной продукции, рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов.

*Магистр должен знать и уметь использовать:*

- науку о процессах и аппаратах пищевого производства;
- классификацию процессов, протекающих при обработке пищевых продуктов;
- методы многоступенчатого компьютерного анализа и синтеза механического тепломассообмена, биотепломассообмена и других процессов на основе их компьютерной модели, алгоритмизацию и программное обеспечение процедуры расчета технологических процессов;
- компьютерное программирование анализа и расчета оптимальных технологических систем;
- установление идентификации теоретических и экспериментальных исследований.

#### **1.4. Знания, необходимые для изучения дисциплины**

При изучении данной дисциплины обучающимся необходимы навыки составления алгоритмов и программирования с использованием компьютерных технологий; знания основных понятий следующих дисциплин: «Физика», «Высшая математика», «Информатика и информационные технологии», «Химия», «Физическая химия», «Общая химическая технология», «Процессы и аппараты химической технологии», «Автоматизация химико-технологических процессов».

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 1**

1. Магистранту напоминает и разъясняется, что получение образования в Узбекистане гарантировано Конституцией Республики Узбекистан и каждый имеет право непрерывно получать и повышать свое образование. Образование как могучая сила для раскрытия личности помо-

жет проявить свои способности и талант, сформировать современное мировоззрение. На основе идеи национальной независимости образование приобретает особую актуальность в подготовке кадров с глубокими знаниями и высоким профессионализмом. Быстрое развитие новой техники и технологий привело к расширению обмена информацией, достижениями науки и технического прогресса. На фоне этого усиливается требование к введению предмету.

2. Разъясняется, что в будущем почти все исследования будут выполняться на основе системного анализа. В Узбекистане в числе первых в мире для магистрантов по химической технологии введен новый предмет.

3. Разъясняются роль, значение, цель дисциплины и требования к предварительному знанию магистрантов, что материалы, приведенные в учебнике, написаны для оказания помощи исследователям в принятии более правильного решения в синтезе оптимальных технологических систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каримов И. А. Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. —Т.: «Узбекистон», 2009. С. 56.
2. Программа предмета КМАСХТС № МД5А522–201.02 от 23.08.2008 г.

## ТЕМА 2. МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА СИСТЕМ

Цель темы — ознакомление с методом многоступенчатого системного анализа.

Дорогой магистрант, изучая тему, Вы научитесь шаг за шагом углубляться в исследуемую систему, овладеете знаниями последовательного перехода от простого к сложному способу анализа и в дальнейшем сможете использовать универсальный ключ системного анализа при всех своих исследованиях. Использование подхода многоступенчатого анализа поможет Вам при моделировании, принятии решения в выборе оптимальной системы с учетом глубинных явлений и эффектов, на которые Вы можете спуститься.

Предлагаем следующие этапы системного анализа:

— *простой системный анализ*: система рассматривается в виде физической комбинации составляющих элементов;

— *системный анализ системы*: система рассматривается совместно с выбранным в ней процессом, определяются ее параметры и предварительные рассуждения их взаимовлияния;

— *многоступенчатый анализ*: последовательно осуществляется дискретное углубление в систему, при этом каждая подсистема подвергается анализу.

## П л а н

- 2.1. Интересный пример
- 2.2. Основные понятия
- 2.3. Введение в многоступенчатый анализ системы
- 2.4. Состояние проблемы
- 2.5. Многоступенчатый анализ системы
- 2.6. Интересные примеры

### 2.1. Интересный пример

Рассмотрим применение метода многоступенчатого углубления, анализ системы и расчет процесса на примере концентрирования жидкости в барботажном выпарном аппарате (БВА).

На рисунке 2.1 представлена технологическая система барботажного выпаривания с использованием компьютерного управления: управляющий компьютер, установка (с входными и выходными параметрами), включающая топку, и БВА.

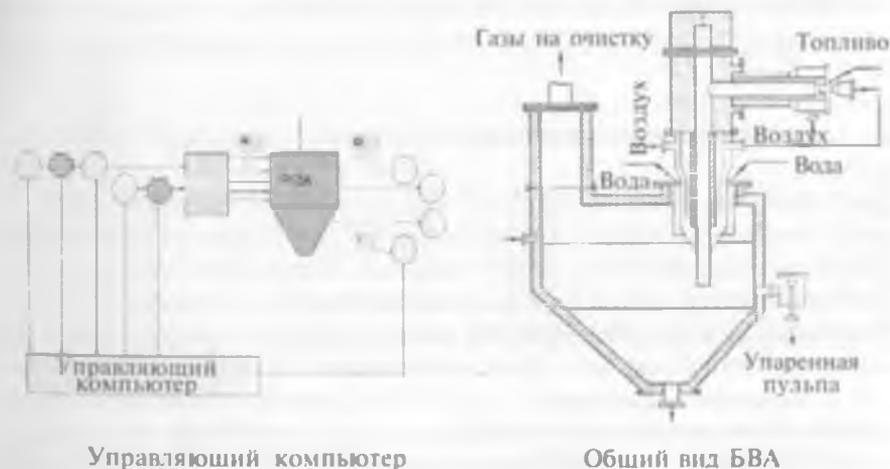
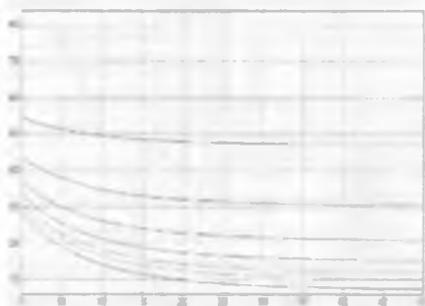


Рис. 2.1. Технологическая система барботажного выпаривания

**Анализ.** При многоступенчатом анализе установка барботажного выпаривания (рис. 2.1) представлена как основная система, где изучением процесса концентрирования выпариваемой жидкости определены ее входные и выходные параметры. Основная выбранная система расчленяется на отдельные системы-элементы: подвода материала; рабочей зоны; элемента отвода концентрированного материала; подготовки и подачи горячего газа. В свою очередь, рабочая зона расчленена также на системы — квазислой барботажной зоны, а каждый квазислой имеет газовую фазу и фазу материала.

**Моделирование.** Компьютерная модель и вид автоматизированного расчета процесса в рабочей зоне подробно рассмотрены в теме 8.

**Расчет.** С помощью данной методики расчета в компьютер вводятся исходные данные процесса концентрирования (расход газа, его температура, расход, температура и концентрация влаги поступающей жидкости) и компьютер за считанные секунды автоматически вычисляет закономерности изменения технологических параметров, все промежуточные и выходные показатели процесса и системы. В частности, температуру, концентрацию высушиваемого материала, теплоемкость, энтальпию, распределение температуры, парциальное давление паров воды, расход водяного пара в газовой фазе, расход выходящего высушиваемого материала и газа и др. На рисунке 2.2 представлены графики динамики пускового периода аппарата, по ним определяются оптимальные условия. Более детально порядок анализа, построения компьютерной модели процессов и выбора оптимальных решений по БВА приведен в теме 8.



Динамика изменения температуры газа по квазислоям барботируемой жидкости



Динамика изменения концентрации (массовой доли) пульпы

Рис. 2.2. Графики динамики пускового периода аппарата

## 2.2 Основные понятия

**Система** — элемент (объект, аппарат, технологическая линия, цех, производство, регион и т. п.), состоящий из упорядоченной совокупности элементов.

**Процесс** — изменение состояния системы.

**Исследуемый процесс** — процесс, к которому обращено внимание исследователя. В системе протекает множество процессов и кроме основного требуется изучение и других процессов.

**Параметры** — показатели (факторы), характеризующие систему и исследуемый процесс.

**Входные параметры** — показатели (факторы), входящие, воздействующие, возмущающие систему и исследуемый процесс.

**Выходные параметры** — выходные показатели (факторы), характеризующие состояние системы и исследуемого процесса.

**Простой системный анализ** — процесс, когда система рассматривается в виде физической комбинации составляющих элементов;

**Системный анализ** — рассмотрение системы совместно с выбранными в ней процессами. Определяются параметры и взаимосвязь основных выходных и входных параметров.

**Метод многоступенчатого системного анализа (МСА)** — анализ с последовательным углублением в систему: рассматриваемая система (элемент) расчленяется на составляющие элементы; уточняются процесс и параметры для выбранного элемента; расчленение элемента (системы) на последующие системы осуществляется по степени необходимости и возможности исследования для принятия решения.

## 2.3. Введение в многоступенчатый анализ системы

В будущем почти все исследования будут выполняться на основе системного анализа. В настоящее время достаточно глубоко изучены вопросы математического моделирования и оптимизации технологических процессов. Развитие компьютеризации и информационных технологий, появление новых методов расчета с использованием нечетких множеств, нейронных сетей, компьютерных программ типа «Матлаб», «Маткад», МВТУ и др. позволяют решать ранее невозможные проблемы математического моделирования и выбора оптимальных решений. Это способствует совершенствованию способов анализа, методологии моделирования процессов и принятию

решений с учетом глубинных явлений и эффектов. Предложенный нами метод многоступенчатого системного анализа позволяет анализировать системы без особых затруднений: первоначально на основе происходящего в системе процесса определяются входные, выходные и другие параметры системы, затем рассматриваемая система (элемент) расчленяется на составляющие элементы, уточняется процесс и его параметры для выбранного элемента. Дальнейшее расчленение элемента (системы) на последующие системы не ограничено, но должно осуществляться по степени необходимости и возможности исследования для принятия решения.

## 2.4. Состояние проблемы

Понятие «*системный анализ*» имеет большую историю. Вначале технологический объект рассматривается как одиная система, в последующем появилось определение макро- и микрокинетики процесса в выбранной системе. Далее исследователями было предложено множество способов и методов системного анализа, направленных на более полное исследование системы, отображая ее и происходящие в ней процессы в мысленных, физических, математических или компьютерных моделях.

С одной стороны, системный анализ способствует выбору и принятию правильных решений, если имеется выборка, то есть множество предложений по принятию решения [9, 10]. С другой стороны, желание рассмотреть одновременно все процессы и проанализировать все варианты привело к сложным ситуациям. Наметились две тенденции развития методов системного анализа:

1) *система рассматривается как совокупность элементов* [9, 3 (доп.), 8 (доп.)]. Первичной является система (элемент), вторичным — процесс. Поиск решений осуществляется путем анализа как бы межсистемных (межэлементных) процессов;

2) *системный анализ процессов*. Например, предлагался [11, 12] системный анализ процессов химической технологии по 5-уровневой физико-химической системе. Желание одновременно охватить все происходящие в системе процессы усложнило задачу.

Нами используется *метод последовательного углубления в систему, или перехода вверх к более широким системам*. Многоступенчатый системный анализ обычно выполняется вглубь рассматриваемой системы, то есть сверху вниз. Необходимо отметить, что процесс происходит в системе. Совместное рассмотрение системы (эле-

мента) и проходящего в ней процесса позволяет определить более правильное решение. Взаимодействие между системами происходит по их параметрам на основе процессов, происходящих в каждой из систем (физических, химических, технологических, экономических, экологических, политических и др.), и из них нужно выбирать только те, которые необходимы для правильного решения задачи.

## 2.5. Многоступенчатый анализ системы

Метод многоступенчатого системного анализа (МСА) позволяет анализировать системы без особых затруднений.

Для анализа системы нами предложена следующая формула:

$$\text{МСА} = 2 + 1,$$

где 2 — совместное рассмотрение системы и протекающего в ней процесса; 1 — все необходимые параметры системы и процесса вместе взятые. Параметры в последующем разделяются на входные и выходные.

*Зная систему и процесс, можно определить параметры, а их сумма позволит осуществить системный анализ.*

Исследуемый объект (аппарат или элемент аппарата, линия, состоящая из нескольких аппаратов, завод и т. д.) принимается за основную технологическую систему (первый иерархический уровень). В основной системе протекает совокупный процесс. Изучая систему и происходящий в ней процесс, определяются входные и выходные параметры. Определение взаимосвязи выходных и входных параметров позволяет провести более правильный анализ и принять решение. Однако принятие решения на ограниченном уровне исследований без продвижения вглубь или вверх системы порой является недостаточно эффективным. Современное развитие науки и техники позволяет проводить анализ и принимать решения с учетом более глубинных элементов и процессов. Можно идти вверх или вниз в глубину системы.

Рассмотрим случай движения в глубину системы. Основная система расчленяется на элементы. Каждый ее элемент называется *системой второго иерархического уровня*. В каждом элементе этой системы рассматривается конкретный процесс и определяются параметры системы.

Нами было рассмотрено определение значимости каждой подсистемы на основе статических и динамических коэффициентов [8].

Система второго иерархического уровня также расчленяется на составляющие элементы. Каждый элемент системы второго уровня называется *системой третьего иерархического уровня*. В каждом элементе такой системы протекают конкретные процессы, определяющие параметры системы данного иерархического уровня. Такое разделение на подсистемы продолжается до возможного глубинного уровня, иногда это атомарно-молекулярные строения.

Нами осуществлен анализ и приняты оптимальные решения по различным технологическим системам:

механического перемешивания, измельчения — на двух, трех иерархических уровнях;

теплообменные — на трех, четырех иерархических уровнях;

дистилляции, сушки, ректификации — на пяти, шести иерархических уровнях;

биотепломассообменные — на шести–девяти иерархических уровнях.

Развитие предлагаемого нами метода последовательно осуществлялось в монографиях и учебных пособиях [2–7].

## 2.6. Интересные примеры

Использование метода многоступенчатого анализа системы дает возможность рассмотреть глубинные явления и получить эффекты предварительного рассмотрения выбранного объекта.

**Пример 1.** Системный анализ процесса экстракции вещества (масла) из твердого тела (жмыха хлопковых семян) в жидкость (растворитель), происходящего в лабораторной пробирке или колбе. В качестве первичной системы можно представить пробирку или колбу для экстрагирования масла — *первый иерархический уровень*. Часть пробирки или колбы заполняется маслячным материалом, куда вливается растворитель.

Входными параметрами являются: масса жмыха; маслячность жмыха; масса растворителя; начальная концентрация масла в растворителе; температура растворителя; время процесса; размеры пробирки. Выходные параметры следующие: изменение во времени массы шрота, маслячности шрота и концентрации мицеллы.

На *втором иерархическом уровне* рассматриваются фазы. В системах твердой и жидкой фаз определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы, изучается взаимное межфазное воздействие процесса экстракции.

На *третьем иерархическом уровне* системы осуществляется анализ процесса экстракции на уровне частицы путем определения входных и выходных параметров.

На *четвертом иерархическом уровне* изучается процесс экстракции в квазислоях частицы. Определяются входные и выходные параметры каждого квазислоя. Составляя компьютерную модель с процессов данного уровня и переходя к вышестоящим, определяются оптимальные решения.

**Пример 2. Системный анализ системы измельчения материалов.** Рассматривается система измельчения — длинная мельница типа шаровой.

На *первом иерархическом уровне* мельница с процессом измельчения в ней рассматривается в виде системы с определенными показателями. Входными параметрами системы являются расход и концентрация сырья, выходными — расход и концентрация измельченных веществ.

На *втором иерархическом уровне* учитывается, что установка состоит из зоны подвода материала, рабочей зоны и зоны отвода продукции.

На *третьем иерархическом уровне* длинную рабочую зону можно представить многоквазиаппаратной.

На *четвертом иерархическом уровне* каждый рассматриваемый квазиаппарат имеет фазу и элемент измельчения. Фаза измельчаемого материала представляется из его частиц. При необходимости в дальнейшем рассматриваются элементы частицы и др.

Во всех выявленных системах определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

**Пример 3. Многоступенчатый анализ трубчатого теплообменника с паровым обогревом.** На *первом иерархическом уровне* рассматривается теплообменник в виде системы с процессом теплообмена в ней, определяются входные и выходные параметры системы.

На *втором иерархическом уровне* учитывается, что установка состоит из элементов подвода нагреваемого и нагревающего агентов, рабочей зоны и зон отвода агентов. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

На *третьем иерархическом уровне* длинную рабочую зону теплообменника можно представить многоквaziаппаратной. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы — квази-аппарата.

На *четвертом иерархическом уровне* каждый квазиаппарат можно представить в виде греющей камеры, стенки трубы и внутренности нагревательной трубы. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

На *пятом иерархическом уровне* греющую камеру можно расчленить на три подсистемы — фазу пара, фазу конденсата, стенку корпуса. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

Таким образом, применение метода многоступенчатого анализа системы дает возможность рассмотреть глубинные подсистемы и явления и позволяет получить результаты для предварительных суждений.

Для выбора более приемлемых решений можно перейти к формализации моделей процессов и систем каждого иерархического уровня и затем всей системы в целом. Это даст возможность рассмотреть глубинные явления исследуемой технологической системы и принять более правильное решение.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой система?
2. Что называется процессом?
3. Что подразумевает исследуемый процесс?
4. Что такое параметры?
5. Что подразумевается под входными параметрами?
6. Что подразумевается под выходными параметрами?
7. Что означает простой системный анализ?
8. Что означает системный анализ?
9. Что означает многоступенчатый системный анализ (МСА)?
10. Какие примеры решаются путем анализа ТС?
11. Какие примеры решаются путем синтеза ТС?
12. Что такое технологическая система?
13. Что означает моделирование?
14. Что такое иерархическая структура?
15. Как строятся математические модели?
16. Что означает автоматизированный расчет?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 2

1. Интересным примером разъясняется осуществление анализа системы, моделирования и автоматизированного расчета технологического процесса.

2. Раскрывается методика системного анализа путем введения трех основных этапов синтеза оптимальных систем в химической технологии. На основе современных достижений науки и техники рекомендован подход многоступенчатого анализа, моделирования, принятия решений, выбора оптимальных систем с учетом глубинных явлений и эффектов. Это открывает возможность формализации компьютерных моделей, которые исследователь будет использовать как простой аппарат, дающих конкретные решения при введении исходных данных. Исследователь сможет без особого труда и быстро рассчитать исследуемый технологический процесс и выбрать оптимальные системы.

3. Рассматривается состояние проблемы системного анализа, приводится сравнение многоступенчатого анализа с существующими методами.

4. Приводится формула для системного анализа и разъясняются три этапа последовательности выполнения анализа систем в химической технологии.

5. Поясняется методика выполнения многоступенчатого системного анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Artikov Asqar*. Multi-step method of computer model formalization with fuzzy sets application. WCIS-2004, world conference on intelligent systems for industrial automation. — Tashkent. 2004. TSTU.

2. *Артиков А., Маматкулов А. Х., Додаев К. О., Яхшимурадова Н. К.* Системный анализ концентрирования растворов инертным газом. — Т.: «Фан». 1987. 164 с.

3. *Артиков А., Остапенков А. М., Курбанов Дж. М., Саламов Х. Т.* Электрофизические методы воздействия на пищевые продукты. — Т.: «Фан». 1992.

4. *Артиков А., Маматкулов А. Х., Хамидов Н. И.* Анализ и синтез биотепломассообменных процессов. — Т.: «Фан». 1994.

5. *Артиков А., Маматов И., Яхшимуронова Н.* Анализ воздействия активной воды при тепловой обработке продуктов питания. — Т.: «Фан». 1994.

6. *Артиков А., Додаев К. О., Акбаров А. Х., Рустамов Б. Т.* Анализ и синтез процессов переработки томатов. — Т.: «Укитувчи». 1997.

7. *Артиков А.* Компьютерные методы анализа и синтеза химико-технологических систем. Электронный учебник. — Т.: ТКТИ. 2010.

8. *Артиков А. А.* Процессы и аппараты пищевых производств (математическое моделирование, теплообменные процессы (применение)). — Т.: «Укитувчи». 1983.



9. *Моисеев П. П.* Математические задачи системного анализа. — М.: «Наука». 1981. 490 с.
10. *Спицнадель В. Н.* Основы системного анализа. Учебное пособие. — СП-б.: ИД «Бизнес-пресса». 2000. 326 с.
11. *Кафаров В. В., Дорохов И. Н.* Системный анализ процессов химической технологии. — М.: «Наука». 1976. 500 с.
12. *Гартман Т. Н.* Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. — М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. 416 с.
13. <http://victor-safronov.narod.ru/systems-analysis/papers/to-question-of-systems-analysis-development.html>. *Артыков А.* К вопросу развития системного анализа на примере технологических объектов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Антонов А. В.* Системный анализ. — М.: «Высшая школа». 2004. 454 с.
2. *Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдин Э. Г.* Проблемы методологии системного анализа. — М.: «Наука». 1970. 456 с.
3. *Волкова В. Н., Денисов А. А.* Основы теории систем и системного анализа. — СП-б.: СП-БГТУ. 1997. 510 с.
4. *Качала В. В.* Основы теории систем и системного анализа. Учебное пособие для вузов. — М.: «Горячая линия—Телеком». 2007. 216 с.
5. *О'Коннор, Макдермотт П.* Искусство системного мышления: необходимые знания о системах и творческом подходе к решению проблем. — М.: «Альпина Бизнес Букс». 2006. 256 с.
6. *Перегудов Ф. П., Тарасенко Ф. П.* Введение в системный анализ. — М.: «Высшая школа». 1989. 367 с.
7. *Садовский В. Н.* Системный анализ в экономике и организации производства / Под ред. С. А. Валуева, В. Н. Волкова, А. П. Градова и др. — Л.: «Политехника». 1991. 398 с.
8. Системный анализ и принятие решений. Словарь-справочник. Учебное пособие для вузов / Под ред. *В. Н. Волковой, В. Н. Козлова*. — М.: «Высшая школа». 2004. 616 с.
9. Системный подход в современной науке (к 100-летию Людвиг фон Бергаланфи). — М.: «Прогресс-Традиция». 2004. 560 с.
10. *Сурмин Ю. П.* Теория систем и системный анализ. Учебное пособие. — К.: МАУП. 2003. 368 с.
11. Теория систем и системный анализ в управлении организациями. Справочник. / Под ред. *В. Н. Волковой, А. А. Емельянова*. — М.: «Финансы и статистика». 2006. 848 с.
12. *Хомяков П. М.* Системный анализ: краткий курс лекций. /Под ред. *В. П. Прохорова*. — М.: «КомКнига». 2006. 216 с.
13. *Черняк Ю. П.* Анализ и синтез систем в экономике. — М.: «Экономика». 1970. 151 с.

## Т Е М А 3. К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Цель темы — обратить внимание магистранта на вопросы моделирования технологических процессов и систем. Тема расширена введением нового метода многоступенчатого моделирования процессов и систем.

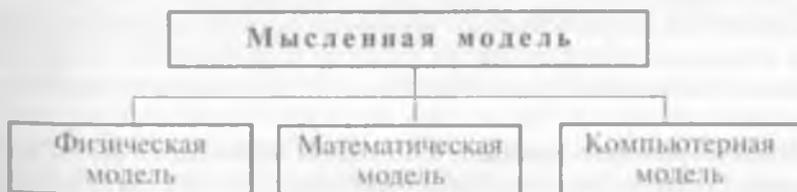
Дорогой магистрант, Вы получили универсальный ключ системного анализа — подход к многоступенчатому анализу — и можете использовать его при моделировании, принятии решения в выборе оптимальной системы с учетом глубинных явлений и эффектов, на которые Вы можете спуститься. Из бакалаврского курса Вы знакомы со способами моделирования. В данной теме, развивая Ваши понятия о моделях, обращаем внимание на новые вопросы формализации математических моделей. Для этого разработаны компьютерные модели, с помощью которых Вы сможете быстро рассчитать исследуемый технологический процесс и выбрать оптимальную систему.

### П л а н

- 3.1. Основные понятия
- 3.2. Требования, предъявляемые к моделированию
- 3.3. Способы математического и компьютерного моделирования процессов и систем
- 3.4. Многоступенчатый подход к формализации компьютерной модели
- 3.5. К вопросу синтеза оптимальной системы

### 3.1. Основные понятия

**О моделях и моделировании.** Модели используются для принятия правильного решения. Предложено множество видов модели, отображающих оригинал по тем или другим требованиям. Желательно различать следующие модели:



Исследование процессов в действующих заводских аппаратах требует значительных затрат, и оно не всегда выполнимо. Поэтому изучать процессы рекомендуется на моделях, соответствующих на данном этапе оригиналу.

*Построив модель, исследователь может:*

- прогнозировать свойства и поведение объекта как внутри области, в которой построена модель, так и (при обоснованном применении) за ее пределами (прогнозирующая роль модели);
- управлять объектом, отбирая наилучшие воздействия путем испытания их на модели (управляющая роль);
- познавать явление или объект, модель которого он построил (познавательная роль модели);
- получать навыки по управлению объектом путем использования модели как тренажера или игры (обучающая роль);
- улучшать объект, изменяя модель и испытывая ее (проектная роль).

**Оригинал** — действующая (заводская или другая) система (исследуемый элемент): объект, установка, аппарат и т. п., модель — упрощенная в нужном направлении его копия. Если между двумя объектами установлено сходство хотя бы в одном определенном смысле, то между ними существуют отношения оригинала и модели.

**Мысленная модель** — главная модель, так как окончательное решение принимается человеком. Все остальные модели помогают получению мыслительного решения.

**Модель** (лат. *modulus* — образ, *modellium* — мера) — это объект, информационное отображение объекта, заменитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала.

**Моделирование** — метод изучения процессов и аппаратов, где вместо оригинала исследуется его модель, и результаты распространяются на оригинал; замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели.

**Физическая модель** — физическое отображение оригинала (иногда сам оригинал), воспроизведение оригинала в других масштабах (обычно в меньших). Полученные результаты переносятся с модели на оригинал с помощью теории подобия, определяющей подобность явлений.

**Математическая модель** (отображение оригинала языком математики) — это математические выражения с разработанной после-

довательностью (алгоритмом), позволяющие судить о необходимых для поставленной задачи особенностях поведения объекта.

**Компьютерная модель** — отображение оригинала на компьютере с выдачей цифровой или иной информации для выбора правильного решения. Необходимо логически понимать систему, процесс и параметры.

**Адекватность модели.** Поскольку модель является выражением конечного ряда и только важнейших для конкретного исследования аспектов сущности, она не может быть абсолютно идентичной моделируемому объекту. Кроме того, реальный объект бесконечен для познания, поэтому нет смысла стремиться к бесконечной точности при построении модели. Для выяснения необходимой степени адекватности обычно строят ряд моделей, начиная с грубых, простых моделей и двигаясь ко все более сложным и точным. Как только затраты на построение очередной модели начинают превышать планируемую отдачу от модели, уточнение модели прекращают. Имеется множество вариантов приближения к адекватной модели. Используют методы графического или среднеквадратичного отклонения или в зависимости от характера объекта и способа моделирования можно использовать методы согласованности типа Колмагорова, Фишера, Пирсона и др. Многоступенчатый анализ определяет большую точность модели при использовании метода определения многоступенчатой согласованности результатов.

### 3.2. Требования, предъявляемые к моделированию

*К моделированию предъявляются следующие требования:*

- 1) опыты на модели должны проводиться быстрее, быть более простыми, удобными, экономичными и безопасными, чем опыты на оригинале;
- 2) должны быть однозначные правила перевода результатов моделирования на оригинал;
- 3) структура, устройство и назначение модели должны соответствовать основным целям моделирования.

При изучении несложных процессов и расчете аппаратов (гидравлических, гидромеханических процессов) использование метода физического моделирования дает большой эффект. С усложнением же процессов (тепловые, особенно теплообменные) выявление подобности явлений стало более трудоемким, увеличилось чис-

ло неучтенных факторов, резко возросло количество критериев подобия. Расхождение между оригиналом (промышленной установкой) и лабораторной физической моделью было значительным, поэтому появилась необходимость разработки промежуточной модели (полупромышленной установки). В основе физического моделирования лежит теория подобия, которая утверждает, что абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим точно таким же. При моделировании абсолютное подобие не имеет места, поэтому стремятся к тому, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функционирования объекта. Физическое моделирование дало возможность разработать эмпирические уравнения различных коэффициентов, учитывающие конвективность обмена (теплообмена, массообмена, переноса и т. п.).

Новый качественный скачок в изучении и развитии науки о процессах и аппаратах дал метод математического моделирования, который отличается экономичностью, безопасностью, большим диапазоном изменения исследуемых параметров. Развитие использования вычислительной техники резко увеличило быстроту расчетов, простоту и удобство математического моделирования.

### 3.3. Способы математического и компьютерного моделирования процессов и систем

*Различают следующие способы математического моделирования:*

— **аналитический**. Математические описания получают в результате чисто аналитических исследований процесса и его элементов. Данный способ отличается глубиной представления о процессе, но математическое описание элементов процесса не всегда можно формализовать аналитическим путем. При моделировании технологических процессов и систем исследователь вынужден обращаться к экспериментальным данным;

— **аналитико-экспериментальный**. К аналитической модели вводятся математические описания, полученные экспериментальным путем. При изучении процессов имеются некоторые коэффициенты и выражения (например, коэффициенты гидродинамического сопротивления, теплоотдачи, массоотдачи и т. д.), определить которые очень сложно или почти невозможно. В таких случаях применение эмпирических математических описаний упрощает математическое моделирование и в большинстве случаев сохраняет гибкость и глубину аналитического исследования;

— *экспериментальный*. Издавна использовался способ математического описания процессов экспериментальным путем, заключающийся в формализации уравнений эмпирического и других видов. В последнее время увеличивается компьютерное представление экспериментальных результатов, в частности, применением искусственных нейронных сетей. В большинстве случаев математические описания составляются экспериментальным путем с использованием методов статистической математики. Получается как бы модель внешности процесса, заключенного в аппарате, то есть, представляя аппарат в виде черного ящика, выявляют взаимосвязи выходных и входных параметров без глубокого изучения проходящих внутри аппарата процессов.

Экспериментальный метод моделирования простой и экономичный. Он широко применяется в кибернетике, но редко используется при изучении процессов химической технологии. Для более глубокого исследования процессов и аппаратов пищевой технологии более приемлемы аналитические и аналитико-экспериментальные способы моделирования.

Основа составляющей математической модели (м. м.) — математическое описание, которое может быть задано с помощью функциональных зависимостей, графиков, таблиц, кривых и других математических выражений.

Совокупность математических описаний объединяется под общим алгоритмом решения и производится решение математической модели. Решение сопоставляется с результатами на оригинале или физической модели и выявляется степень их соответствия, то есть устанавливается адекватность модели.

Таким образом, математическое моделирование имеет следующие основные этапы: системный анализ (изучение процесса и синтеза, определение параметров); формализация математического описания; разработка алгоритма решения; установление адекватности.

При формализации математической модели аналитическим или аналитико-экспериментальным способом большое значение имеет определение иерархического распределения систем и процессов. На основе МСА основной технологический элемент разделяется на элементарные элементы, его составляющие, а каждый из них — на еще меньшие элементарные элементы (ниже по иерархической лестнице). При необходимости элементарные элементы можно разделять до уровня атомарных превращений.

Составление математического описания начинается от глубинного элементарного процесса. Анализируя, упрощая и объединяя мате-

математические описания элементарных процессов по разрабатываемому алгоритму решения, можно формализовать математическое описание вышестоящего процесса и т. д.

При составлении математической модели последовательно, в зависимости от сложности задачи, используются уравнения: а) материального баланса; б) теплового баланса; в) гидродинамические; г) физико-химических превращений (теплообмена, массообмена, изменения агрегатного состояния). Такая последовательность четко соблюдается при составлении статической математической модели аппаратов с сосредоточенными параметрами.

При построении математической модели динамики процесса или аппаратов с распределенными параметрами с учетом гидродинамической структуры потоков уравнения могут быть объединены в общие уравнения, особенно если процесс сопровождается перемещением массы.

Для составления алгоритма решения более приемлем блочный метод решения уравнений (особенно при решении задачи на ЭВМ).

В зависимости от формы представления объекта (системы) аналитическая модель может быть исследована следующими способами:

— *аналитико-функциональным*, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости для искомым характеристик;

— *численным*, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных;

— *качественным*, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения). В отдельных случаях исследования системы могут удовлетворить и те выводы, которые можно сделать при использовании качественного метода анализа математической модели, например, влияние погодных условий на качество продукта и др. Такие качественные методы широко используются, например, в теории автоматического управления для оценки эффективности различных вариантов систем управления.

### 3.4. Многоступенчатый подход к формализации компьютерной модели

Моделирование начинается с формирования предмета исследований — системы понятий, отражающей существенные для моделирования характеристики объекта. Эта задача является достаточно сложной, что подтверждается различной интерпретацией в научно-тех-

нической литературе таких фундаментальных понятий, как система, модель, моделирование. Подобная неоднозначность не означает ошибочность одних и правильность других терминов, а отражает зависимость предмета исследований (моделирования) как от рассматриваемого объекта, так и от целей исследователя. Отличительной особенностью моделирования сложных систем являются его многофункциональность и многообразие способов использования; оно становится неотъемлемой частью всего жизненного цикла системы. Объясняется это, в первую очередь, технологичностью моделей, реализованных на базе средств вычислительной техники: достаточно высокой скоростью получения результатов моделирования и их сравнительно невысокой себестоимостью.

Многоступенчатый подход имеет существенный эффект при формализации компьютерной модели. После осуществления многоступенчатого анализа системы он заключается в следующем:

1. Анализ и формализация математических описаний начинается с системы и процессов выбранного иерархического уровня.

2. Для процессов выбранного глубинного иерархического уровня формализуются математические описания, разрабатывается алгоритм расчета и создается компьютерная модель процесса данного подуровня. Балансовые уравнения формализуются из простых дифференциальных уравнений первого порядка, а коэффициенты, характеризующие скорость преобразований атомарно-молекулярных структур и другие физико-химические, физические, химические показатели, определяются экспериментально с включением методов, например, нечетких множеств или использования компьютерных прикладных программ и др.

3. На следующем этапе, агрегируя полученные алгоритмические блоки нижестоящего уровня (с учетом взаимосвязей рассмотренных компьютерных моделей процессов), формализуются математические описания и компьютерные модели процессов следующего вышестоящего уровня и т. д. При агрегировании компьютерных моделей процессов нами предложено упрощение моделей по коэффициентам усиления сигнала и инерционности объекта [3].

4. В конечном итоге операция завершается объединением всех компьютерных программ. Это позволяет произвести формализацию компьютерной модели процессов рассматриваемой основной системы.

5. Проведением экспериментов на физической модели осуществляются корректировка модели и проверка ее на адекватность. Модель, имеющая удовлетворительную согласованность с оригиналом, считается достоверной и готовой к проведению исследований на ней.

### 3.5. К вопросу синтеза оптимальной системы

Под оптимизацией понимают выбор самого приемлемого решения из множества вариантов решений. Иногда такие варианты имеются, иногда нет. Тогда приходится последовательно, шаг за шагом, находить или вычислять решения и направляться в сторону оптимального решения. Использование компьютерных моделей позволяет проводить вычислительные эксперименты. Поиск оптимального решения осуществляется путем последовательного приближения к оптимальной точке. Рекомендуется следующий порядок поиска оптимального решения:

— *постановка задачи оптимизации.* Это главная часть определения проблемы оптимизации. Использование многоступенчатого анализа системы позволяет произвести многоступенчатую оптимизацию процессов начиная с глубинных подсистем;

— *выбор критерия оптимизации.* Здесь, как правило, исходят из дохода предприятия.

$$D_{\text{доход}} = (C - C_3) \cdot B_{\text{изд}} \rightarrow \max,$$

где  $C$  — цена продукции;  $C_3$  — себестоимость продукции;  $B_{\text{изд}}$  — количество продукции.

Дальнейший анализ критерия оптимизации показывает, что этот фактор требует анализа влияний ее составляющих. Однако в большинстве случаев инженерного расчета цена продукции ( $C$ ) принимается постоянной, тогда требуется уменьшение себестоимости продукции или увеличение производительности системы. Исходя из этого принимаются критерии из числа показателей процесса и системы (например, концентрация вещества, температура, расход, коэффициенты, используемые при расчете процесса, и др.), направленные на уменьшение себестоимости продукции или увеличение производительности системы;

— *формализация функции цели.* На основе компьютерной модели формализуются математические выражения или компьютерные отображения, позволяющие осуществить расчет критериев оптимизации;

— *выбор метода оптимального решения.* Предлагается множество методов нахождения оптимального решения. В большинстве случаев расчет критериев оптимизации по компьютерным моделям можно провести по методу направленного случайного поиска;

— *решение задачи оптимизации.* На основе функции цели осуществляется расчет и выбирается самое оптимальное решение.

*Ключевые слова:* аналитический, экспериментальный метод моделирования; построение математической модели; алгоритм; параметры; адекватность; иерархическая структура; процесс; конструктивные параметры; оптимизация.

### Контрольные вопросы

1. Что такое физическая модель?
2. Что такое математическая модель?
3. Что такое компьютерная модель?
4. Что такое оригинал?
5. На какие этапы подразделяется математическое моделирование?
6. Что означает алгоритм моделирования?
7. Что представляет собой многоступенчатая формализация математической модели?
8. Какие уравнения используются при составлении математической модели?
9. Что означает блочный принцип?
10. Каковы недостатки и преимущества модели?
11. Что такое постановка задачи оптимизации?
12. Что подразумевает выбор критерия оптимизации?
13. Что такое формализация функции цели?
14. Что подразумевает выбор метода оптимального решения?
15. Что такое решение задачи оптимизации?

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 3

1. Развивается понятие о моделях и способах моделирования технологического процесса и системы.
2. Указываются требования, предъявляемые к моделированию. Приводятся характеристики способов моделирования.
3. Разъясняется новый подход — многоступенчатый способ формализации компьютерной модели.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Артиков А. А., Маматкулов А. Х., Хачидов Н. И.* Анализ и синтез био-тепломассообменных процессов. — Т.: «Фан». 1994.
2. *Артиков А. А., Маматов И., Яхшимуродова Н. К.* Анализ воздействия активной воды при тепловой обработке продуктов питания. — Т.: «Фан». 1994.
3. *Артиков А. А.* Процессы и аппараты пищевых производств (математическое моделирование, теплообменные процессы, выпаривание). — Т.: «Укипувчи». 1983.
4. *Гартман Т. И.* Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. — М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. 416 с.

5. Дворецкий С. И., Ежров А. Ф., Дворецкий Д. С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов. ГГТУ. 2003. 224 с.

6. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.

7. Холоднов В. А., Дьяконов В. П., Иванова Е. Н., Кирьянова Л. С. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов. — М.: «Профессионал, мир и семья». 2004.

8. <http://victor-safronov.narod.ru/systems-analysis/papers/to-question-of-systems-analysis-development.html>. А. Артыков. К вопросу развития системного анализа на примере технологических объектов.

## **Т Е М А 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ**

Цель темы — ознакомление с относительно простым способом моделирования. Статистические способы широко используются в практике, однако они применимы в определенно выбранных пределах изменения параметров.

Дорогой магистрант, изучая тему. Вы научитесь использовать уже знакомые Вам статистические методы при составлении математических описаний глубинных явлений и эффектов, требующих экспериментальных подходов, а также при моделировании технологических процессов и выборе оптимальной технологической системы.

### **П л а н**

4.1. Интересный пример

4.2. Основные понятия

4.3. О формализации статистических моделей процессов технологических систем

4.4. Интересные примеры по определению эмпирических уравнений

4.5. О планировании эксперимента

### **4.1. Интересный пример**

Новые компьютерные прикладные программы намного облегчают составление моделей. Приводим пример математического выражения равновесного состояния между фазами статистическим методом.

В некоторых случаях при моделировании процесса дезодорации приходится проводить оперативные числовые эксперименты с заранее заданной точностью. В таких случаях целесообразно выразить взаимосвязь и зависимость параметров равновесного состояния, полученных экспериментальным или аналитическим методом, при помощи уравнений в степени  $n$ , то есть полиномов. Общий вид полинома в степени  $n$  имеет вид:

$$y = a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_{n-1}x^2 + a_nx + a_{n+1}.$$

Для выражения равновесного состояния смеси жирных кислот хлопкового масла в процессе дезодорации с помощью полиномов ниже приведен метод быстрого вычисления с высокой точностью их коэффициентов при помощи компьютерной программы «Matlab».

Установлено, что для равновесного состояния смесей жирных кислот «Лаурин-пальмитин» при давлении 1 кПа коэффициенты полиномов в степени 10 равны показателям, приведенным на рис. 4.1.

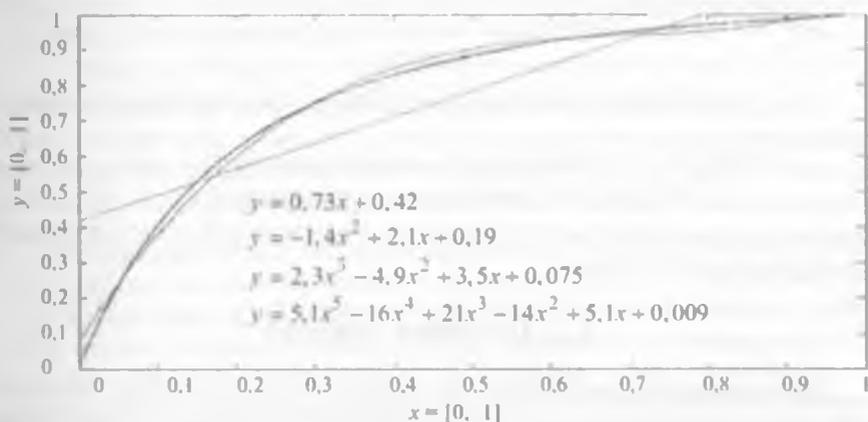


Рис. 4.1. График равновесного состояния смесей жирных кислот «Лаурин-пальмитин» при давлении 1 кПа

Из графика видно, что при моделировании кривой равновесной концентрации с использованием многочленных полиномов в степени  $n$ , то есть при выявлении математической функциональной зависимости с использованием компьютера, с увеличением степени уравнения растет также точность описания действительного процесса. Также верно и обратное: при большем упрощении уравнений, то есть с уменьшением их степени, растет уровень ошибок. При использовании простейшего уравнения линейной функции первой степени ошибка стала значительной.

5. Дворецкий С. И., Егоров А. Ф., Дворецкий Д. С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов. ГГТУ. 2003. 224 с.

6. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.

7. Холоднов В. А., Дьяконов В. П., Иванова Е. Н., Кирьянова Л. С. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов. — М.: «Профессионал, мир и семья». 2004.

8. <http://victor-safronov.narod.ru/systems-analysis/papers/to-question-of-systems-analysis-development.html>. А. Артыков. К вопросу развития системного анализа на примере технологических объектов.

## **Т Е М А 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ**

Цель темы — ознакомление с относительно простым способом моделирования. Статистические способы широко используются в практике, однако они применимы в определенно выбранных пределах изменения параметров.

Дорогой магистрант, изучая тему, Вы научитесь использовать уже знакомые Вам статистические методы при составлении математических описаний глубинных явлений и эффектов, требующих экспериментальных подходов, а также при моделировании технологических процессов и выборе оптимальной технологической системы.

### **П л а н**

- 4.1. Интересный пример
- 4.2. Основные понятия
- 4.3. О формализации статистических моделей процессов технологических систем
- 4.4. Интересные примеры по определению эмпирических уравнений
- 4.5. О планировании эксперимента

### **4.1. Интересный пример**

Новые компьютерные прикладные программы намного облегчают составление моделей. Приводим пример математического выражения равновесного состояния между фазами статистическим методом.

В некоторых случаях при моделировании процесса дезодорации приходится проводить оперативные числовые эксперименты с заранее заданной точностью. В таких случаях целесообразно выразить взаимосвязь и зависимость параметров равновесного состояния, полученных экспериментальным или аналитическим методом, при помощи уравнений в степени  $n$ , то есть полиномов. Общий вид полинома в степени  $n$  имеет вид:

$$y = a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_{n-1}x^2 + a_nx + a_{n+1}.$$

Для выражения равновесного состояния смеси жирных кислот хлопкового масла в процессе дезодорации с помощью полиномов ниже приведен метод быстрого вычисления с высокой точностью их коэффициентов при помощи компьютерной программы «Matlab».

Установлено, что для равновесного состояния смесей жирных кислот «Лаурин–пальмитин» при давлении 1 кПа коэффициенты полиномов в степени 10 равны показателям, приведенным на рис. 4.1.

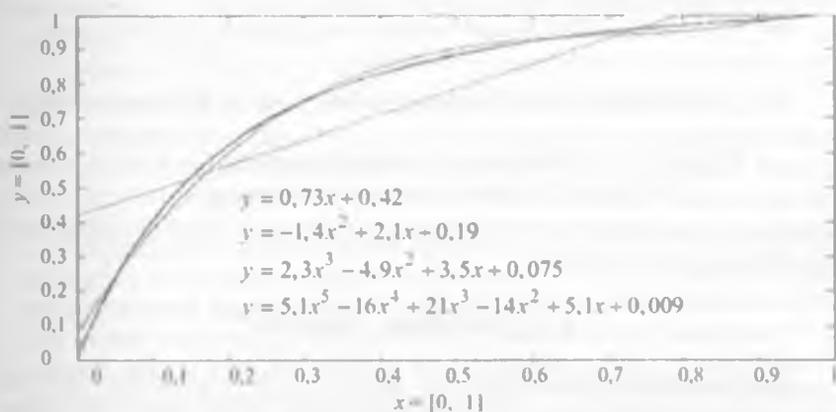


Рис. 4.1. График равновесного состояния смесей жирных кислот «Лаурин–пальмитин» при давлении 1 кПа

Из графика видно, что при моделировании кривой равновесной концентрации с использованием многочленных полиномов в степени  $n$ , то есть при выявлении математической функциональной зависимости с использованием компьютера, с увеличением степени уравнения растет также точность описания действительного процесса. Также верно и обратное: при большем упрощении уравнений, то есть с уменьшением их степени, растет уровень ошибок. При использовании простейшего уравнения линейной функции первой степени ошибка стала значительной.

Вид зависимости  $Y = f(X_1, X_2, X_m)$  может быть различным, однако обычно это полином:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_m \cdot X_m.$$

где  $a_i$  — коэффициенты полинома;  $X_i$  — изменяемые факторы;  $m$  — количество факторов.

Коэффициенты полинома  $a_i$ , при которых сумма квадратов разностей экспериментальных ( $Y_i^{\text{э}}$ ) и расчетных ( $Y_i^{\text{р}}$ ) значений будет минимальна, могут быть рассчитаны с использованием различных математических методов (решение системы линейных уравнений, минимизации и т. п.):  $\sum_{i=1}^m (Y_i^{\text{э}} - Y_i^{\text{р}})^2 \rightarrow \min$

Следует отметить, что метод наименьших квадратов достаточно широко используется при обработке экспериментальных данных, так как позволяет не только определять параметры полиномиальных зависимостей, описывающих работу объекта и не имеющих физического смысла, но и уточнять параметры физико-химических моделей.

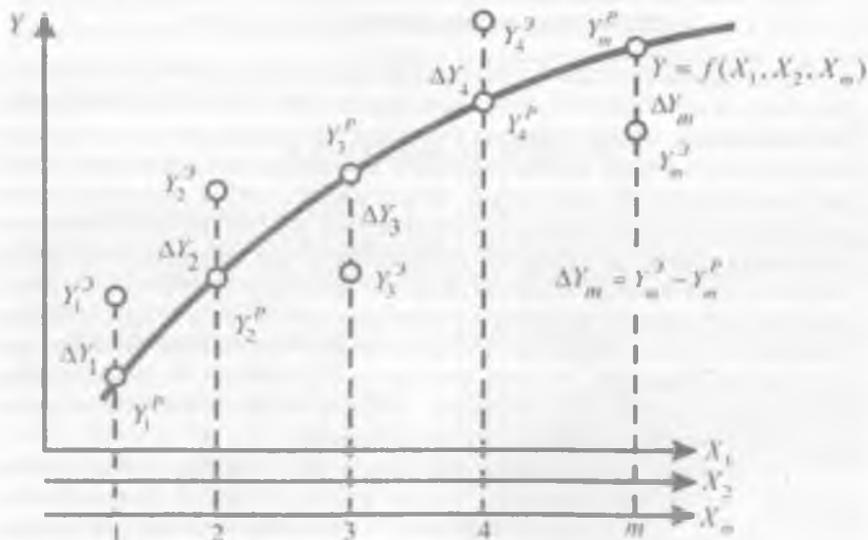


Рис. 4.3. Иллюстрация метода наименьших квадратов

#### 4.4. Интересные примеры по определению эмпирических уравнений

При расчете коэффициента теплопередачи используются коэффициенты теплоотдачи [38], зависящие от параметров движения потока горячего и холодного теплоносителей, которые можно рассчитать по критериальным зависимостям, являющимся разновидностями физико-химических моделей:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}; \quad Nu = A \cdot Re^B \cdot Pr^C \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^D,$$

где параметры  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  находятся путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

В качестве другого примера можно привести уравнение зависимости константы скорости химической реакции паровой конверсии монооксида углерода для железохромовых катализаторов в интервале температур 400–500°C, лежащей в основе физико-химической модели реактора:

$$\lg k_C = \frac{34000}{4,57 T} + 10,2,$$

где значения коэффициентов «34000», «4,57» и «10,2» также были найдены путем обработки данных эксперимента по изучению кинетики паровой конверсии монооксида углерода методом наименьших квадратов.

#### 4.5. О планировании эксперимента

Обычно к статистическим относят модели, полученные обработкой данных активного (факторного) или пассивного эксперимента на реальном объекте или с помощью адекватной модели. В случае активного факторного эксперимента, если наблюдаются линейные зависимости между выходными и входными переменными, используются планы первого порядка: полный факторный эксперимент (ПФЭ) и дробный факторный эксперимент (ДФЭ). Если зависимости между выходными и входными переменными активного факторного эксперимента имеют явно нелинейный характер, то для получения математического описания объекта используют композиционные планы второго порядка, например, ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП). При обработке данных

пассивного эксперимента получают регрессионное уравнение, сложность которого определяется в зависимости от сложности объекта, количества исходных данных и требуемой точности.

ПФЭ по сравнению с пассивными статистическими методами получения математического описания модели имеет преимущество в том, что позволяет при минимальном количестве опытов получить максимум информации об объекте. Однако ПФЭ в основном применяется для получения статистической модели объекта на основе его физико-химической модели или в случае, если на установке имеется возможность планировать изменение технологических режимов без ущерба для производства. Еще одним условием использования ПФЭ являются существенность и взаимная независимость исходных параметров.

В общем виде уравнение регрессии объекта может быть представлено с помощью полинома:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_m \cdot X_m,$$

где  $a_i$  — коэффициенты полинома;  $X_i$  — изменяемые факторы;  $m$  — количество факторов.

В ПФЭ все факторы варьируются на двух уровнях: верхнем (обозначается «+1») и нижнем (обозначается «-1»). При проведении экспериментов реализуются всевозможные комбинации факторов на выбранных уровнях.

При обработке результатов ПФЭ определяются коэффициенты регрессионного уравнения, дисперсия адекватности, дисперсия среднего, критерий Фишера, по которому определяется адекватность регрессионного уравнения, и т. д. По окончании обработки данных делается вывод об адекватности модели. Если модель неадекватна, то, например, изменяют исходные данные, вид регрессионного уравнения и проводят обработку заново. Однако методы обработки данных активного эксперимента не всегда применимы для создания моделей процессов технологических систем на основании производственных данных, так как в условиях реальной промышленной установки достаточно сложно соблюсти требуемые интервалы варьирования параметров, заданные в плане. Именно поэтому наибольшее распространение для создания статистических моделей модулей технологических систем получили методы обработки производственных данных методом пассивного эксперимента. Для получения статистической модели на основе обработки данных пассивного эксперимента сбор данных производят с действующей установки.

Расчет коэффициентов регрессионного уравнения  $b_j$  осуществляется методом наименьших квадратов. После вычисления коэффициентов регрессии переходят к статистическому анализу этого уравнения, который включает следующие этапы:

- оценка адекватности модели (способность достоверно описывать функцию отклика);
- оценка значимости факторов, входящих в уравнение регрессии.

Проверка адекватности регрессионного уравнения осуществляется с помощью критерия Фишера ( $F_P$ ) по условию:

$$F_P \geq F_{\text{табл. [4.35]}}$$

$$\text{где } F_P = \frac{\max(S_{\text{ад}}^2, S_{\bar{y}}^2)}{\min(S_{\text{ад}}^2, S_{\bar{y}}^2)}$$

$$\text{где } S_{\bar{y}}^2 \text{ — дисперсия среднего; } S_{\bar{y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{эксп}} - \bar{y}_i)^2}{N-1};$$

$$S_{\text{ад}}^2 \text{ — дисперсия адекватности; } S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{эксп}} - y_i^{\text{расч}})^2}{N-m}$$

где  $N$  — количество экспериментальных точек;  $m$  — число коэффициентов регрессии в уравнении, включая свободный член.

Таким образом, чем больше будет массив исходных данных, собранных в таблице (величина  $N$ ), и проще вид регрессионного уравнения (величина  $m$ ), тем выше вероятность того, что получаемое уравнение регрессии будет адекватно. Следует отметить, что в соответствии с принципами статистики недопустимы попытки получения сложного уравнения регрессии по небольшому количеству экспериментальных данных, например, расчет уравнения линии по одной точке или параболы — по двум, то есть всегда должно соблюдаться условие:  $N > m$ .

Оценка значимости факторов, используемых при описании функции отклика, осуществляется с помощью критерия Стьюдента ( $t_P$ ) по условию:

$$t_P < t_{\text{табл.}}$$

$$t_P = \frac{|b_j|}{\delta_{b_j}^2}, \text{ где } b_j \text{ — коэффициент регрессии при оцениваемом факторе;}$$

$\delta_{b_j}^2$  — среднеквадратическое отклонение коэффициента регрессии.

Обычно величина критерия Стьюдента находится в пределах 2–4, поэтому если среднеквадратическое отклонение коэффициента регрессии будет существенно больше величины самого коэффициента регрессии (по модулю), то данный коэффициент считается незначимым и может быть исключен из уравнения регрессии. После исключения всех незначимых членов уравнение регрессии приобретает новый вид. Следовательно, на следующем шаге необходимо будет заново оценить коэффициенты регрессии и проверить их значимость. Данный цикл операций производится до тех пор, пока не будет получено адекватное регрессионное уравнение, все факторы которого являются значимыми.

*Ключевые слова:* статистический материал; пассивный эксперимент; активный эксперимент; регрессионный анализ; корреляционный анализ; регрессионное уравнение; метод наименьших квадратов; коэффициент корреляции; линейная регрессия; программа расчета; однородность дисперсии; критерий Кохрена; критерий Стьюдента; адекватность регрессионного уравнения; критерий Фишера.

#### **Контрольные вопросы**

1. Какие модели относятся к статистическим?
2. В чем заключается особенность физико-химических моделей?
3. Как можно составить эмпирические уравнения?
4. Как осуществляется проверка адекватности регрессионного уравнения?
5. В чем суть расчета коэффициентов регрессионного уравнения методом наименьших квадратов?
6. Каким критерием определяется адекватность уравнения регрессии?
7. В чем сущность критерия Фишера; Стьюдента?
8. Каким способом находят коэффициенты уравнения регрессии?
9. Как определяется кривая регрессии и выбирается уравнение?

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 4**

1. На основе интересного примера показан более усовершенствованный подход к построению регрессионных уравнений на компьютере.
2. Дано краткое разъяснение экспериментальных методов математического моделирования.
3. На примерах разъяснено построение регрессионных уравнений и рассмотрены методы установления адекватности компьютерной модели реальному процессу.
4. Дано краткое напоминание о планировании активных и пассивных экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.
2. Артиков А. А. и др. Системный анализ концентрирования растворов инертным газом. — Т.: «Фан». 1987.
3. Маматкулов О.А. Пахта мойи ег кислотатарини десорбциялаш жа раенини моделлаштириш. — Тошкент. 2010.
4. Дворецкий С. И., Егоров А. Ф., Дворецкий Д. С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов. ТГТУ. 2003. 224 с.

### Т Е М А 5. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ И РАСЧЕТЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Цель темы — ознакомление с относительно новым и перспективным способом моделирования.

Дорогой магистрант, рассматриваемый метод является весьма интересным, так как предоставляет возможность запоминания табличных данных на компьютере и получения зависимости выходных параметров от входных с заданной точностью. При этом математические выражения и их количественные оценки останутся в памяти компьютера, а Вы получите результаты обработки экспериментальных данных.

Нейронные сети стали широко использовать для распознавания образа, решения задач классификации, оптимизации, прогнозирования и т. п. в различных отраслях [5, 6, 7, 8, 9, 10]. В пищевой и химической промышленности они могут быть применены для анализа состава смеси, при управлении процессами, моделировании, оптимизации и др. Кроме того, с помощью нейронных сетей возможно управление манипуляторами, качеством, адаптивной робототехникой, голосом, обнаружение неисправностей и т. д. Нами определены равновесные концентрации смеси спирта и воды и др. с помощью программы «нейронные сети» в «Matlab Neural Network».

#### П л а н

- 5.1. Интересный пример. Компьютерное выражение равного условия в системе «жидкость—пар» с помощью нейронной сети
- 5.2. Введение в нейронные сети
- 5.3. История нейронных сетей
- 5.4. Устройство нейронных сетей
- 5.5. Функции активации

Обычно величина критерия Стьюдента находится в пределах 2–4, поэтому если среднеквадратическое отклонение коэффициента регрессии будет существенно больше величины самого коэффициента регрессии (по модулю), то данный коэффициент считается незначимым и может быть исключен из уравнения регрессии. После исключения всех незначимых членов уравнение регрессии приобретает новый вид. Следовательно, на следующем шаге необходимо будет заново оценить коэффициенты регрессии и проверить их значимость. Данный цикл операций производится до тех пор, пока не будет получено адекватное регрессионное уравнение, все факторы которого являются значимыми.

*Ключевые слова:* статистический материал; пассивный эксперимент; активный эксперимент; регрессионный анализ; корреляционный анализ; регрессионное уравнение; метод наименьших квадратов; коэффициент корреляции; линейная регрессия; программа расчета; однородность дисперсии; критерий Кохрена; критерий Стьюдента; адекватность регрессионного уравнения; критерий Фишера.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие модели относятся к статистическим?
2. В чем заключается особенность физико-химических моделей?
3. Как можно составить эмпирические уравнения?
4. Как осуществляется проверка адекватности регрессионного уравнения?
5. В чем суть расчета коэффициентов регрессионного уравнения методом наименьших квадратов?
6. Каким критерием определяется адекватность уравнения регрессии?
7. В чем сущность критерия Фишера; Стьюдента?
8. Каким способом находят коэффициенты уравнения регрессии?
9. Как определяется кривая регрессии и выбирается уравнение?

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 4**

1. На основе интересного примера показан более усовершенствованный подход к построению регрессионных уравнений на компьютере.
2. Дано краткое разъяснение экспериментальных методов математического моделирования.
3. На примерах разъяснено построение регрессионных уравнений и рассмотрены методы установления адекватности компьютерной модели реальному процессу.
4. Дано краткое напоминание о планировании активных и пассивных экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.
2. Артиков А. А. и др. Системный анализ концентрирования растворов инертным газом. — Т.: «Фан». 1987.
3. Маматкулов О.А. Пахта мойи ег кислоталарини десорбциялаш жа-раенини моделлаштириш. — Тошкент. 2010.
4. Дворецкий С. И., Егоров А. Ф., Дворецкий Д. С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов. ТГТУ. 2003. 224 с.

### Т Е М А 5. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ И РАСЧЕТЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Цель темы — ознакомление с относительно новым и перспективным способом моделирования.

Дорогой магистрант, рассматриваемый метод является весьма интересным, так как предоставляет возможность запоминания табличных данных на компьютере и получения зависимости выходных параметров от входных с заданной точностью. При этом математические выражения и их количественные оценки останутся в памяти компьютера, а Вы получите результаты обработки экспериментальных данных.

Нейронные сети стали широко использовать для распознавания образа, решения задач классификации, оптимизации, прогнозирования и т. п. в различных отраслях [5, 6, 7, 8, 9, 10]. В пищевой и химической промышленности они могут быть применены для анализа состава смеси, при управлении процессами, моделировании, оптимизации и др. Кроме того, с помощью нейронных сетей возможно управление манипуляторами, качеством, адаптивной робототехникой, голосом, обнаружение неисправностей и т. д. Нами определены равновесные концентрации смеси спирта и воды и др. с помощью программы «нейронные сети» в «Matlab Neural Network».

#### П л а н

- 5.1. Интересный пример. Компьютерное выражение равного условия в системе «жидкость—пар» с помощью нейронной сети
- 5.2. Введение в нейронные сети
- 5.3. История нейронных сетей
- 5.4. Устройство нейронных сетей
- 5.5. Функции активации

- 5.6. Обучение многослойной сети
- 5.7. Обратное распространение ошибки
- 5.8. Способы обеспечения и ускорения сходимости
- 5.9. Интересный пример

### 5.1. Интересный пример. Компьютерное выражение равного условия в системе «жидкость—пар» с помощью нейронной сети

В качестве примера рассмотрено равновесное условие в системе миристиновой и пальмитиновой кислот, десорбирующихся при дедорации хлопкового масла.

Условия равновесия миристиновой и пальмитиновой кислот представлены [2, 3, 4] в виде таблицы, эмпирической формулы и графического изображения.

В условиях равновесия выбранному содержанию миристиновой кислоты в жидкой фазе соответствует определенное значение ее доли в паровой фазе. Увеличение доли миристиновой кислоты в жидкой фазе приводит к уменьшению доли пальмитиновой кислоты. Вводя в компьютер содержание миристиновой кислоты в жидкой и паровой фазах, определяем компьютерные отображения с помощью нейронной сети. Для этого используется программа «nntool», имеющаяся в пакете прикладных программ «Matlab».

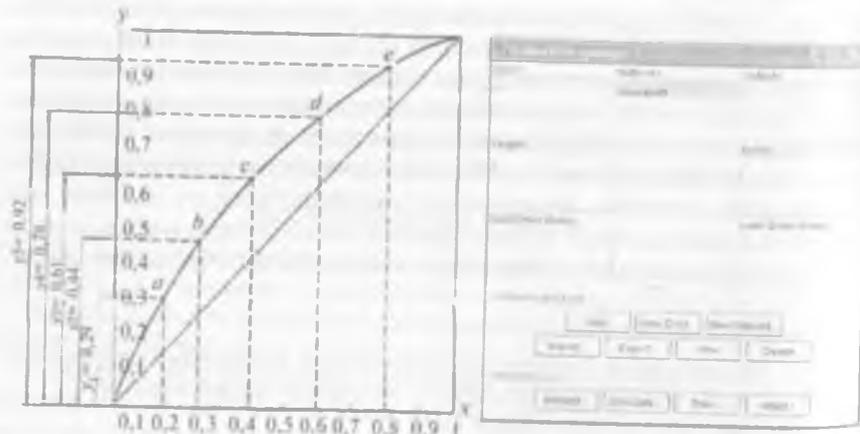


Рис. 5.1. Кривые равновесия в системе кислот «миристин—палмитин»

Рис. 5.2. Вид программы «nntool» пакета «Matlab»

После введения значений аргумента ( $X$  — содержание миристиновой кислоты в жидкой фазе) и функции ( $Y$  — содержание в паровой фазе) компьютер автоматически формализует зависимость функции  $x = f_{\text{neuronet}}(y)$  от аргумента с заранее заданной точностью. Таким образом, строится компьютерное отображение функциональной зависимости равновесия. Здесь исследователя мало интересует внутреннее содержание элемента использованной прикладной программы нейронной сети. Работа компьютера по поиску компьютерного отображения и получения зависимости в виде цифровых или графических выражений осуществляется следующим образом:

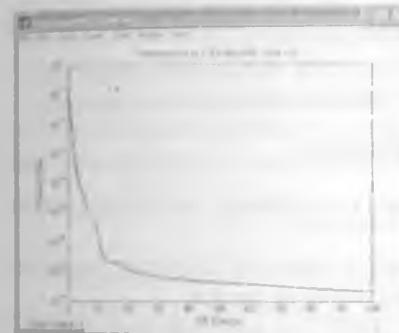


Рис. 5.3. Уменьшение ошибки при обучении

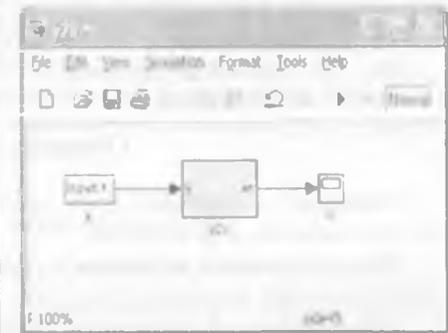


Рис. 5.4. Общий вид модели «Simulink»

Для создания новой нейронной сети с помощью New Network необходимо открыть новое окно (см. рис. 5.2) и задать имя нейронной сети, количество слоев, нейронов в каждом слое, тип функции трансфера. В итоге создается новая нейронная сеть. В рассматриваемом примере использована зависимость  $Y$  от  $X$ . Путем последовательного приближения определена заданная согласованность компьютерной модели с реальными табличными данными. Уменьшение ошибок во время обучения нейронной сети показано на рис. 5.3.

Для создания нейронной сети в прикладной программе «Matlab» осуществляется приказ «gensim», в результате формализуется компьютерная модель «Simulink» (рис. 5.4).

На рис. 5.5–5.6 в качестве примера приведены элементы и значения первого слоя нейронной сети.

Исследователь, вводя в компьютер выбранные значения аргумента  $X$  (содержание миристиновой кислоты в жидкой фазе), автоматически получает значение  $Y$  (содержание миристиновой кислоты в паровой фазе).

- 5.6. Обучение многослойной сети
- 5.7. Обратное распространение ошибки
- 5.8. Способы обеспечения и ускорения сходимости
- 5.9. Интересный пример

### 5.1. Интересный пример. Компьютерное выражение равного условия в системе «жидкость—пар» с помощью нейронной сети

В качестве примера рассмотрено равновесное условие в системе миристиновой и пальмитиновой кислот, десорбирующихся при дедорации хлопкового масла.

Условия равновесия миристиновой и пальмитиновой кислот представлены [2, 3, 4] в виде таблицы, эмпирической формулы и графического изображения.

В условиях равновесия выбранному содержанию миристиновой кислоты в жидкой фазе соответствует определенное значение ее доли в паровой фазе. Увеличение доли миристиновой кислоты в жидкой фазе приводит к уменьшению доли пальмитиновой кислоты. Вводя в компьютер содержание миристиновой кислоты в жидкой и паровой фазах, определяем компьютерные отображения с помощью нейронной сети. Для этого используется программа «nntool», имеющаяся в пакете прикладных программ «Matlab».

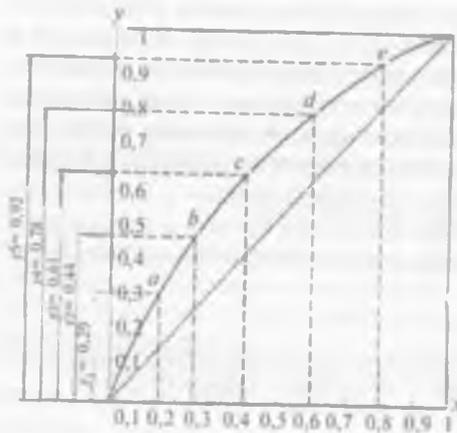


Рис. 5.1. Кривые равновесия в системе кислот «миристин—палмитин»



Рис. 5.2. Вид программы «nntool» пакета «Matlab»

После введения значений аргумента ( $X$  — содержание миристиновой кислоты в жидкой фазе) и функции ( $Y$  — содержание в паровой фазе) компьютер автоматически формализует зависимость функции  $x = f_{neuronet}(y)$  от аргумента с заранее заданной точностью. Таким образом, строится компьютерное отображение функциональной зависимости равновесия. Здесь исследователя мало интересует внутреннее содержание элемента использованной прикладной программы нейронной сети. Работа компьютера по поиску компьютерного отображения и получения зависимости в виде цифровых или графических выражений осуществляется следующим образом:

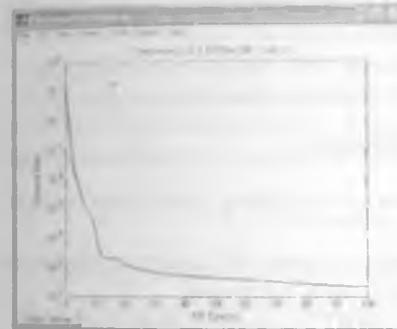


Рис. 5.3. Уменьшение ошибки при обучении

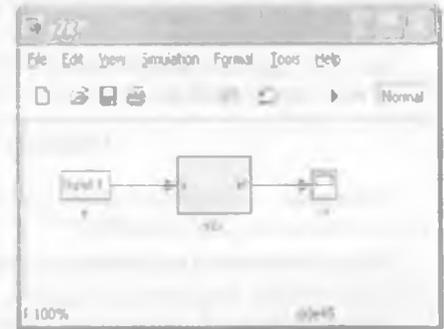


Рис. 5.4. Общий вид модели «Simulink»

Для создания новой нейронной сети с помощью New Network необходимо открыть новое окно (см. рис. 5.2) и задать имя нейронной сети, количество слоев, нейронов в каждом слое, тип функции трансфера. В итоге создается новая нейронная сеть. В рассматриваемом примере использована зависимость  $Y$  от  $X$ . Путем последовательного приближения определена заданная согласованность компьютерной модели с реальными табличными данными. Уменьшение ошибок во время обучения нейронной сети показано на рис. 5.3.

Для создания нейронной сети в прикладной программе «Matlab» осуществляется приказ «gensim», в результате формализуется компьютерная модель «Simulink» (рис. 5.4).

На рис. 5.5–5.6 в качестве примера приведены элементы и значения первого слоя нейронной сети.

Исследователь, вводя в компьютер выбранные значения аргумента  $X$  (содержание миристиновой кислоты в жидкой фазе), автоматически получает значение  $Y$  (содержание миристиновой кислоты в паровой фазе).



Рис. 5.5. Первый внутренний слой модели



Рис. 5.6. Элементы и значения первого слоя нейронной сети

### Основные понятия

**Нейроны** — специальные клетки, способные распространять электрохимические сигналы.

**Искусственным нейроном** называется простой элемент, сначала вычисляющий взвешенную сумму входных величин.

**Искусственные нейронные сети (ИНС)** — математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма.

**Мозг** — система из параллельных процессоров, работающая гораздо эффективнее, чем популярные последовательные вычисления.

**Полином (или многочлен)** — это выражение, содержащее только константы и целые степени независимой переменной.

**Рекуррентная сеть** — связь, ведущая назад от более дальних к более ближним нейронам.

**Уровень активации элемента** — взвешенная сумма его входов с добавленным к ней пороговым значением.

## 5.2. Введение в нейронные сети

Нейронные сети представляют собой новую и весьма перспективную вычислительную технологию, представляющую новые подходы к исследованию задач и в финансовой области. Первоначально нейронные сети открыли новые возможности в области распознава-

ния образов, затем к этому прибавились статистические и основанные на методах искусственного интеллекта средства поддержки принятия решений и решения задач в сфере финансов.

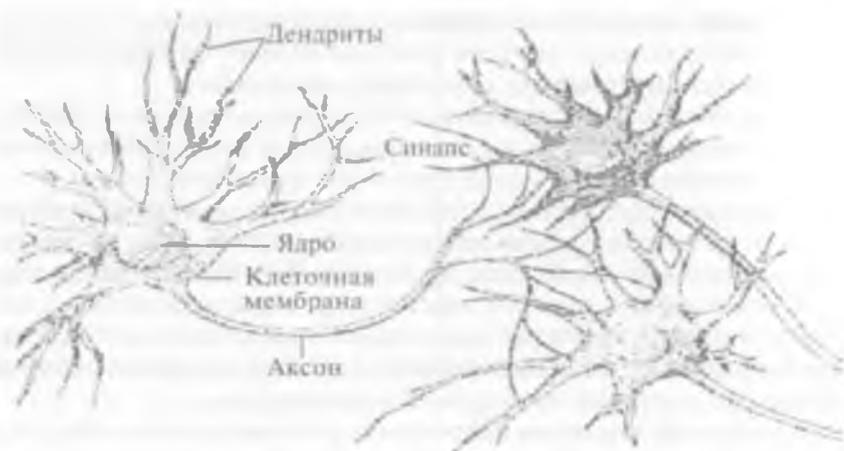
Способность к моделированию нелинейных процессов, работе с зашумленными данными и адаптивность дают возможность применять нейронные сети для решения многих финансовых задач.

Приложения нейронных сетей охватывают самые разнообразные области интересов: распознавание образов; обработка зашумленных данных; дополнение образов; ассоциативный поиск; классификация, оптимизация, прогноз, диагностика, обработка сигналов, абстрагирование, управление процессами, сегментация данных; сжатие информации; сложные отображения; моделирование сложных процессов; машинное зрение; распознавание речи.

Смысл использования нейронных сетей заключается вовсе не в том, чтобы вытеснить традиционные методы: это еще одно возможное средство для решения задач.

### 5.3. История нейронных сетей

На заре развития электронно-вычислительной техники в середине XX века среди ученых и конструкторов еще не существовало единого мнения о том, как должна быть реализована и по какому принципу работать типовая электронно-вычислительная машина. Это сейчас на курсах основ информатики изучается архитектура машины фон Неймана, на основе которой построены практически все существующие сегодня компьютеры. При этом в тех же учебниках ни слова не говорится о том, что в те же годы были предложены принципиально иные архитектуры и принципы действия компьютеров. Одна из таких схем получила название нейросетевого компьютера, или просто нейросети. Первый интерес к нейронным сетям был обусловлен пионерской работой МакКаллока и Питса, изданной в 1943 году, где предлагалась схема компьютера, основанного на аналогии с работой человеческого мозга. Они создали упрощенную модель нервной клетки — нейрон. Мозг человека состоит из белого и серого веществ: белое — тела нейронов, серое — соединительная ткань между нейронами, или аксоны и дендриты. Мозг состоит примерно из 1011 нейронов, связанных между собой. Каждый нейрон получает информацию через свои дендриты, а передает ее дальше только через единственные аксоны, разветвляющиеся на конце на тысячи синапсов (рис. 5.7).



*Рис. 5.7.* Главные части нервной клетки — это ее тело, содержащее ядро и другие органеллы, единственный аксон, передающий импульсы от клетки, и дендриты, к которым приходят импульсы от других клеток.

Простейший нейрон может иметь до 10000 дендритов, принимающих сигналы от других клеток. Таким образом, мозг содержит примерно  $10^{15}$  взаимосвязей. Если учесть, что любой нейрофизиологический процесс активизирует сразу множество нейронов, то можно представить себе то количество информации или сигналов, которое возникает в мозгу.

Нейроны взаимодействуют посредством серий импульсов, длящихся несколько миллисекунд, каждый импульс представляет собой частотный сигнал с частотой от нескольких единиц до сотен герц. Это невообразимо медленно по сравнению с современными компьютерами, но в то же время человеческий мозг гораздо быстрее машины может обрабатывать аналоговую информацию: узнавать изображения, чувствовать вкус, улавливать звуки, оперировать качественными параметрами и т. п. Все это реализуется посредством сети нейронов, соединенных между собой синапсами. Другими словами, мозг — это система из параллельных процессоров, работающая гораздо эффективнее, чем популярные сейчас последовательные вычисления. Следовательно, в настоящее время остро стоит проблема развития методов параллельного программирования и создания параллельных компьютеров. Так что может быть нейросети являются лишь очередным шагом в этом направлении.

## 5.4. Устройство нейронных сетей

**Искусственным нейроном** называется простой элемент, сначала вычисляющий взвешенную сумму  $V$  входных величин  $x_i$ :

$$V = \sum_{i=1}^N W_i \cdot x_i = W \cdot X,$$

где  $N$  — размерность пространства входных сигналов.

Затем полученная сумма сравнивается с пороговой величиной  $W_0$ , вслед за чем вступает в действие нелинейная функция активации  $f$ . Коэффициенты  $W_i$  во взвешенной сумме обычно называют синоптическими коэффициентами, или весами. Взвешенную же сумму  $V$  мы назовем потенциалом нейрона  $i$ . Выходной сигнал тогда имеет вид  $f(V)$ .

Величину порогового барьера можно рассматривать как еще один весовой коэффициент при постоянном входном сигнале. В этом случае мы говорим о расширенном входном пространстве: нейрон с  $N$ -мерным входом имеет  $N + 1$  весовой коэффициент.

Если ввести в уравнение пороговую величину  $W_0$ , то оно примет вид:

$$V = \sum_{i=1}^N W_i \cdot x_i + W_0.$$

В зависимости от способа преобразования сигнала и характера активации возникают различные виды нейронных структур. Существуют детерминированные нейроны, когда активизирующая функция однозначно вычисляет выход по входу, и вероятностные нейроны, состояние которых в момент  $t$  есть случайная функция потенциала и состояния в момент  $t - 1$ . Рассмотрим только детерминированные нейроны.

## 5.5. Функции активации

В искусственных нейронах могут быть различные функции активации. В литературе указаны только следующие виды функций:

- **линейная**: выходной сигнал нейрона равен его потенциалу;
- **пороговая**: нейрон выбирает решение из двух вариантов — активен/неактивен;
- **многопороговая**: выходной сигнал может принимать одно из  $q$  значений, определяемых  $(q - 1)$  порогом внутри предельных значений;

— *сигмоидная*: рассматриваются два вида сигмоидных функций:  
1) с выходными значениями в промежутке  $[0, 1]$ :

$$s = f(V) = \frac{1}{1 + \exp(-bV)}$$

2) с выходными значениями в промежутке  $[-1, 1]$ :

$$s = f(V) = \frac{\exp(bV) - 1}{\exp(bV) + 1}$$

Коэффициент  $b$  определяет *крутизну сигмоида*. Поскольку сигмоидная функция является гладким отображением  $(-\infty, \infty)$  на  $(-1, 1)$ , то крутизну можно учесть через величины весов и порогов и без ограничения общности можно полагать ее равной единице. Графические изображения простейшего нейрона и виды функций с их графиками приведены в [6, 9].

## 5.6. Обучение многослойной сети

Главное отличие и преимущество нейросетей перед классическими средствами прогнозирования и классификации заключается в их способности к обучению. Так что же такое обучение нейросетей?

На этапе обучения происходит вычисление синоптических коэффициентов в процессе решения нейронной сетью задач, в которых нужный ответ определяется не по правилам, а с помощью примеров, сгруппированных в обучающие множества. Так что нейросеть на этапе обучения сама выполняет роль эксперта в процессе подготовки данных для построения экспертной системы. Предполагается, что правила находятся в структуре обучающих данных.

Для обучения нейронной сети требуются обучающие данные. Они должны отвечать свойствам представительности и случайности или последовательности. Все зависит от класса решаемой задачи. Такие данные представляют собой ряды примеров с указанием для каждого из них значения выходного параметра, которое было бы желательно получить. Действия, которые при этом происходят, можно назвать контролируемым обучением: «учитель» подает на вход сети вектор исходных данных, а на выходной узел сообщает желаемое значение результата вычислений. Контролируемое обучение нейросети можно рассматривать как решение оптимизационной задачи. Ее целью является минимизация функции ошибок  $E$  на данном множестве примеров путем выбора значений весов  $W$ . Достижение минимума называется *сходимостью процесса обучения*. Именно воз-

возможность этого и доказал Розенблатт. Поскольку ошибка зависит от весов нелинейно, получить решение в аналитической форме невозможно, и поиск глобального минимума осуществляется посредством итерационного процесса, так называемого *обучающего алгоритма*. Разработано уже более сотни разных обучающих алгоритмов, отличающихся друг от друга стратегией оптимизации и критерием ошибок. Обычно в качестве меры погрешности берется средняя квадратичная ошибка (СКО):

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (d_i - y_i)^2}{M}}$$

где  $M$  — число примеров в обучающем множестве.

Минимизация величины  $E$  осуществляется с помощью градиентных методов. Изменение весов происходит в направлении, обратном к направлению наибольшей крутизны для функции:

$$W(t+1) = W(t) + \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial W}$$

где  $\varepsilon$  — определяемый пользователем параметр, называемый коэффициентом обучения.

### 5.7. Обратное распространение ошибки

Одним из самых распространенных алгоритмов обучения нейросетей прямого распространения является алгоритм обратного распространения ошибки (Back Propagation, BP). Этот алгоритм был переоткрыт и популяризован в 1986 году Румельхартом и МакКлелландом из группы по изучению параллельных распределенных процессов в Массачусетском технологическом институте.

Алгоритм градиентного спуска, минимизирующий суммарную квадратичную ошибку, имеет вид:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P \sum_i (d_k^i - y_k^i)^2$$

Здесь индекс  $i$  пробегает все выходы многослойной сети.

Основная идея BP состоит в том, чтобы вычислить чувствительность ошибки сети к изменениям весов. Для этого нужно вычислить частные производные от ошибки по весам. Пусть обучающее множество состоит из  $P$  образцов, и входы  $k$ -го образца обозначены

через  $\{x_k\}$ . Вычисление частных производных осуществляется по правилу цепи: вес входа  $i$ -го нейрона, идущего от  $j$ -го нейрона, пересчитывается по формуле:

$$W_{ij} = -\varepsilon \cdot \sum_{k=1}^P \frac{\partial E_k}{\partial W_{ij}} = -\varepsilon \cdot \sum_{k=1}^P \frac{\partial E_k}{\partial V_k^i} \cdot \frac{\partial V_k^i}{\partial W_{ij}} = -\varepsilon \cdot \sum_{k=1}^P \delta_k^i \cdot x_k^j,$$

$\varepsilon$  где — длина шага в направлении, обратном к градиенту.

Если рассмотреть отдельно  $k$ -й образец, то соответствующее изменение весов равно:

$$\Delta W_{ij} = -\varepsilon \cdot \frac{\partial E_k}{\partial W_{ij}} = -\varepsilon \cdot \delta_k^i \cdot x_k^j.$$

Множитель  $\delta_k^i$  вычисляется через аналогичные множители из последующего слоя, и ошибка, таким образом, передается в обратном направлении.

Для выходных элементов получим:

$$\delta_k^i = -\frac{\partial E_k}{\partial V_k^i} = -\frac{\partial E_k}{\partial x_k^i} \cdot \frac{\partial x_k^i}{\partial V_k^i} = -(d_k^i - x_k^i) / f'(V_k^i).$$

Для скрытых элементов множитель  $\delta_k^i$  определяется так:

$$\delta_k^i = -\frac{\partial E_k}{\partial V_k^i} = -\sum_h \frac{\partial E_k}{\partial V_k^h} \cdot \frac{\partial V_k^h}{\partial V_k^i},$$

где индекс  $h$  пробегает номера всех нейронов, на которые воздействует  $i$ -й нейрон. Наглядный алгоритм обратного распространения ошибки см. в [6, 9].

## 5.8. Способы обеспечения и ускорения сходимости

**Выбор начальных весов.** Перед тем как начинать процесс обучения нейронной сети, необходимо присвоить весам начальные значения. Цель состоит в том, чтобы найти как можно более хорошее начальное приближение к решению и таким образом сэкономить время обучения и улучшить сходимость. Классический подход к этой проблеме состоит в том, чтобы случайным образом выбрать малые значения для всех весов и быть уверенным, что ни один из сигмоидных элементов не перенасыщен. Однако это не дает полной гарантии, что такое приближение приведет к глобальному минимуму или уменьшит время сходимости.

**Упорядочение данных.** Чтобы обучение не двигалось в ложном направлении при обработке задачи классификации или распознавания, но не задачи аппроксимирования временных рядов, данные нужно перемешивать случайным образом. Иначе нейросеть «выучит» последовательность случайно оказавшихся рядом значений как истинное правило и потом будет делать ошибку.

**Импульс.** Иногда при изменении веса связей нейронов, кроме текущего изменения веса, к нему прибавляют вектор смещения с предыдущего шага, взятый с некоторым коэффициентом. В этом случае говорят, что учитывается предыдущий импульс движения. Формула изменения веса связи будет выглядеть так:

$$\Delta W_{ij}(t+1) = \mu \cdot \Delta W_{ij}(t) - (1 - \mu) \varepsilon \frac{\partial E}{\partial W_{ij}}.$$

где  $\mu$  — число в интервале  $(0, 1)$ , которое задается пользователем.

**Управление величиной шага.** Ранее указывалось,  $\varepsilon$  что — величина шага сети. По сути, это мера точности обучения сети. Чем она больше, тем более грубым будет следующее уменьшение суммарной ошибки сети, чем она меньше, тем больше времени сеть будет тратить на обучение и тем более возможно ее попадание в окрестность локального минимума ошибки. Поэтому управление шагом имеет важное значение для улучшения сходимости нейронной сети. В современных нейросетевых пакетах пользователь может сам определять, как будет изменяться величина шага. Очень часто по умолчанию берется линейная или экспоненциальная зависимость величины шага от количества итераций сети.

**Оптимизация архитектуры сети.** Одной из самых больших проблем при использовании нейросетей является невозможность предварительного определения оптимального количества скрытых слоев и нейронов в них. Если нейронов будет слишком мало, то это равносильно потере каких-то нелинейных связей в модели, если нейронов будет много, то это может привести к «переобучению» сети, то есть она просто «выучит» данные, а не распознает их структуру. Поэтому применяется два основных подхода:

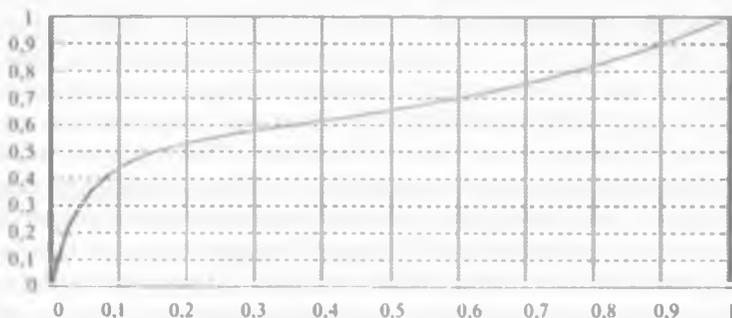
— **деструктивный:** берется сеть заведомо большего размера, чем нужно, и в процессе обучения из нее удаляются связи и даже сами нейроны;

— **конструктивный:** первоначально берется маленькая сеть и к ней в соответствии со структурой и сложностью задачи добавляются новые элементы.

**Масштабирование данных.** При рассмотрении решающих функций внутри нейронов было определено, что диапазон выходных значений нейрона лежит в интервале либо «0,1», либо «-1,1». Поэтому для лучшей работы сети следует предварительно масштабировать данные обучающей выборки к интервалу от 0 до 1. Это даст меньшие ошибки при обучении и работе нейросети.

### 5.9. Интересный пример

Известно, что при ректификации смеси особое значение имеет определение межфазных равновесных концентраций пара и жидкости. Например, межфазные равновесные концентрации смеси спирта и воды ( $C_2H_6O-H_2O$ ), установленные экспериментальным путем, можно представить в следующем  $X-Y$  профиле:



Для определения функциональной зависимости разработаны математические модели в виде конечных уравнений. Расчет межфазных равновесных концентраций, проведенный на компьютере с помощью этих моделей, показывает, что они адекватно описывают процесс с некоторыми погрешностями. Для более точной идентификации изменения равновесных концентраций были использованы компьютерные программы на основе нейронных сетей.

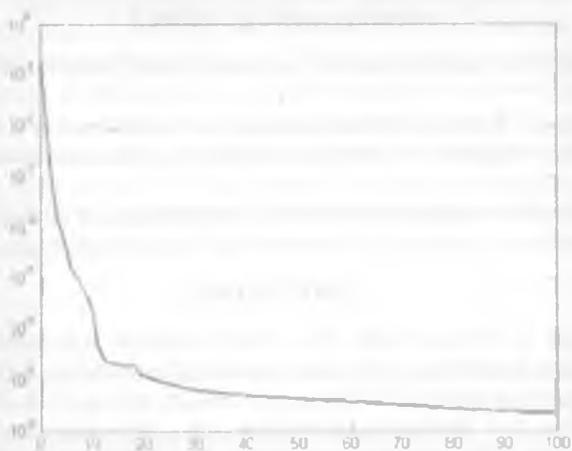
В результате были получены нейронные сети, определившие зависимость равновесной концентрации «вода—спирт». Нейронные сети использовались для воспроизводства функции  $x^* = \text{neuronetf}(y)$ .

Воспользовавшись справочными данными о равновесной концентрации в системе «спирт—вода» (концентрации спирта в жидкости  $X$  и в паре  $Y$ ), табличные данные были введены в компьютер на основе программы «Matlab».

Используя подпрограмму «nntool», была создана нейронная сеть с наименьшими погрешностями и разработана модель «Simulink»:



Разработанная модель адекватно описала экспериментальные результаты.



Погрешность между экспериментальными и компьютерными данными составила 0,000001 %.

*Ключевые слова:* нейрон; аксон; дендриты; перцептрон; искусственный нейрон; сети прямого распространения; сети с обратными связями; сети с боковыми обратными связями; гибридные сети; уровень активации элемента; пороговое значение; «скрытые слои».

#### Контрольные вопросы

1. Что вы понимаете под «скрытыми слоями»?
2. Каким образом построена рекуррентная нейросеть простейшего вида?
3. Что такое обучение нейросетей?
4. Что нужно предпринять, чтобы обучение не двигалось в ложном направлении при обработке задачи классификации или распознавания?
5. Каковы преимущества нейросетей?

6. Каковы недостатки нейросетей?
7. Что называется уровнем активации элемента?
8. Что подразумевается под скрытыми слоями?
9. Какие функции активации встречаются в литературе?
10. Что означает линейная функция активации?
11. Что означает пороговая функция активации?
12. Что означает многопороговая функция активации?
13. Что вы знаете о примере применения нейронной сети для моделирования условий равновесия?

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 5

1. Приводится информация о компьютерной нейронной сети и ее применении.
2. Приведена история возникновения нейронных сетей, понятие об их устройстве, порядок их форматизации по экспериментальным данным.
3. Приводится интересный пример использования нейронных сетей для моделирования условия равновесия в 2-фазной системе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Артиков А., Маматкулов О. А.* Пахта мойи ёг кислоталарини ректификациялаш жараёнида мувозанат концентрацияларни нейрон турлар ёрдамида моделлаштириш // *Узбекистон кимё журнали.* № 6. 2006.
2. *Файнберг Е. Е.* Ректификация природных жирных кислот и высших жирных спиртов // *Пищевая промышленность.* — Москва. 1970. 183 с.
3. *Тютюников Б. Н.* Химия жиров // *Пищевая промышленность.* — Москва. 1966. 632 с.
4. *Коган В. Б., Фридман В. М., Кафаров В. В.* Равновесие между жидкостью и паром. Москва—Ленинград: «Наука» 1966. 1424 с.
5. The Mathworks Inc. Neural Network Toolbox — Design and simulate neural networks. <http://www.mathworks.com/products/neuralnet/>
6. BaseGroup Labs. Нейронные сети — математический аппарат. <http://www.basegroup.ru/neural/math.htm>
7. *Холоднов В. А., Дьяконов В. П., Иванова Е. Н., Кирьянова Л. С.* Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов. — М.: «Профессионал, мир и семья». 2004.
8. *Маматкулов О. А.* Пахта мойи ёг кислоталарини десорбциялаш жараёнини моделлаштириш. / Дис. канд. техн. наук. 2010.
9. <http://www.nr.vspu.ac.ru/show.php?id=43&t=1&st=5>. *Черномашенцев М. С.* Что такое нейронная сеть.
10. <http://ru.wikipedia.org/wiki/> Википедия. «Искусственная нейронная сеть».

## Т Е М А 6. АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Цель темы — показать важную роль учета динамической структуры потоков в системах и дать информацию о введенном способе определения квазиаппаратов по динамической структуре потоков.

Дорогой магистрант, изучая тему, Вы проявите больший интерес к исследованиям, проведенным многими учеными по динамической структуре потоков. Развивая их, рекомендуем новшество — расчленение общего аппарата на квазиаппараты в зависимости от динамической структуры потоков. Также рассматриваются вопросы анализа и синтеза процессов и систем перемешивания и измельчения. Модели перемешивания сформализованы доц. Б. Хамидовым, в формировании модели измельчения принимали участие доц. Т. Шамуратов, Ф. Касымов, Л. Акабировва. С компьютерной моделью и программами автоматизированного расчета можно ознакомиться в библиотеке кафедры ИАБ ТХТИ.

### П л а н

- 6.1. Интересный пример
- 6.2. Об определении квазиаппаратов по динамической структуре потоков материалов, энергии или в целом информации
- 6.3. Интересный пример
- 6.4. О моделировании процесса перемешивания в жидких средах
- 6.5. Анализ системы, моделирование процесса, синтез оптимальных условий процесса измельчения материалов

### 6.1. Интересный пример

Эффективность предложенного подхода можно продемонстрировать на процессе измельчения материалов. Чтобы смоделировать процесс непрерывного измельчения в потоках, можно представить аппарат в виде многоячеечной модели, то есть измельчитель по перемещению материала разделить на отдельные участки — квазиаппараты. При этом за основу берется определенный участок (рис. 6.1).

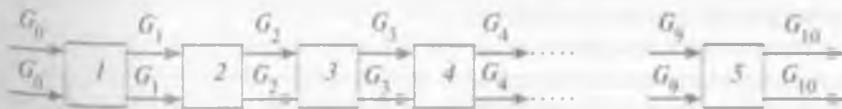


Рис. 6.1. Схема многоячеечной модели аппарата измельчения

Для непрерывной работы такой системы на основе материального баланса можно записать уравнение динамики процесса для  $q$ -го квазиаппарата:

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{1}{m_2} (G_{q-1} \cdot C_{q-1} - G_2 \cdot C_q - k \cdot V(1 - C_q)),$$

где  $m$  — масса сырья;  $G_0$  — начальный расход сырья;  $C_0$  — начальная концентрация сырья;  $k$  — коэффициент измельчения;  $V$  — объем рабочей камеры;  $q$  — целое число, определяющее количество ячеек.

В данном примере была принята 10-квазиаппаратная мельница. Для решения поставленной задачи была использована 10-ячеечная модель. С помощью программного пакета Matlab была составлена математическая модель непрерывного измельчения, состоящая из 10 зон идеального перемешивания. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 6.2.

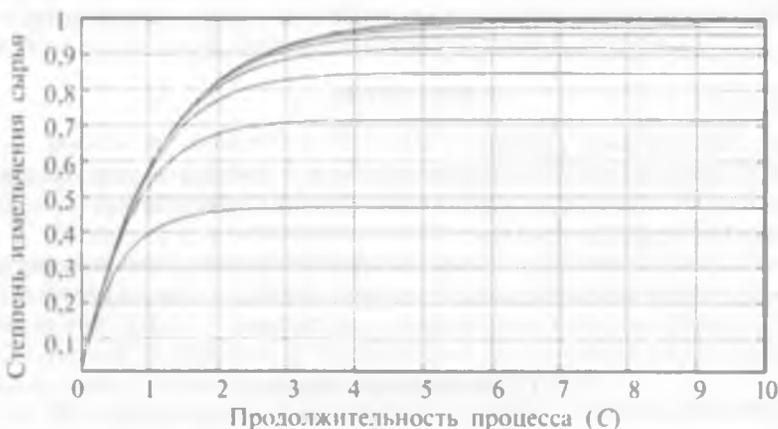


Рис. 6.2. Изменение степени измельчения по времени в непрерывном режиме

Установлено, что с увеличением времени масса измельченных веществ увеличивается и доходит до постоянной величины в каждой ячейке. По заданной величине измельчения можно установить оптимальное время измельчения.

Таким образом, проведение МСА и математического моделирования процесса измельчения дает возможность определения характеристики измельчителя и оптимальных показателей при выборе технологического аппарата.

## Основные понятия

**Поток** — направленное движение совокупности чего-либо условно однородного (например, продукции, информации, финансов, материалов, сырья и т. п.).

**Структура потоков** — определение и группировка однозначных потоков движущегося субъекта.

**Материальный поток** — поток материалов, продукции, рассматриваемый в процессе (транспортировка, складирование и др.) и отнесенный к определенному временному интервалу.

**Застойные зоны** — зоны, в которых субъекты активно не участвуют в обменных потоках.

**Измельчение** — изменение исходного сырья до частицы заданного значения, получение готового продукта, отвечающего требованиям последующих и взаимосвязанных технологических процессов.

**Механическое перемешивание сред** — процесс, происходящий благодаря растяжению и искривлению материальных элементов среды при ее движении.

**Интенсивность перемешивания** — процесс, определяемый временем достижения заданного технологического результата или числом оборотов мешалки при фиксированной продолжительности процесса.

**Оптимизация** — выявление наиболее эффективных показателей параметров процесса.

### 6.2. Об определении квазиаппаратов по динамической структуре потоков материалов, энергии или в целом по информации

В промышленной технологии структура потоков или, как ее еще называют, гидродинамическая структура потоков материалов имеет важное значение. Химико-технологические продукты могут быть представлены в виде жидкости, сыпучих и штучных материалов, а также тепловые потоки имеют свою структуру потоков. В химической технологии аппараты по потокам отличаются, соответственно, и процессы в аппаратах протекают по-разному. Рассматривая какой-либо аппарат, например приведенный в книге «Тепловые процессы и аппараты», можно увидеть, что вход и выход потоков имеют различное местоположение. Здесь протекают различные потоки. Конеч-

Для непрерывной работы такой системы на основе материального баланса можно записать уравнение динамики процесса для  $q$ -го квазиаппарата:

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{1}{m_2} (G_{q-1} \cdot C_{q-1} - G_2 \cdot C_q - k \cdot V (1 - C_q)),$$

где  $m$  — масса сырья;  $G_0$  — начальный расход сырья;  $C_0$  — начальная концентрация сырья;  $k$  — коэффициент измельчения;  $V$  — объем рабочей камеры;  $q$  — целое число, определяющее количество ячеек.

В данном примере была принята 10-квазиаппаратная мельница. Для решения поставленной задачи была использована 10-ячеечная модель. С помощью программного пакета Matlab была составлена математическая модель непрерывного измельчения, состоящая из 10 юн идеального перемешивания. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 6.2.

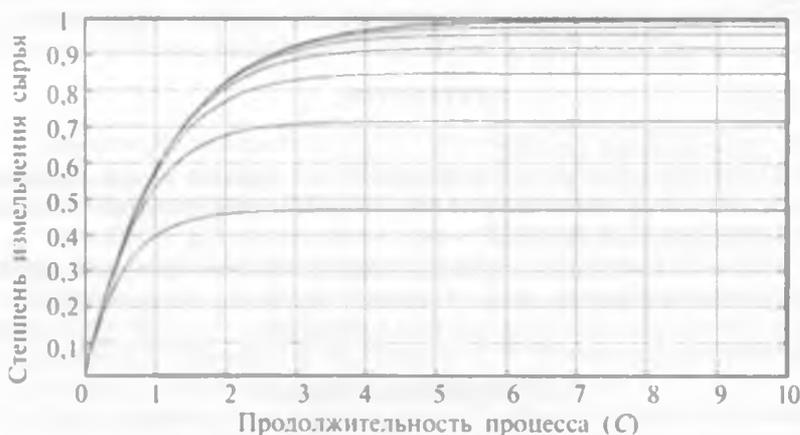


Рис. 6.2. Изменение степени измельчения по времени в непрерывном режиме

Установлено, что с увеличением времени масса измельченных веществ увеличивается и доходит до постоянной величины в каждой ячейке. По заданной величине измельчения можно установить оптимальное время измельчения.

Таким образом, проведение МСА и математического моделирования процесса измельчения дает возможность определения характеристики измельчителя и оптимальных показателей при выборе технологического аппарата.

## Основные понятия

**Поток** — направленное движение совокупности чего-либо условно однородного (например, продукции, информации, финансов, материалов, сырья и т. п.).

**Структура потоков** — определение и группировка однозначных потоков движущегося субъекта.

**Материальный поток** — поток материалов, продукции, рассматриваемый в процессе (транспортировка, складирование и др.) и отнесенный к определенному временному интервалу.

**Застойные зоны** — зоны, в которых субъекты активно не участвуют в обменных потоках.

**Измельчение** — изменение исходного сырья до частицы заданного значения, получение готового продукта, отвечающего требованиям последующих и взаимосвязанных технологических процессов.

**Механическое перемешивание сред** — процесс, происходящий благодаря растяжению и искривлению материальных элементов среды при ее движении.

**Интенсивность перемешивания** — процесс, определяемый временем достижения заданного технологического результата или числом оборотов мешалки при фиксированной продолжительности процесса.

**Оптимизация** — выявление наиболее эффективных показателей параметров процесса.

### 6.2. Об определении квазиаппаратов по динамической структуре потоков материалов, энергии или в целом по информации

В промышленной технологии структура потоков или, как ее еще называют, гидродинамическая структура потоков материалов имеет важное значение. Химико-технологические продукты могут быть представлены в виде жидкости, сыпучих и штучных материалов, а также тепловые потоки имеют свою структуру потоков. В химической технологии аппараты по потокам отличаются, соответственно, и процессы в аппаратах протекают по-разному. Рассматривая какой-либо аппарат, например приведенный в книге «Тепловые процессы и аппараты», можно увидеть, что вход и выход потоков имеют разное местоположение. Здесь протекают различные потоки. Конеч-

но, все элементы потока описать невозможно, так как их может быть несколько тысяч и даже миллионов. Поэтому перейдем к анализу более обобщенного варианта технологического аппарата (рис. 6.3).

По структуре потоков можно рассмотреть идеализированные потоки, когда:

— поток очень хорошо и полностью перемешивается (идеальное перемешивание);

— поток имеет поршневое движение (этот случай также считается идеальным).

Как правило, идеальных вариантов практически нет, поэтому используются промежуточные потоки.

В литературе особое внимание уделено определению структуры потоков. Многоступенчатый системный анализ показывает, что система, имеющая определенно сложные потоки, разделяется на подсистемы или же один аппарат делится на несколько мысленных аппаратов, имеющих простую структуру потока материала (квазиаппараты). Каждый такой квазиаппарат можно также разделить на несколько аппаратов (несколько иерархических уровней аппаратов в одном аппарате). Каждый аппарат представляет собой систему, поэтому каждый выбранный аппарат по структуре потоков можно разделить на ряд квазиаппаратов. Эти аппараты могут быть соединены либо последовательно, либо параллельно, но в большинстве случаев используются комбинированные (смешанные) модели потоков.

При анализе гидродинамической структуры потоков имеют в виду изучение движения потока материала, хотя в большинстве случаев в потоке происходят и другие процессы. В связи с этим рекомендуем основной аппарат расчленять на квазиаппараты с определенными процессами, а их, в свою очередь, на последующие подсистемы. Количество иерархических ступеней определяется по мере способности и возможности исследователя.

Пример, приведенный в учебниках [4, 9], можно рассмотреть в виде нескольких аппаратов (рис. 6.4). В центре имеется аппарат со структурой идеального вытеснения с быстрым движением потока, по бокам — аппарат со структурой идеального вытеснения с замедленным движением потока.

Интенсивное течение протекает в центре (в главной зоне 1), по бокам — относительно пассивное течение (зона 2), а зона 3 — зас-  
тойная. Каждая зона имеет свои входы и выходы и представлена отдельными квазиаппаратами. Таким образом, аппарат в целом мо-

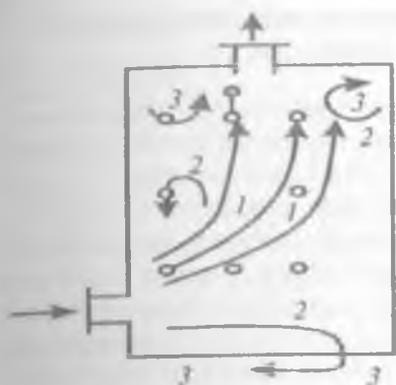


Рис. 6.3. Схема потока материала в выбранном технологическом аппарате: 1, 2 — траектории движения; 3 — медленные, или застойные, потоки

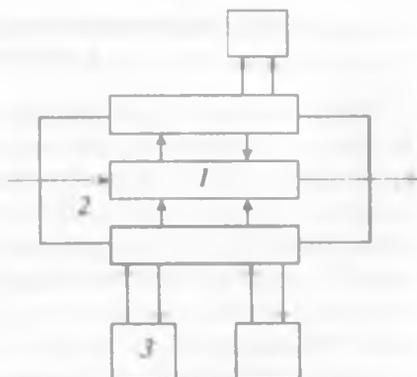


Рис. 6.4. Квазиаппараты по структуре потоков материала в выбранном технологическом аппарате: 1, 2 — движение вытеснением; 3 — застойная зона

жет быть разделен на 1, 2, 3 и т. д. квазиаппараты. Такое многоступенчатое рассмотрение структуры потоков позволяет учитывать и исследовать в дальнейшем и другие процессы (например, теплообменные, массообменные, химические и др.). К примеру, тепло через стенку передается к квазиаппаратам, которые ближе к стенке, далее тепло переходит к центру. Каждый элемент (квазиаппарат), называемый системой, имеет свой процесс со своими входными и выходными параметрами и связан с другим элементом за счет своих входных и выходных параметров.

### 6.3. Интересный пример

Для изучения процессов, протекающих в различных аппаратах, с различными структурными потоками материала могут быть использованы не только жидкость и воздух, но и сыпучие материалы или кусковые изделия, которые могут двигаться в конвейере. Например, при обжиге фарфоровых изделий в конвейере движется целый поток изделий, и за счет структуры потоков в аппарате происходят различные процессы. Было определено, что до 12 % брака в изделии происходило из-за плохой структуры потоков сырья и газовой фазы. Преобразованием структуры потока сырья (садки изделия) количество брака было уменьшено.

#### 6.4. О моделировании процесса перемешивания в жидких средах

Механическое перемешивание сред происходит благодаря растяжению и искривлению материальных элементов среды в процессе ее движения. Любой малый элемент среды, находящийся на входе в смеситель, в процессе движения будет деформироваться и, как следствие, будет изменяться расстояние между составляющими его точками. Очевидно, если через некоторое время в результате движения среды все точки этого элемента будут равномерно распределены по всему объему среды, то можно говорить о хорошем перемешивании компонентов материала. Усредняя данные характеристики по всевозможным линейным элементам и элементам площади, а также по времени, можно перейти к так называемым интенсивностям перемешивания, которые характеризуют процесс перемешивания интегрально. Понятно, что для вычисления этих величин необходимо знать траектории движения каждой частицы среды и каждой площадки. Функции, описывающие эти траектории, в большинстве случаев не могут быть получены в аналитической форме и не во всех случаях даже численно. Таким образом, задача оценки интенсивности перемешивания для каждого режима движения среды в перемешивающем аппарате очень трудоемка и требует серьезных вычислительных мощностей.

Нами разрабатывается методология многоячеечного представления аппарата перемешивания. Обычно аппарат перемешивания можно представить в виде комбинации нескольких зон — квазиаппаратов. Это зоны — ячейки интенсивного перемешивания по движению материала (жидкости), ячейки обратного возвращения материала, застойные зоны, которые участвуют в перемешивании за счет обменных потоков.

Для примера рассмотрим вопрос перемешивания жидкостей в плоскостном цилиндрическом реакторе аппарата с лопастной мешалкой.

С целью определения оптимальных значений основных влияющих факторов построены математические описания отдельных составных элементов процесса перемешивания. На основе блочно-модульного принципа моделирования с учетом реальной гидродинамической структуры взаимодействующих потоков составлена обобщенная математическая модель динамики исследуемого процесса.

Используя методологию многоступенчатого системного подхода, аппарат перемешивания мысленно представлен состоящим из 6 ячеек (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Графическое представление квазиаппаратов в процессе перемешивания

Для различных случаев использования аппаратов перемешивания с заданными входными показателями можно определить значения коэффициентов модели (расходы потоков или объемы зон) варьированием параметров модели и получением различных кривых переходного процесса.

Представляя аппарат в многоячеечном виде, сформализовано математическое описание процесса перемешивания в жидких средах в виде:

$$\begin{cases}
 V \frac{dC_1}{d\tau} = Q_0 C_0 + Q_{51} C_5 - Q_1 C_1 \\
 V \frac{dC_2}{d\tau} = Q_1 C_1 + Q_{52} C_5 - Q_{25} C_{25} - Q_{23} C_2 \\
 V \frac{dC_3}{d\tau} = Q_2 C_2 + Q_{43} C_4 - Q_{34} C_3 - Q_{35} C_3 \\
 V \frac{dC_4}{d\tau} = Q_3 C_3 + Q_{25} C_2 + Q_{65} C_6 - Q_{51} C_5 - Q_{52} C_2 - Q_{62} C_2 \\
 V \frac{dC_5}{d\tau} = Q_{34} C_3 - Q_{43} C_4 \\
 V \frac{dC_6}{d\tau} = Q_{56} C_5 + Q_{65} C_6
 \end{cases}$$

На рис. 6.6 приведена компьютерная модель процесса перемешивания в жидких средах, выполненная в программе «Matlab».

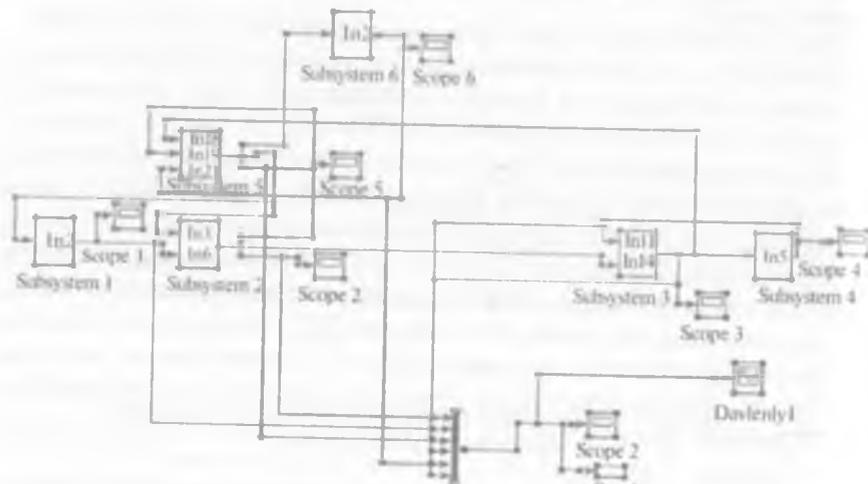
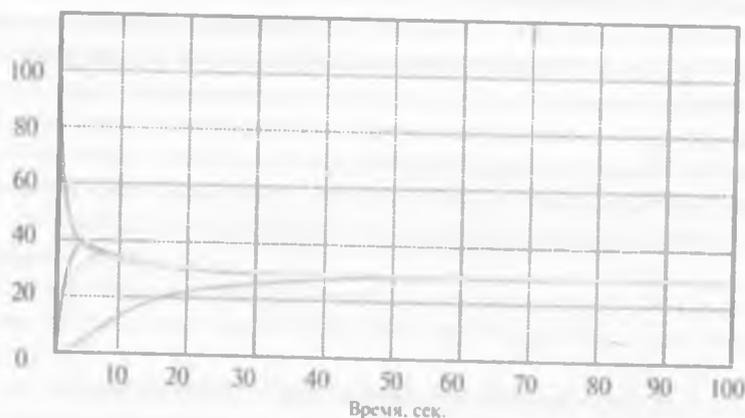


Рис. 6.6. Обобщенная компьютерная модель процесса перемешивания в жидких средах

С помощью компьютерной модели процесса была получена динамическая характеристика степени перемешивания:



Как видно, в выделенных участках (квазиаппаратах) перемешивание жидкости происходит при разной интенсивности. Для периодического режима можно определить время полного перемешивания. В данном случае требуется более 80 секунд для получения однородной продукции.

## 6.5. Анализ системы, моделирование процесса, синтез оптимальных условий процесса измельчения материалов

Процессы измельчения осуществляются либо в аппаратах периодического действия, либо в аппаратах непрерывного действия. Математическое моделирование и расчет измельчителей имеют свои специфические особенности.

Рассмотрим МСА измельчения в длинных аппаратах непрерывного действия типа шаровой мельницы.

На *первом иерархическом уровне* рассматривается мельница с процессом измельчения в ней. Входными параметрами системы являются расход и концентрация входящего сырья, выходными параметрами — расход и концентрация измельченных веществ на выходе из мельницы.

На *втором иерархическом уровне* учитывается, что установка состоит из зоны подвода материала, рабочей зоны и зоны отвода продукции.

На *третьем иерархическом уровне* длинную рабочую зону можно представить многоквазиаппаратной. Входными параметрами системы являются расход и концентрация измельченного сырья, поступающего в квазиаппарат, выходными параметрами — расход и концентрация измельченных веществ, выходящих из квазиаппарата.

На *четвертом иерархическом уровне* рассматриваются фаза измельчаемого материала и измельчающий элемент в каждом квазиаппарате.

На *пятом иерархическом уровне* фаза измельчаемого материала представляется из его частиц. При необходимости в дальнейшем рассматриваются элементы частицы и т. п. Во всех выявленных системах определяются показатели — входные и выходные параметры каждой подсистемы.

Рассмотрим моделирование процессов на уровне квазиаппарата (рис. 6.7).



Рис. 6.7. Объект в виртуальном изображении

В процессе измельчения качество продукции и другие физические показатели можно повысить за счет изменения величин показателей мельницы. Например, при периодическом измельчении можно определить необходимое время для достижения ранее заданных значений концентрации измельчаемой продукции (под концентрацией измельчаемой продукции принимается количество мелкой массы в составе продукции), количество квазиаппаратов. Решение этой задачи можно осуществить, проведя серию опытов и учитывая при этом различные значения параметров мельницы.

Для формализации компьютерной модели измельчитель рассматривается в виде кибернетической системы с определенными показателями.



Входными параметрами системы являются  $G_0, C_0$  — расход и концентрация материала, подлежащего измельчению до нужной величины.

Выходными параметрами являются  $G_1, C_1$  — расход и концентрация измельченных веществ.

При математическом моделировании процессов с точки зрения динамической структуры потоков системы может быть использовано несколько вариантов. Математическое описание можно осуществить из уравнения непрерывной работы системы.

Для непрерывной работы системы на основе материального баланса можно записать уравнение динамики процесса в виде:

$$\frac{dm}{d\tau} = G_0 C_0 - G_1 C_1 - q_u. \quad (1)$$

Увеличение расхода измельченной продукции определяется по формуле:

$$q_u = KVC_A. \quad (2)$$

Долевою концентрацию измельченной продукции можно записать в виде:

$$C_A = 1 - C. \quad (3)$$

Масса измельченной продукции равна:

$$m = m_0 C. \quad (4)$$

Здесь:  $m$  — масса;  $G_0$  — расход;  $C_0$  — расход и концентрация выходящего продукта;  $q_u$  — показатель измельченности вещества, то

есть он будет со временем увеличиваться. В непрерывном процессе это зависит от коэффициента измельчения, объема вещества в аппарате и концентрации поступающего измельченного вещества  $C_1$ .

Коэффициент измельчения ( $K$ ) характеризуется многими показателями, единица его измерения  $\text{кг/м}^3 \text{сек}$ . Масса измельченного вещества в аппарате характеризуется общей массой.

Концентрацию измельченных веществ можно записать по общему расходу в виде:

$$C = \frac{G_C}{G_1} \quad (5)$$

Если допустить, что масса вещества в аппарате не меняется, то поступающий расход будет равен выходящему расходу:

$$G_1 = G_0 \quad (6)$$

Тогда,

$$C = \frac{G_C}{G_0} \quad (7)$$

Учитывая вышеизложенное, для характеристики динамики процесса в измельчителе уравнение (1) можно переписать так:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{m_0} [G_0 C_0 - G_1 C - KV(1-C)].$$

В аппаратах, имеющих структуру потока, соответствующую вытеснению, можно применить структуру потоков многоячеечной модели.

Для моделирования процесса непрерывного измельчения используем структуру потоков квазиаппаратной модели, принимая для каждой ячейке квазиаппарата структуру потока как идеальное перемешивание. Система будет состоять из определенных участков, и для процесса каждого участка создано уравнение типа 8, то есть на каждом участке будет осуществляться перемешивание материала. С помощью программы «Matlab» была составлена математическая модель непрерывного измельчения, состоящая из нескольких зон (квазиаппаратов) идеального перемешивания. Для процесса в выбранном квазиаппарате записываются уравнения:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{m_2} [G_{q-1} C_{q-1} - G_2 C_2 - KV(1-C_2)]; \quad (8)$$

$$K = f(W_1 R_1 \delta_1 \dots); \quad V = \frac{m_2}{\rho}; m_2 = V \cdot \rho.$$

Решение модели даст возможность определить количество зон, необходимых для заданной концентрации измельчения. Таким образом, с помощью математических моделей процесса измельчения можно определить характеристику измельчителя, оптимальные показатели процесса и эффективность аппарата.

При решении этой и подобных задач на основе математического моделирования создается виртуальное изображение объекта. В компьютерной модели параметры вводятся таким образом, чтобы в результате особенности наблюдаемого виртуального объекта были близки к реальному объекту.

**Пример измельчения риса.** Математическая модель процесса измельчения в одноярусной мельнице описывается уравнением:

$$\frac{dm_0 c_0}{d\tau} = G_0 c_0 - G_1 c_1 + k(1 - c_1), \quad (9)$$

где  $G_0$  — расход сырья, поступающего в мельницу;  $c_0$  — концентрация поступающей в мельницу продукции;  $G_1$  — расход выходящей из мельницы продукции;  $c_1$  — концентрация выходящей из мельницы продукции;  $k$  — коэффициент, включающий в себя особенности мельницы.

Рассмотрим измельчитель типа кофемолки. В основном, это аппараты, работающие в периодическом режиме. В системе происходит почти полное перемешивание материала. Если мельница будет работать в периодическом режиме, то  $G_0 = G_1$ , тогда уравнение (9) примет вид:

$$\frac{dm_0 c}{d\tau} = k(1 - c_1). \quad (10)$$

А учитывая, что  $m_0 = V_0 \cdot \rho$ , будет выглядеть так:

$$\frac{dV_0 \rho \cdot c}{d\tau} = k(1 - c_1), \quad (11)$$

где  $V_0$  — начальный объем частиц измельчаемой продукции,  $\rho$  — плотность измельчаемой продукции.

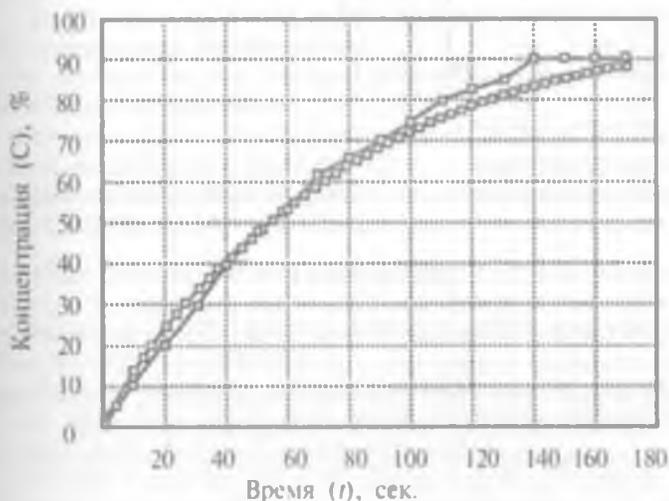
В приведенном уравнении величина  $k$  неизвестна. Эта величина определяется путем проведения следующего опыта. Измельчив продукцию в определенной массе в течение точно установленного времени (например, 10 секунд), смесь продукции из мельницы вынимается. Общая масса пропускается через сито, определяется количество прошедших и не прошедших через сито частиц.

Экспериментами измельчения риса зафиксированы следующие результаты:

t, сек.	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
C, %	0	11	21,1	29,6	40	47,9	53,1	61,8	66	70,2

t(сек)	t	100	110	120	130	140	150	160	170
C(%)	C	74,4	79,9	82,7	84,8	90	90,2	90,4	90,4

На основе полученных результатов составляется график:



Сравнив график с компьютерной моделью измельчения, можно определить величину  $k$ . Для этого путем направленного случайного поиска величина  $k$  в компьютерной модели изменяется таким образом, чтобы точки, полученные во время опыта на физической установке, по мере возможности совпадали с точками на компьютерной модели.

В компьютерной модели при  $k = 12,8$  ее особенности близки с особенностями действующей мельницы. Значит формулу (11) следует записать в виде:

$$\frac{dV_0 \rho \cdot c}{dt} = 12,8(1 - c_1). \quad (12)$$

Теперь можно применить данный коэффициент к аналогичным, но непрерывно работающим мельницам. Изменяя размеры мельницы, можно создать модель с многоячеечной структурой потоков материала (рис. 6.8) и проследить изменение по времени концентрации измельченных веществ по квазиаппаратам (рис. 6.9).

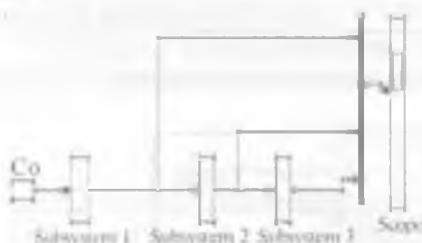


Рис. 6.8. Многоячеечная модель процесса измельчения

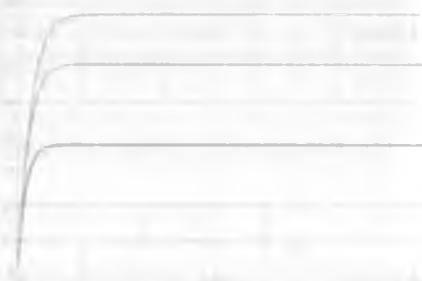


Рис. 6.9. График изменения по времени концентрации измельченных веществ по квазиаппаратам

При помощи модели процесса измельчения можно заранее вычислить необходимое время для получения ожидаемой продукции в мельнице периодического действия. Можно определить количество квазиаппаратов и изменение по времени концентрации измельченных веществ по квазиаппаратам мельницы непрерывного действия. Важным является то, что вычисления проводятся быстро и не требуется проведения множества опытов на действующих мельницах.

*Ключевые слова:* модель; структура потоков; аппарат; многоячеечная структура потока; квазиаппарат; перемешивание; ячейные модели; байпасные линии; измельчение; направленный случайный поиск.

### Контрольные вопросы

1. Как осуществляется декомпозиция аппарата по структуре потоков?
2. Что такое квазиаппарат?
3. Что представляет собой процесс измельчения?
4. В каком процессе наблюдается изменение спектра?
5. Что представляет собой процесс перемешивания?
6. В каких средах происходит перемешивание?
7. Как осуществляется направленный случайный поиск?

8. Какие зоны участвуют в процессе перемешивания?
9. Чем характеризуется процесс измельчения?
10. Что представляет собой многоячеечная модель процесса измельчения?
11. Как определяется оптимальное количество ячеек (квазиаппаратов) измельчителя?
12. Чем отличаются модели периодического и непрерывного измельчения?

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 6

1. Указано, что среди механических процессов в химической технологии важнейшее место занимает динамическая структура потоков материалов, энергии или в целом информации.
2. Введено новое понятие декомпозиции аппарата по динамической структуре потоков на квазиаппараты.
3. На примере анализа системы перемешивания показано определение описываемого времени.
4. Приведен пример многоступенчатого анализа, моделирования и расчета процессов и систем измельчения материалов. Указано на увеличение эффекта измельчения с увеличением числа квазиаппаратов и возможность определения оптимального числа квазиаппаратов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.
2. Artikov A. Multi-step method of computer model formalization with fuzzy sets application. WCIS-2004, world conference on intelligent systems for industrial automation. — Tashkent. 2004. TSTU.
3. Артиков А., Остапенков А. М., Курбанов Д. М., Саломов Х. Т. Электрофизические методы воздействия на пищевые продукты. — Т.: «Фан». 1992.
4. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. — М.: «Альянс». 2008. 751 с.
5. Математическое моделирование помольных агрегатов / М. А. Вердиян, В. В. Кафаров // Цемент. №12. С. 13—14.
6. Определение оптимального числа и соотношения длин камер трубных мельниц / В. В. Кафаров, М. А. Вердиян // Цемент. 1975. №8. С. 9—11.
7. Крыхтин Г. С. Интенсификация работы мельниц. — Новосибирск : «Наука». 1993. 239 с.
8. Математические модели структуры потока материала в мельницах / В. В. Кафаров, М. А. Вердиян // Цемент. 1977. № 5. С. 9—11; № 6. С. 12—13.
9. Юсупбеков Н. Р., Нурмухамедов Х. С., Зокиров С. Г. Кимёвий технология асосий жараён ва курилмалари. — Т.: «Шарк». 2003. 644 б.

## Т Е М А 7. АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

В теме рассматриваются анализ и синтез процессов и систем теплообмена. На основе многоступенчатого анализа показана возможность декомпозиции теплообменника, на примере кожехотрубного аппарата — декомпозиция на квазиаппараты по структуре потоков теплообменивающих агентов. Вы ознакомитесь со способами моделирования и принятия решения в выборе оптимальной системы теплообмена. Примеры синтеза оптимальных процессов и систем будут продолжены в теме 8.

### П л а н

7.1. Интересный пример. Моделирование и расчет процессов в рабочей зоне теплообменника

7.2. Процессы в теплообменниках

7.3. Многоступенчатый анализ теплообменника

7.4. Математическое описание элементарного процесса в регулируемом органе

7.5. Математическое описание процесса теплообмена при идеальном смешении

7.6. Математические описания процессов в паровом пространстве греющей камеры

7.7. Математические описания процессов в стенке и нагаре

7.8. Моделирование процессов в рабочей зоне теплообменника.

Примеры синтеза оптимального теплообменника

### 7.1. Интересный пример. Моделирование и расчет процессов в рабочей зоне теплообменника



Рис. 7.1.

Рассмотрим многоступенчатый анализ и расчет кожехотрубного теплообменника.

1. На основе гидродинамической структуры потоков трубчатой зоны теплообменник по длине теплообменных труб мысленно разделен на четыре квазиаппарата (рис. 7.1).

2. Формализованы компьютерная модель, алгоритм расчета и исследование кожухотрубного теплообменника (рис. 7.2).

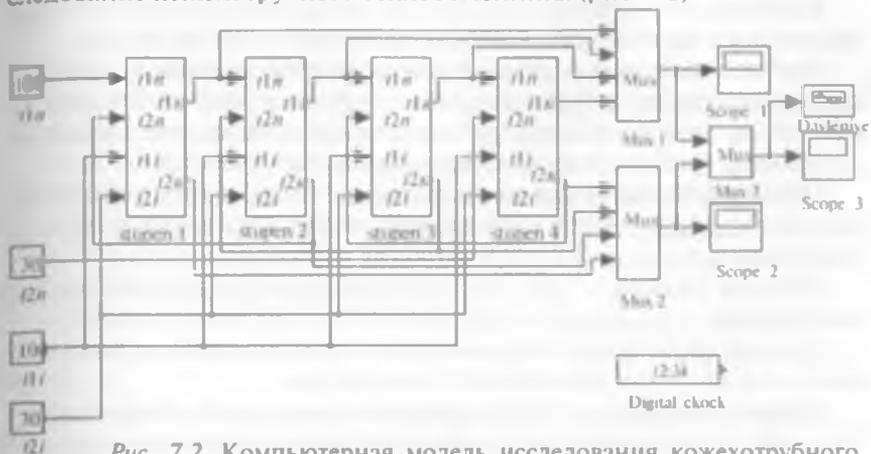


Рис. 7.2. Компьютерная модель исследования кожухотрубного 4-квазиаппаратного теплообменника

3. Осуществлен расчет. Результаты исследований приведены на рис. 7.3. Показана динамика пускового периода трубчатого теплообменника. Изменения температуры нагреваемого и нагревающего агентов по времени квазиаппаратов в противоточном теплообменнике.



Рис. 7.3. Динамика пуска. Изменение по времени температуры нагреваемого и нагревающего агентов в квазиаппаратах

Как видно, по квазиаппаратам температура холодной жидкости увеличивается, а горячей — уменьшается. Можно выбрать оптимальную длину трубы квазиаппарата и, соответственно, общий размер теплообменника. С увеличением количества квазиаппаратов точность модели увеличивается. Эта методика позволяет более точно рассчитать процесс и систему теплообмена.

## Основные понятия

**Теплообмен** — самопроизвольный, необратимый процесс переноса тепла в пространстве с однородным полем температуры.

**Многоступенчатый анализ теплообменной системы** — анализ с последовательным углублением в систему теплообмена. Рассматриваемый теплообменник расчленяется на составляющие элементы, уточняются процесс и параметры выбранного элемента.

**Параметры теплообменной системы** — показатели, факторы, характеризующие теплообменную систему и исследуемый процесс теплообмена.

**Рабочая камера** — система, где происходит основной процесс теплообмена.

**Теплопроводность** — перенос тепла через что-либо, происходящий в направлении убывающей температуры.

**Греющая камера** — гидродинамическая емкость, где давление греющего пара в ней по всему объему обычно одинаково.

**Теплообмен идеального смешения** — процесс теплообмена, где температура жидкости по всему объему считается одинаковой.

**Квазиаппарат** — подсистема, полученная на основе мысленного разделения теплообменного аппарата по структуре потоков теплообменивающих агентов.

## 7.2. Процессы в теплообменниках

Теплообменом называется самопроизвольный, необратимый процесс переноса тепла в пространстве с однородным полем температуры. Поле температуры — это совокупность значений температуры во всех точках пространственной области в данный момент времени. Перенос тепла всегда происходит в направлении убывающей температуры под действием теплопроводности (в твердых телах и жидкостях), конвекции (в движущихся жидкостях) и излучения (между двумя телами через промежуточную среду путем электромагнитных колебаний).

В зависимости от целей технологии происходят следующие тепловые процессы, относящиеся к элементарным процессам в иерархическом распределении:

— нагревание и охлаждение однофазных и многофазных сред жидкостей (высококонцентрированных растворов, бинарных смесей, суспензий, эмульсий);

— конденсация паров химически однородных жидкостей (воды, аммиака, фреонов) и их смесей (водно-спиртовых паров);

— конденсация водяных паров из паровоздушных смесей (при осушении воздуха);

— испарение воды в парогазовую среду (при увлажнении воздуха, сушке материалов, выпечке хлеба);

— кипение жидкостей (воды, высококонцентрированных растворов и сложных неоднородных систем) и др.

Теплообмен между различными теплоносителями часто происходит при следующих сочетаниях тепловых процессов:

— нагревание «холодной» жидкости за счет охлаждения горячей;

— нагревание жидкости за счет теплоты от конденсации греющего пара;

— кипение жидкости за счет охлаждения горячей жидкости.

— кипение жидкости за счет теплоты от конденсации греющего пара.

При расчете аппаратов эти элементарные процессы можно отнести к нижестоящей ступени иерархической лестницы.

Движущей силой процесса теплообмена является разность температур.

### 7.3. Многоступенчатый анализ теплообменника

В промышленности широко распространены поверхностные теплообменники. Рассмотрим иерархическое распределение элементарных процессов в кожухотрубном теплообменнике с паровым обогревом (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Теплообменник с паровым обогревом

Примем теплообменник за верхнюю ступень иерархической лестницы. Распределение подсистем показано на рис. 7.5.



Рис. 7.5. Распределение систем в рабочей зоне по линии передачи энергии

С точки зрения динамики процесса каждый элемент служит накопителем энергии, поэтому для удобства назовем его емкостью.

Последовательно по емкостям происходят следующие процессы:

- процесс дросселирования (в регулирующем органе);
- процесс в греющей камере;
- теплопроводность через стенку;
- теплопроводность через нагар;
- процесс внутри нагревательной трубы.

Греющую камеру можно расчленить на зону пара и конденсата. Процесс в греющей камере можно расчленить на последующие элементарные процессы: накопление пара → охлаждение → конденсация → теплопроводность через конденсат.

Процесс внутри нагревательной трубы можно расчленить на процесс теплоотдачи от стенки к жидкости и на процесс движения жидкости, характеризуемые гидродинамической структурой потока. Последний зависит от конфигурации аппарата и при составлении математического описания процесса непосредственно влияет на теплоотдачу. Расчет коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи освещен в курсах «Физика» и «Теплотехника», здесь рассмотрим процессы с учетом гидродинамической структуры потоков.

На основе рассмотренного выше метода многоступенчатого анализа для теплообменника с паровым обогревом можно рассмотреть глубинные явления в нем с применением квазиаппаратного принципа (рис. 7.1.).

На *первом иерархическом уровне* рассматривается теплообменник в виде системы с процессом теплообмена в ней, определяются входные и выходные параметры системы.

На *втором иерархическом уровне* учитывается, что установка состоит из элементов подвода нагреваемого и нагревающего агентов, рабочей зоны и зон отвода агентов. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

На *третьем иерархическом уровне* длинную рабочую зону теплообменника можно представить многоквазиаппаратной. Определяются входные и выходные параметры каждого квазиаппарата.

На четвертом иерархическом уровне каждый квазиаппарат можно представить из греющей камеры, стенки трубы и внутренности нагревательной трубы. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

На пятом иерархическом уровне греющую камеру можно расчленить на три подсистемы: фазу пара, фазу конденсата и стенку корпуса. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы.

#### 7.4. Математическое описание элементарного процесса в регулирующем органе

При регулировании расхода пара, газа, жидкостей в греющей камере ТО обычно применяется регулирующий клапан. Расход жидкости (газа) через регулирующий орган зависит от степени его открытия, а также разности давлений на линии поступающего пара (жидкости  $P_1$ ) и давления после клапана. Последнее можно принять равным давлению в греющей камере  $P_K$ .

Для математического описания расхода пара через сужающее устройство можно воспользоваться уравнением:

$$D = \kappa_1 \sqrt{P_1 - P_K}. \quad (1)$$

В данном случае коэффициент  $\kappa_1$  характеризует проходное сечение сужающего устройства (регулирующего органа) и показателей пара (плотность, коэффициент сжимаемости и т. д.).

Когда скорость жидкости (газа) через сужающее устройство достигает сверхзвуковой скорости, а это происходит в том случае, если  $P_1 = \frac{P}{0,53}$ , то расход не зависит от давления в греющей камере.

При этом математическое описание процесса через регулирующий орган упрощается:

$$D = 0,85\kappa_2 P_1 = \kappa_2 P_1. \quad (2)$$

#### 7.5. Математическое описание процесса теплообмена при идеальном смешении

К теплообменникам с гидродинамической структурой идеального смешения можно отнести процесс обогрева греющим паром при его конденсации в греющей камере. К теплообмену при идеальном смешении можно отнести элементарные процессы аппаратов, где

температуры жидкости по всему объему будут близки. Например, в аппаратах типа «рубашечных» входящая жидкость перемешивается со всей жидкостью, находящейся в объеме рубашки, поэтому жидкость на выходе из нее имеет температуру, близкую температуре жидкости в рубашке. Такой процесс описывается математической моделью с сосредоточенными параметрами. Из уравнения теплового баланса:

Накопление $\frac{d_{mc}t_{вых}}{d\tau}$	=	Приход $G_{вх} C_{вх} t_{вх} + \alpha F(t_{ст} - t_{вых})$	-	Расход $G_{вых} C_{вых} t_{вых}$
---	---	---	---	-------------------------------------

$$\frac{d_{mc}t_{вых}}{d\tau} = G_{вх} C_{вх} t_{вх} - G_{вых} C_{вых} t_{вых} + \alpha F(t_{ст} - t_{вых}). \quad (3)$$

Допустив, что  $G_{вх} = G_{вых}$ ;  $C_{вх} = C_{вых} + C$ ;  $m = const$ , получим:

$$\frac{dt_{вых}}{d\tau} = \frac{G_{вых}}{m} (t_{вх} - t_{вых}) - \frac{\alpha F}{mc} (t_{ст} - t_{вых}). \quad (4)$$

При статическом процессе  $\frac{dt}{d\tau} = 0$ . Тогда математическое описание будет характеризовать изменение температуры выходящей жидкости в статике. В этом случае определение температуры стенки необязательно. Поэтому для получения характеристики теплообменника в уравнении (4) температуру стенки можно заменить температурой нагревающей жидкости.

## 7.6. Математическое описание процессов в паровом пространстве греющей камеры

Процесс обогрева водяным паром при его конденсации разделяется на следующие элементарные процессы: накопление пара в емкости; охлаждение его до температуры конденсации; образование конденсата; теплопроводность через его пленку.

Для более детального изучения рассмотрим процесс обогрева водяным паром в вертикальном трубчатом теплообменнике (см. рис. 7.4). Пар в паровое пространство передается через сужающее устройство. Греющая камера представляет собой гидродинамическую емкость, давление греющего пара в ней по всему общему обычно одинаково. Поэтому при математическом описании по каналу изменения давления можно использовать модель идеального смешения.

Тогда

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{1}{\tau_{г,к}} (P_{г} - P_{г,к}), \quad (5)$$

где  $\tau_{г,к}$  — постоянное время в греющей камере.

При этом постоянные времени греющей камеры зависят от объема и расхода пара в ней:

$$\tau_{г,к} = \frac{V_{г,к}}{Q}, \quad (6)$$

где  $V_{г,к}$  — объем греющей камеры;  $Q$  — расход пара в ней.

Для анализа процессов в греющей камере можно принять средний расход греющего пара. Плотность и температура конденсации пара зависят от давления пара в греющей камере.

Температура конденсации водяного пара обычно имеет нелинейную зависимость:

$$t_k = f(P). \quad (7)$$

В условиях работы теплообменных аппаратов в пищевой промышленности ( $P = 90 - 300$  кПа) температуру конденсации водяного пара можно определить по уравнению:

$$t = 86 + 0,15P, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где  $P$  — давление в МПа.

В больших пределах изменение давления  $\Gamma$  можно аппроксимировать логарифмической зависимостью.

Пар конденсируется на поверхности нагрева и образует пленку конденсата. Среднюю толщину  $\delta_{ср}$  и толщину пленки на выходе  $\delta_{вых}$  можно выразить в виде линейной зависимости:

$$\delta_{ср} = \frac{3}{4} \delta_{вых}. \quad (9)$$

Толщина определяется по формуле:

$$\frac{d\delta_{вых}}{d\tau} = Q_n - \frac{\rho g}{3\mu H} \delta_{вых}^3. \quad (10)$$

где  $H$  — высота поверхности конденсации.

Теплопередача через пленку конденсата в вертикальной трубе происходит в поперечном направлении:  $\alpha = \frac{\lambda}{\delta_{вых}}$ .

При этом изменение температуры конденсата воды можно охарактеризовать тепловой емкостью, где количество тепла определяется средней температурой пленки. Тогда с учетом уравнения теплового баланса конденсата запишем:

$$\frac{dt_{\text{конс}}}{d\tau} = \frac{1}{\tau_K^1} (t_K - t_{\text{конс}}), \quad (11)$$

где  $t_K$  — температура конденсации пара;  $\tau_K^1$  — постоянная времени, т. е. среднее время пребывания сигнала;  $t_{\text{конс}}$  — температура выходящего конденсата.

Среднее время пребывания сигнала определяется по формуле:

$$\overline{\tau^1} = \frac{m_K G_K \delta}{\lambda F} = \frac{\delta^2 C_K \rho_K}{\lambda}, \quad (12)$$

где  $\rho_K$  — плотность конденсата;  $C_K$  — теплоемкость конденсата;  $\lambda$  — теплопроводность конденсата;  $F$  — площадь нагревающей поверхности;  $m_K$  — масса конденсата.

Таким образом, для приближенного описания динамики процесса конденсации можно использовать систему двух уравнений. При этом данный процесс исследуется в виде элемента с сосредоточенными параметрами.

Проанализируем математическое описание процесса конденсации.

Примем значения:  $D = 0,4 - 0,6 \text{ кг/с}$  ( $D$  — массовый расход);  $H = 4 \text{ м}$ ;

$$\mu = 2,84 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}; \quad C = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \quad \rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \lambda = 0,68 \frac{\text{Вт}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Запишем математическое описание процесса конденсации:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{D}{\rho} - (306,6 - \delta)^3. \quad (13)$$

Для удобства проанализируем дифференциальное уравнение изменения толщины конденсата путем разложения второго члена после знака равенства  $f(\delta) = (306,6 - \delta)^3$  в ряд Тейлора.

Постоянное значение толщины  $\delta = 0,0005 \text{ м}$ :

$$f(\delta) = f(\delta_0) + f'(\delta_0)\delta = 0,0036 + 21,6 \cdot \delta. \quad (14)$$

Подставляя уравнение (14) в уравнение (13), получим:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \left( \frac{D}{\rho} - 0,0036 \right) - 21,6 \cdot \delta. \quad (15)$$

Для данного случая постоянная времени переходного процесса имеет очень маленькую величину ( $\tau = 0,046 \text{ с}$ ).

Из уравнений (11) и (12) имеем:

$$\frac{dt_k}{d\tau} = 2,420(t_{\text{max}} - t_{k,\text{max}}). \quad (16)$$

Расчет изменения коэффициента теплопередачи по  $\Delta$  и  $H$  показал, что отклонение от среднего значения коэффициента теплоотдачи по высоте кипяtilьной трубы не превышает 20 %, наблюдается более существенное его изменение по разности температур. Изучение общего коэффициента теплопередачи в теплообменниках масла показало, что тепловое сопротивление конденсата не превышает 7 % общего сопротивления при разности температур между температурой конденсации греющего пара и кипящей жидкости — 50°.

Динамика процесса конденсации общую динамику процесса существенно не изменяет, поэтому определено, что в греющей камере большой инерционностью отличается процесс накопления пара.

В статике процесса дифференциал по времени равен нулю, поэтому процесс в емкости характеризуется температурой конденсации, которая однозначно зависит от давления. Для определения расхода греющего пара можно использовать формулу, полученную из уравнения теплового баланса греющей камеры:

$$\Delta = \frac{\alpha F(t_k - t_c)}{i_n - ct_k}, \quad (17)$$

где  $i_n$  — энтальпия пара.

Процесс в греющей камере с учетом регулирующего органа представим в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{D\tau} &= \frac{1}{\tau_{\text{ex}}} (P_1 - P_{\text{ex}}); \\ D_n &= k_1 \sqrt{(P_1 - P_K)} \quad \text{при } P_1 < 1,9 \cdot P_K; \\ D_n &= k_1 P_1 \quad \text{при } P_1 \geq 1,9 \cdot P_K; \\ D &= \frac{\alpha F(t_k - t_c)}{i_n - ct_k}; \\ \alpha &= 2,04 \sqrt{\frac{\rho^2 \lambda r}{\mu H(t_k - t_c)}}; \\ t_k &= f(P). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Как видно, описание динамики процесса конденсации, состоящее из двух описаний апериодических звеньев, указывает на очень короткое время переходного процесса. Поэтому в исследовании динамики процесса аппаратов этот процесс можно описать моделью усилительного звена и включить в математическую модель более инерционных звеньев.

### 7.7. Математическое описание процессов в стенке и нагаре

Обычно в теплообменниках, учитывая меньшие относительные размеры толщины трубы по сравнению с высотой, пренебрегают продольной теплопроводностью. Из уравнения теплового баланса для стенки запишем:

$$\frac{dM_{cm}C_{cm}t_{cm}}{d\tau} = [\alpha_1\pi d_H n(t_k - t_{cm}) - \alpha_2\pi d_n n]. \quad (19)$$

После математических преобразований имеем:

$$\frac{dt_{cm}}{d\tau} = \frac{1}{\rho_{cm}C_{cm}(d_H^2 - d_n^2)} = [\alpha_1 d_H (t_k - t_{cm}) - \alpha_2 d_n (t_{cm} - t_{ж})], \quad (20)$$

где  $\rho_{cm}$  — плотность стенки;  $C_{cm}$  — теплоемкость стенки;  $d_n, d_n$  — наружный и внутренний диаметры нагревающей трубки соответственно;  $t_k, t_{cm}$  — температура стенки и конденсата соответственно;  $t_k, t_{ж}$  — температура жидкости;  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке и от стенки к кипящей жидкости.

Например, принимая следующие показатели:  $H = 4$  мм;  $n = 241$ ;  $d_n = 35$  мм = 0,035 м;  $d_n = 30$  мм = 0,030 м;  $\rho_{cm} = 8500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\rho_{ж} = 0,394 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ ;  $\alpha_1 = 3000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ ;  $\alpha_2 = 350 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ , получаем:

$$\frac{dt_{cm}}{d\tau} = 0,364(1,061t_k + 0,061(t_{ж} - t_{cm})). \quad (21)$$

Уравнение (21) также имеет маленькое постоянное значение времени ( $\tau = 2,8$  с).

Аналогично протекает процесс в нагаре. Для математического описания нагара запишем следующее выражение:

$$\frac{dt_H}{d\tau} = \frac{1}{\tau_n}(t_{cm} - t_H). \quad (22)$$

Постоянная времени имеет вид:

$$\bar{\tau}_n = \frac{\delta_n^2 C_n \rho_n}{\lambda_n}, \quad (23)$$

где  $t_n$  — температура нагрева;  $\bar{\tau}_n$  — постоянная времени нагара;  $\rho_n$  — толщина нагара.

В пищевых аппаратах нагар может иметь следующие показатели:

$$\delta_n = 0,001 \text{ м}; \quad d_n = 30 \text{ мм} = 0,030 \text{ м}; \quad \rho_n = 200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad c_n = 1,68 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}};$$

$\lambda_n = 0,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ . Тогда  $\bar{\tau}_n = 0,24$  имеет весьма маленькую динамическую емкость и ею можно пренебречь при анализе и синтезе динамики процесса.

Предлагаем методику упрощения математических описаний путем анализа времени инерции и коэффициентов усиления выбранных элементов в иерархической ступени [1].

В приведенном в начале темы примере представлен новый подход к моделированию процесса в рабочей зоне теплообменника, который должен найти развитие в дальнейших исследованиях. Здесь приведем некоторые примеры нахождения оптимальных решений по выбору системы теплообмена.

## 7.8. Моделирование процессов в рабочей зоне теплообменника.

### Примеры синтеза оптимального теплообменника

**Теплообменник «смешение—смешение».** Технологический процесс «смешение—смешение» происходит при подогреве жидкостей в рабочей зоне автоклавов, котлов рубашечных (рис. 7.6).

Например, в котлах рубашечных жидкость, полностью перемешиваясь, отдает тепло нагревающей стенке, в другой стороне нагреваемая жидкость отнимает его через стенку у горячей жидкости.

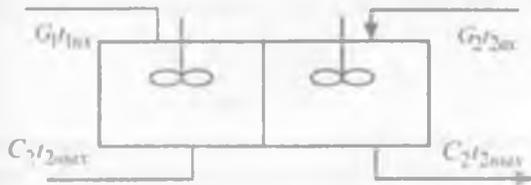


Рис. 7.6. Структурная схема теплообменника «смешение—смешение»

Поэтому температура жидкостей характеризуется уравнениями, включающими уравнения материального баланса. Для расчета процесса запишем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt_1}{d\tau} &= \frac{G_1}{m}(t_{1\text{вх}} - t_1) - \frac{KF}{m_1 c_1}(t_1 - t_2) \\ \frac{dt_2}{d\tau} &= \frac{G_2}{m}(t_{2\text{вх}} - t_2) - \frac{KF}{m_2 c_2}(t_2 - t_1) \\ G_1 &= G_{1\text{вх}} = G_{1\text{вых}} \\ G_2 &= G_{2\text{вх}} = G_{2\text{вых}} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Имеются четыре выходных параметра  $t_{1\text{вых}}, t_{2\text{вых}}, G_{1\text{вых}}, G_{2\text{вых}}$ , которые можно определить из системы уравнений (24). Изменение температуры выходящей жидкости от температуры поступающей жидкости хорошо прослеживается на рис. 7.7, зависимость температуры от расхода холодного агента — на рис. 7.8.

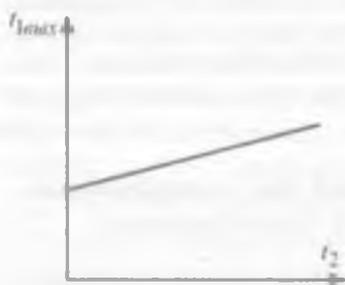


Рис. 7.7. График изменения температуры выходящей жидкости от температуры поступающей жидкости

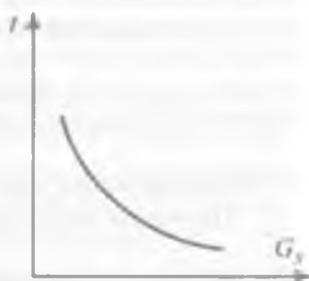


Рис. 7.8. График зависимости температуры от расхода холодного агента

С помощью системы (24) можно рассчитать различные показатели теплообменников.

Поверхность нагрева определим из общезвестного уравнения:

$$F = \frac{G_1 C_1 (t_{1\text{вых}} - t_{1\text{вх}})}{K(t_2 - t_1)} \quad (25)$$

Разновидностью теплообменника «смешение—смешение» является использование насыщенного водяного пара в качестве теплоносителя. Тогда математическую модель статического процесса можно выразить системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt_1}{d\tau} &= \frac{G_1}{m}(t_{\text{вх}} - t_1) - \frac{KF}{mc}(t_1 - t_{\text{кв}}) \\ t_{\text{кв}} &= f(\rho) \\ D_{\text{II}} &= \frac{KF(t_{\text{кв}} - t_1)}{t_n - c_{\text{кв}}t_{\text{кв}}} = D_K \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Система уравнений (26) дает возможность получить различные зависимости основных переменных процессов, то есть производить расчет процесса.

Расчет аппарата можно выполнить путем определения оптимального давления греющего пара в аппарате (рис. 7.9). При этом в качестве критерия оптимальности выберем стоимость общих затрат ( $C_{\text{общ}}$ ), состоящая из стоимости затрат водяного пара ( $C_1$ ) и амортизационных отчислений ( $C_2$ ).

С увеличением давления затраты водяного пара экспоненциально снижаются, а амортизационные отчисления возрастают.

Как видно из рис. 7.9, имеется оптимальное давление, при котором общие затраты на процесс будут наименьшими.

**Теплообменник «смещение—вытеснение».** К данному типу теплообменников относятся змеевиковые и кожухотрубные. Последние обычно используются в пищевой промышленности для обогрева водяным паром. Математическая модель состоит из нескольких математических моделей: греющей камеры, нагревательной трубы и др. Ее можно выразить системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} D_{\text{II}} &= \frac{RF(t_{\text{кв}} - t)}{t_n - c_{\text{кв}}t_{\text{кв}}} = D_{\text{кв}} \\ t_{\text{кв}} &= f(\rho) \\ \frac{dt}{d\tau} &= \frac{4Gc}{\pi d^2 \rho} \frac{dt}{dl} + \frac{4K(t_{\text{кв}} - t)}{d\rho c} \\ G_{\text{вх}} &= G_{\text{вых}} = G \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

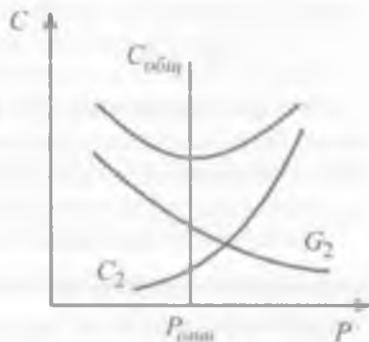


Рис. 7.9. График определения оптимального давления греющего пара в аппарате

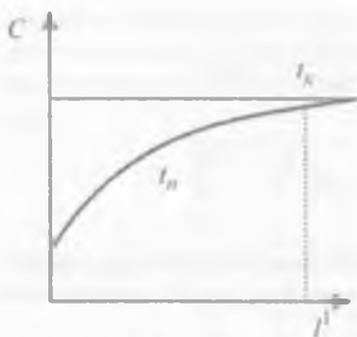


Рис. 7.10

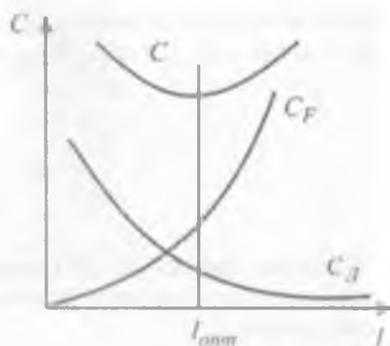


Рис. 7.11

Система уравнений (29) в зависимости от постановки задачи может быть рассчитана для различных вариантов. На рис. 7.10 показано изменение температуры конденсата и нагреваемой жидкости по длине теплообменной трубы  $l$ .

Температура нагреваемой жидкости при постоянной температуре конденсата увеличивается экспоненциально. За пределами длины  $l^1$  теплообменник работает вхолостую.

Оптимальный расчет теплообменника можно выполнить по длине нагревательной трубы при заданном ее диаметре. Принимаем за критерий оптимальности стоимость затрат на нагревание, состоящую из стоимости затрат греющего пара и амортизационных отчислений, которые зависят от длины выбираемого теплообменника. С увеличением  $l$  возрастает коэффициент использования греющего пара, так как температура приближается к температуре его конденсата.

Таким образом, стоимость ( $C_d$ ) расхода теплоносителя на единицу нагреваемой жидкости, с одной стороны, уменьшается, с другой — увеличивается поверхность нагрева ( $F = \pi ndl$ ), следовательно, и стоимость амортизационных отчислений ( $C_F$ ). При оптимальной длине теплообменника общая стоимость затрат ( $C_{\text{общ}}$ ) наименьшая (рис. 7.11).

**Ключевые слова:** теплообменник; МСА теплообменника; модель процесса в греющей камере; теплообменники кожухотрубные; теплообменник «смешение—вытеснение»; квазиаппарат; температура конденсации; теплообмен при идеальном вытеснении; выбор оптимального теплообменника.

## Контрольные вопросы

1. Как осуществляется МСА теплообменника?
2. Что представляет собой рабочая камера?
3. Что вы знаете о теплообмене идеального смешения?
4. Что вы знаете о теплообмене идеального вытеснения?
5. Какой процесс называется дросселированием?
6. Какой процесс называется теплопроводностью?
7. Какой процесс называется теплообменом?
8. Какие бывают теплообменники?
9. Что представляет собой квазиаппарат?
10. Из каких уравнений состоит модель процесса в греющей камере?
11. Из каких уравнений состоит модель процесса в стенке?
12. Из каких блоков состоит модель процесса в теплообменнике?
13. Как составляется математическое описание процесса в рабочей камере?
14. Как производится постановка задачи выбора оптимального теплообменника?
15. Как составляется математическое описание процесса в квазиаппарате?
16. Из каких подсистем состоит многоуровневая структура системы и процесса?
17. Что выбрано критерием оптимизации?
18. Каковы выбранные оптимальные условия?
19. Какие компромиссные задачи решаются для оптимизации процесса?
20. Что такое оптимизация, какова ее цель и критерии?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 7

1. Разъясняется многоступенчатый анализ системы теплообмена.
2. Приводится многоступенчатая методика построения компьютерной модели теплообменного процесса.
3. Указывается на возможность определения оптимальных условий технологического процесса и выбора системы теплообмена при расчленении теплообменной установки на квазиаппараты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Артиков А. А.* Процессы и аппараты пищевых производств (математическое моделирование, теплообменные процессы, выпаривание). — Т.: «Укитувчи» 1983.
2. *Артиков А., Маматов Э., Яхшимуродова Н.* Анализ воздействия активной воды при тепловой обработке продуктов питания. — Т.: «Фан», 1994.

3. *Артиков А., Маматкулов А. Х., Додаев К. О., Яхшимурадова Н. К.* Системный анализ концентрирования растворов инертным газом. — Т.: «Фан». 1987. 164 с.

4. *Артиков А., Остапенков А. М., Курбанов Дж. М., Саломов Х. Т.* Электрофизические методы воздействия на пищевые продукты. — Т.: «Фан». 1992.

5. *Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. — Ленинград. 1987. 143 с.

## **Т Е М А 8. АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ВЫПАРКИ ЖИДКОСТЕЙ**

Цель темы — разъяснение новой методики расчета и выбора оптимального решения выпарки жидкостей на основе многоступенчатого углубления в систему и математического моделирования. Приведены примеры для систем с кожехотрубным выпарным аппаратом и аппаратом барботажного типа. Показано, как можно исследовать установку, углубляясь шаг за шагом в изучаемую систему выпаривания, используя принцип расчленения аппарата на квазиаппараты, особенно барботажного слоя. Вы ознакомитесь с формой моделирования, принятия решения в выборе оптимальной системы выпаривания с помощью разработанных нами компьютерных моделей. Компьютерная модель и программы автоматизированного расчета имеются в библиотеке кафедры ИАБ ТХТИ.

### **П л а н**

8.1. Интересный пример. Анализ моделирования и расчет процесса выпаривания жидкостей

8.2. Синтез системы барботажного выпаривания жидкости

8.3. Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры жидкой фазы, теплоемкости пульсы и энтальпии водяного пара

8.4. Пример расчета. Синтез оптимальной системы выпаривания в БВА

### **8.1. Интересный пример. Анализ моделирования и расчет процесса выпаривания жидкостей**

Выпаривание — типичный процесс химической технологии. Его сущность заключается в испарении части растворителя и, благодаря этому, в увеличении концентрации раствора.

Рассмотрим компьютерную модель расчета процесса выпарки.

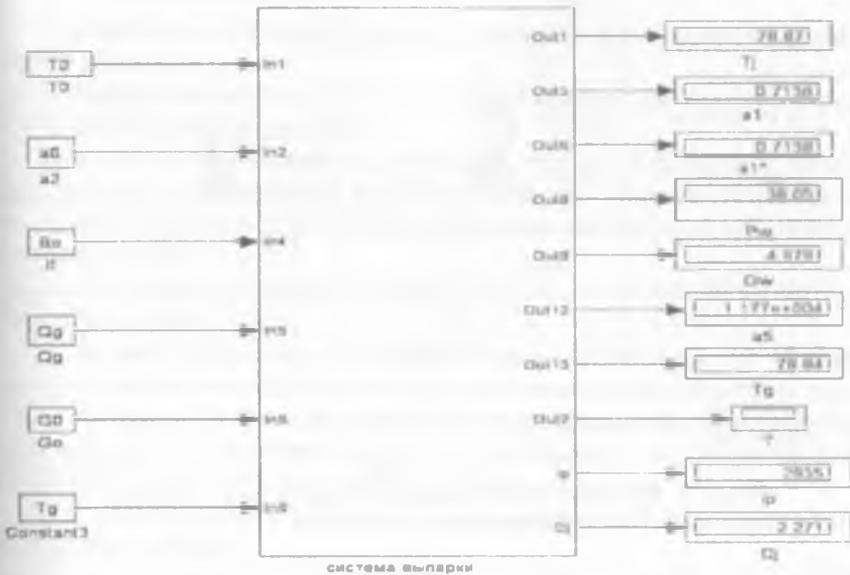


Рис. 8.1. Компьютерная модель расчета процесса выпарки

Выпарка материалов имеет существенное значение в производстве различных продуктов. В данном примере рассмотрен кожехотрубный выпарной аппарат, рабочая камера которого состоит из греющей камеры, стенки кипяtilьных труб, концентрируемой жидкости, находящейся внутри кипяtilьных труб. Рабочая камера нагревается водяным паром аналогично теплообменнику, представленному на рис. 7.4. В кипяtilьных трубах аппарата поступающая жидкость выпаривается за счет тепла, поступающего из греющей камеры через стенки труб.

Исследования на компьютерной модели производятся следующим образом: в компьютер вводятся исходные данные процесса выпарки для автоматического вычисления всех промежуточных и выходных показателей. Можно определить закономерности изменения таких технологических параметров, как температура, концентрация выпариваемой жидкости, теплоемкость, энтальпия, расход выходящей выпариваемой жидкости и др., в зависимости от расхода водяного пара, его температуры, расхода и температуры поступающей на выпарку жидкости.

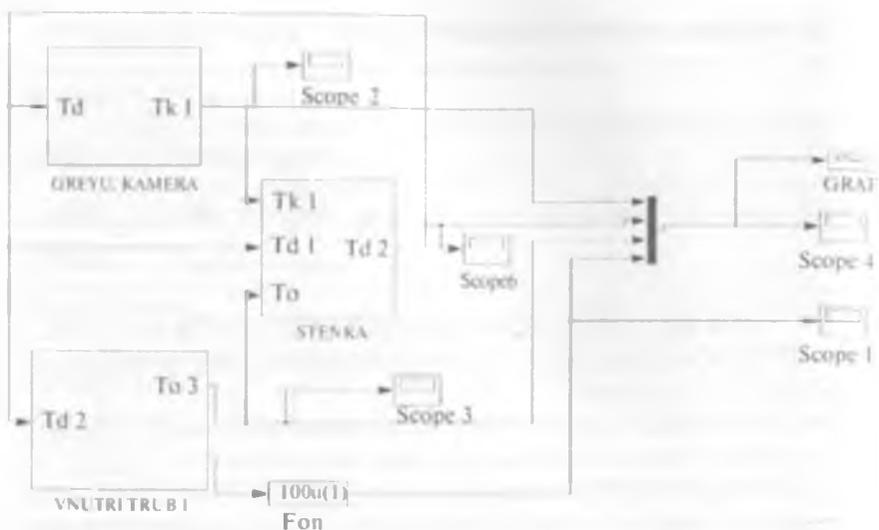


Рис. 8.2. Компьютерная модель: блочный вид процессов в отдельных элементах

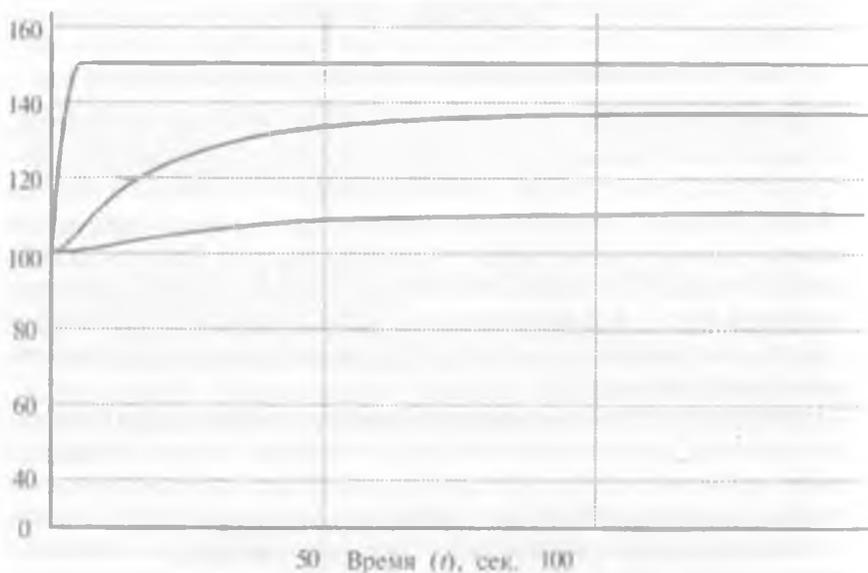


Рис. 8.3. Компьютерная модель и пусковые характеристики кожехотрубного выпарного аппарата: (кривые сверху вниз) температура в греющей камере; температура стенки кипятильных труб; температура концентрируемой жидкости; концентрация выпариваемой жидкости

*Для достижения результата:*

1) разработана методика многоступенчатого анализа процесса выпарки жидкости;

2) построены математические модели процессов, протекающих в элементах аппарата выпарки;

3) математически описан коэффициент теплопередачи от греющего пара к выпариваемой жидкости. Для этого используются компьютерные программы на основе нейронных сетей или многостепенных рядов и др.;

4) математически смоделирован процесс равновесия в системе «жидкость—газ»;

5) сформализована модель всего процесса выпарки на основе математических моделей составных функциональных подсистем (рис. 8.2) и методика интеллектуального расчета процесса. Построение математических (компьютерных) моделей выполнено на основе современных пакетов прикладных программ «Matlab»;

6) осуществлен расчет (рис. 8.3), позволяющий определить оптимальный аппарат.

## 8.2. Синтез системы барботажного вынаривания жидкости

**Многоступенчатый системный анализ барботажного выпарного аппарата.** В барботажном выпарном аппарате (рис. 8.4) поступающая жидкость в рабочей камере нагревается и выпаривается за счет тепла горячего газа, поступающего из топки. Нами предложено также использование барботажного выпарного аппарата для концентрирования жидкостей при переработке сельскохозяйственного сырья.

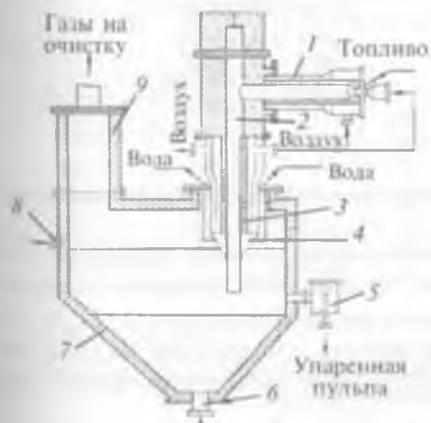


Рис. 8.4. Общий вид БВА:

- 1 — топка;
- 2 — газозод;
- 3 — барботажная труба;
- 4 — охлаждаемый наконечник барботажной трубы;
- 5 — регулятор уровня;
- 6 — патрубок;
- 7 — корпус;
- 8 — входящий патрубок;
- 9 — брызгоуловитель.

Предположим, что корпус аппарата разделен на секции по длине аппарата.

На *первом иерархическом уровне* рассмотрена исходная установка. Она представлена как определенная совокупность отдельных элементов процесса выпаривания жидкостей, на которые удастся расчленить изучаемый объект по каналам перемещения обрабатываемой жидкости.

В результате такого подхода можно выделить отдельные элементы второго уровня:

- систему подвода жидкости;
- систему выпаривания жидкости (рабочая зона);
- систему подготовки и подвода газа в жидкость в аппарате;
- систему отвода парогазовой смеси из выпарного аппарата барботажного типа.

Входными параметрами первого иерархического уровня — системы выпаривания барботажного типа (рис. 8.5) являются: расход поступающей пульпы ( $G_0$ ); концентрация жидкости ( $a_0$ ); температура исходного вещества ( $t_0$ ). В систему также входят: расход топлива ( $D_0$ ); температура топлива ( $t_D$ ); расход воздуха ( $G_{a0}$ ) и его температура ( $t_{a0}$ ).

Выходными параметрами системы являются: расход концентрированной жидкости ( $G_1$ ); ее концентрация ( $a_1$ ); температура концентрированной жидкости ( $t_1$ ); расход ( $G_{a1}$ ) и температура уходящих газов ( $t_{a1}$ ).



Рис. 8.5. Структурная параметрическая схема процесса выпаривания

На *втором иерархическом уровне* система подвода жидкости представлена следующими входными параметрами: давление линии поступающей жидкости ( $P_1$ ); давление выпарного аппарата ( $P_{вк}$ ); если используется мембранный исполнитель, то давление на мембранный исполнительный механизм. Выходным параметром является расход поступающей жидкости.

Основным элементом второго иерархического уровня является система «рабочая зона аппарата выпарки», где происходит концентрирование жидкости с воздействием горячего газа. Она представлена на рис. 8.6 в виде блока 2-3. Входными параметрами системы являются: расход поступающей жидкости ( $G_0$ ); концентрация жидкости ( $a_0$ ); температура жидкости ( $t_0$ ); давление ( $P_{ca}$ ) в аппарате, а также расход горячего газа ( $G_{сдо}$ ), его температура ( $t_{сдо}$ ) и давление ( $P_{сд}$ ). Выходными параметрами системы являются: расход уходящего газа ( $G_{сд1}$ ) и его температура ( $t_{сд1}$ ), расход выходящей жидкости ( $G_1$ ), ее концентрация ( $a_1$ ) и температура ( $t_1$ ), а также уровень ( $H_1$ ) в кубе выпариваемой жидкости.

В системе 2-2 моделируется сжигание топлива. Подвод газа в выпарной аппарат состоит, в свою очередь, из следующих входных параметров: расход топлива ( $D_0$ ), температура топлива ( $t_{с0}$ ), расход воздуха ( $G_{с0}$ ), температура расходуемого воздуха ( $t_0$ ), давление воздуха ( $P_a$ ). Из системы выходит воздушная смесь с расходом ( $G_{ср0}$ ), температурой ( $t_{ср0}$ ) и давлением ( $P_{ср0}$ ). Горячий газ будет поступать в систему выпаривания.

На третьем иерархическом уровне рассматриваются элементы рабочей камеры — блок 2-3. Он представляется мысленно многослойным (квасислойным).

На четвертом иерархическом уровне рассматриваются элементы квазислой парожидкостной смеси, который состоит из двух подсистем: жидкой фазы и паровой фазы.

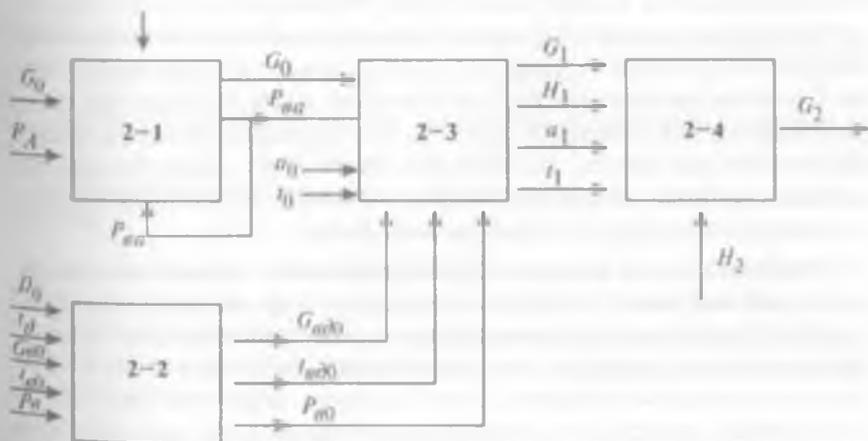


Рис. 8.6. Структурная параметрическая схема многоступенчатого анализа системы барботажного выпаривания

Система жидкой фазы имеет следующие входные параметры: расход поступающей жидкости ( $G_0$ ); концентрация жидкости ( $a_0$ ); температура жидкости ( $t_0$ ); давление выпарного аппарата ( $P_{вд}$ ), а также расход ( $G_{вкл}$ ), температура ( $t_{вкл}$ ) и давление ( $P_{вд}$ ) горячего воздуха. Расход паров, выходящих из жидкости ( $G_{вл}$ ), является входом для газовой системы. Из газовой системы выходит газ с расходом ( $G_{вл}$ ) и температурой ( $t_{вл}$ ). Из жидкой системы выходит жидкость с расходом ( $G_1$ ), концентрацией ( $a_1$ ) и температурой ( $t_1$ ) (рис. 8.7).

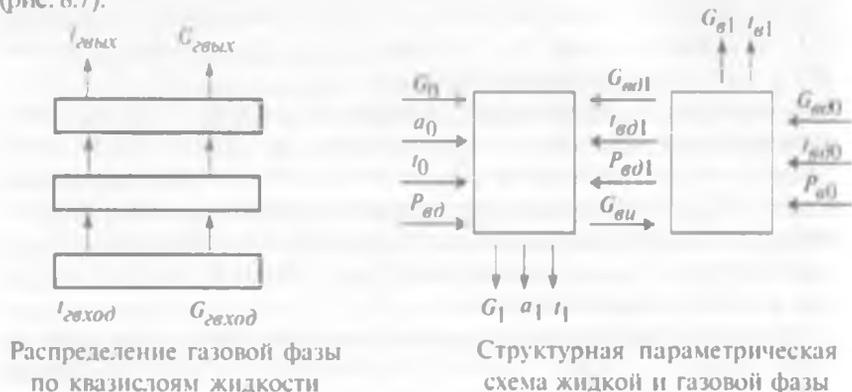


Рис. 8.7

Таким образом, иерархическая структура процесса выпаривания позволяет более детально анализировать систему выпаривания жидкости в аппаратах барботажного типа. На основе этого анализа будет построена математическая модель технологического процесса. Построение математической модели начинается с глубинного уровня. Создавая математические описания для жидкой и паровой фаз и переходя на вышестоящие уровни, будет сформализована общая математическая модель, на основе которой будут определены оптимальные условия проведения технологического процесса и оптимальная система барботажного выпаривания.

**Математическое описание и моделирование процессов в квазислое и рабочей зоне.** Выпаривание жидкости происходит в рабочей зоне барботажного выпарного аппарата. Для удобства расчета гидродинамическую структуру потоков жидкой фазы примем по типу идеального перемешивания, тогда жидкую фазу — за сплошную среду (здесь происходит процесс выпаривания). Из жидкой фазы испаряются пары влаги и переходят в паровую фазу. Газ, выходя из барботера, расщелняется на мелкие пузырьки, которые последо-

вательно будут подниматься вверх по квазислоям. При формализации математической модели процесс в жидкой фазе можно было бы записать дифференциальным уравнением первого порядка, а процесс в газовой фазе — дифференциальным уравнением частных производных. Однако при решении модели численными методами, используя хорошо развитые компьютерные программы, пришлось бы перейти к созданию уравнений кусочно-линейных интерпретаций. Последующие анализы показали, что более приемлемо использование дискретного метода путем разбиения парогазовой фазы на квазислои. Тогда газ, переходя через слои жидкости, контактирует с жидкостью и отдает свое тепло, а жидкость концентрируется. Идеальное перемешивание жидкости отличается тем, что она имеет одинаковую по всему объему температуру и концентрацию, а газ, переходя из слоя в слой, уменьшает свою температуру и обогащается парами влаги.

Уравнение теплового баланса для жидкой фазы имеет вид:

$$\frac{dQ_1}{dt} = q_{\text{вх}1} - q_{\text{вых}1} + \Delta q_1, \quad (1)$$

где  $q_{\text{вх}1}$  — расход тепла, входящего в жидкость;  $q_{\text{вых}1}$  — расход тепла, выходящего из жидкости;  $\Delta q_1$  — расход тепла на образование паров влаги.

Тепло, входящее в элементарную зону жидкой фазы, выражается уравнением:

$$q_{\text{вх}1} = G_{10} \cdot c_{10} \cdot t_{10}, \quad (2)$$

где  $G_{10}$  — расход тепла жидкости, кг/с;  $c_{10}$  — теплоемкость жидкости, кДж/кг К;  $t_{10}$  — температура жидкости, °С.

Тепло, выходящее из зоны (квазислоя), выражается уравнением:

$$q_{\text{вых}1} = G_1 \cdot c_1 \cdot t_1. \quad (3)$$

Образовавшиеся пары влаги, отводящие тепло, выражаются уравнением:

$$Q_{\text{вх}1} = \Delta G_n \cdot l, \quad (4)$$

где  $l$  — энтальпия пара, кДж/кг.

Тепло, выводимое парами испарившейся воды из одного аппарата (если имеется ряд последовательно соединенных аппаратов), запишем уравнением:

$$\Delta q_1 = \left( \frac{1}{a_1 - 2} - \frac{1}{a_i - 1} \right) \cdot G_0 \cdot a_0. \quad (5)$$

Для расчета тепла, передаваемого газом, удобно использовать объемный коэффициент теплоотдачи. Тогда тепло, передаваемое газовой фазой, записывается уравнением:

$$\Delta q_{z_i} = K \cdot \Delta V'_m (t - t_1), \quad (6)$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи.

Уравнение теплового баланса для газовой фазы имеет вид:

$$\frac{dQ_z}{d\tau} = q_{ax_z} - q_{вых_z} - q_i. \quad (7)$$

Тогда входящий газ подводит теплоту, выраженную уравнением:

$$q_{ax_z} = G_{z_0} \cdot c_{z_0} \cdot t_{z_0}. \quad (8)$$

Из этой ячейки барботируемый газ выводит теплоту, выражаемую уравнением:

$$q_{вых_z} = G_z \cdot c_z \cdot t_z. \quad (9)$$

где  $G_{z_0}, G_z$  — расход теплоты газа и воздуха, кг/с;  $c_{z_0}, c_z$  — теплоемкость газа и воздуха, кДж/кг К;  $t_{z_0}, t_z$  — температура газа и воздуха, °С.

Таким образом, рассмотрены основные элементы теплового баланса для систем жидкой и газовой фаз.

Для определения расхода концентрированной жидкости на основе материального баланса жидкой фазы и учитывая, что при выпаривании нелетучая жидкость имеет постоянный расход, можно записать:

$$a_0 \cdot G_0 = a_1 \cdot G_1. \quad (10)$$

Расход жидкости в элементарной зоне выражается уравнением:

$$G_1 = \left( \frac{a_0}{a_1} \right) \cdot G_{1_0}. \quad (11)$$

Тогда влага, переходящая в паровую фазу, характеризуется уравнением:

$$\Delta G_i = G_{1_0} - G_1 = \left( \frac{1}{a_1 - 1} - \frac{1}{a_1} \right) \cdot G_{1_0} \cdot a_0. \quad (12)$$

Известно, что температура является одним из главных факторов, воздействующих на процесс. Большое значение при выпаривании растворов имеет температура кипения жидкости. В большинстве

случаев в рассматриваемых пределах процесса выпаривания жидкости допускается линейная зависимость ее температуры кипения от концентрации. Тогда она характеризуется уравнением:

$$T = b_0 + K_I \cdot a \quad (13)$$

Вместе с тем присутствие воздуха в парогазовой фазе БВА создает условие квазивакуума (как бы вакуума). Для такого случая температура кипения жидкости определяется для рассчитанного условия вакуума. Такой подход был использован для определения расчетной концентрации выпариваемой жидкости в уравнении (8. 28).

Теперь перейдем к анализу теплоты жидкости в элементарной зоне с помощью уравнения:

$$Q = m \cdot c_1 \cdot t_1. \quad (14)$$

С другой стороны, масса жидкости зависит от объема и плотности жидкости:

$$m = V_m \cdot S_m. \quad (15)$$

Для барботажных аппаратов установлено, что при хорошей работе барботажной установки объем паровой фазы занимает 2/3 объема, жидкая фаза — 1/3 объема, поэтому записываем:

$$V_{ж} = \frac{1}{3} \cdot V_{ам}. \quad (16)$$

Учитывая уравнения (14) и (15), получим уравнение для теплоты жидкой фазы элементарной ячейки:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot V_{ам} \cdot S_m \cdot t_1. \quad (17)$$

Учитывая температуру кипения (уравнение 13), переходим к уравнению

$$Q_1 = \frac{1}{3} \cdot V \cdot S_m \cdot t_1 = \frac{1}{3} \cdot V \cdot S_m (b_0 + K_I \cdot a). \quad (18)$$

После дифференцирования теплоты элементарной ячейки имеем уравнение, характеризующее изменение концентрации во времени:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{3} \cdot V \cdot S_m \cdot K_I \cdot \frac{da}{dt}. \quad (19)$$

Уравнение для теплоты, выводимой жидкостью из элементарной зоны, имеет вид:

$$q_{вых1} = \frac{a_0}{a_1} \cdot G_{10} \cdot c_1 \cdot t_1. \quad (20)$$

После определенных преобразований динамика процесса системы жидкой фазы для элементарной зоны характеризуется системой уравнений:

$$\frac{da_i}{d\tau} = \frac{3}{1pK_i} \left[ G_0 \cdot c_{i-1} \cdot t_{i-1} - \frac{a_0}{a_i} \right] \cdot G_{10} \cdot c_{ij} - \left( \frac{a_0}{a_i - 1} - \frac{a_0}{a_i} \right) \cdot G_{10} \cdot I + \left( \frac{1}{a_i - 2} - \frac{1}{a_i - 1} \right) \cdot G_0 \cdot a_0 \cdot I_i + K \cdot V (t_{2i-2} - t_{i-1}); \quad (21)$$

$$t_i = (G_0 + K_f \cdot c_i); \quad (22)$$

$$I = (I_0 + K_f (t_2 - t_{20})); \quad (23)$$

$$c_i = (c_{10} + K \cdot c_1 (t_1 - t_{10})), \quad (24)$$

где уравнение (22) характеризует температуру жидкости в элементарной зоне; (23) — энтальпию пара; (24) — изменение концентрации. Вместо уравнения (21) можно воспользоваться уравнением температуры жидкости. Такой вариант использован в компьютерной модели, приведенной на рис. 8.8.

Динамика пуска по температуре газовой фазы выражается уравнением:

$$\left\{ \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{V_g \cdot \delta_g} \left[ G_{20} \cdot c_{2i-1} \cdot t_{2i-1} - G_{20} \cdot c_i \cdot t_i - K \cdot \Delta V_{in} (t_{i-1} - t_i) \right] \right\}. \quad (25)$$

Для статического режима используется уравнение:

$$t_{ij} = \frac{K \cdot V_j (T_{2j-1} - t_{j-1}) - G_{2j} \cdot c_{2j-1} \cdot t_{2j-1}}{G_{2j} \cdot c_{ij}}. \quad (26)$$

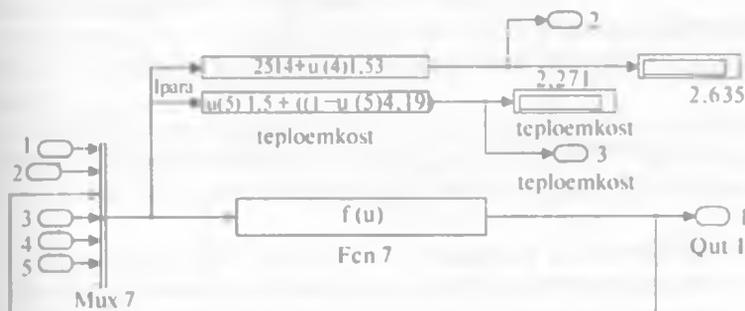
(Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры газовой фазы приведено на рис. 2.2 в теме 2).

Преобразуя уравнения (21–23), можно определить температуру жидкости для статического режима:

$$T = ((G_0 \cdot a_0 \cdot C_0 \cdot u_1 / u_5) + u_2 - (G_0 \cdot a_0 \cdot C_C \cdot T / u_4) - (G_0 \cdot ((a_0 / u_5) - (a_0 / u_4)) \cdot u_3)) / (V_{вв} R_0 C_C). \quad (27)$$

где  $G_0$  — расход исходной пульпы;  $a_0$  — начальная концентрация пульпы на входе в аппарат;  $V_{ea}$  — объем аппарата;  $R_0$  — теплопроводность материала аппарата;  $C_0$  — теплоемкость пульпы;  $C_c$  — теплоемкость среды (температура пульпы на входе в аппарат).

Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры жидкой фазы, теплоемкости пульпы и энтальпии водяного пара имеет вид:



### 8.3. Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры жидкой фазы, теплоемкости пульпы и энтальпии водяного пара

Парциальное давление воздуха в БВА создает условие квазивакуума (как бы вакуума). Для такого случая температура кипения жидкости определяется для рассчитанного условия квазивакуума. В нашем примере (преобразованием уравнения температуры кипения) концентрация жидкости определяется линейным уравнением:

$$a_i = a_0 + \left( kt \left( t_1 - 100 \cdot \left( P : P_{\text{общ}} \right)^k \right) \right), \quad (28)$$

$W = G_0(a_0/a_i)$  — количество испаренной воды.

Здесь  $a_0$ ,  $a_i$  — начальная и конечная концентрация жидкости;  $k_t$  — температурный коэффициент;  $P$  — расчетное парциальное давление;  $P_{\text{общ}}$  — общее давление;  $k$  — степенной коэффициент воздействия давления (в данном случае равен 0,378).

Другая величина, необходимая для расчета процесса выпаривания, — энтальпия водяного пара. Она рассчитывается в алгоритмическом блоке (рис. 8.3) компьютерной модели по уравнению:

$$I = 2541 + 1,53t. \quad (29)$$

После определенных преобразований динамика процесса системы жидкой фазы для элементарной зоны характеризуется системой уравнений:

$$\frac{da_i}{d\tau} = \frac{3}{V\rho K_i} \left[ G_0 \cdot c_{i-1} \cdot t_{i-1} - \frac{a_0}{a_i} \right] \cdot G_{i0} c_i t_i - \left( \frac{a_0}{a_i - 1} - \frac{a_0}{a_i} \right) \cdot G_{i0} \cdot I \quad (21)$$

$$+ \left( \frac{1}{a_i - 2} - \frac{1}{a_i - 1} \right) \cdot G_0 \cdot a_0 \cdot I + K \cdot V (t_{2i-2} - t_{i-1});$$

$$t_i = (G_0 + K_i \cdot c_i); \quad (22)$$

$$I = (I_0 + K_i (t_2 - t_{2_0})); \quad (23)$$

$$c_i = (c_{i0} + K \cdot c_1 (t_1 - t_{i0})), \quad (24)$$

где уравнение (22) характеризует температуру жидкости в элементарной зоне; (23) — энтальпию пара; (24) — изменение концентрации. Вместо уравнения (21) можно воспользоваться уравнением температуры жидкости. Такой вариант использован в компьютерной модели, приведенной на рис. 8.8.

Динамика пуска по температуре газовой фазы выражается уравнением:

$$\left\{ \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{V_g \cdot \delta_g} \left[ G_{2_0} \cdot c_{2i-1} \cdot t_{2i-1} - G_{2_0} \cdot c_i \cdot t_i - K \cdot \Delta V_m (t_{i-1} - t_i) \right] \right\}. \quad (25)$$

Для статического режима используется уравнение:

$$t_{ij} = \frac{K \cdot V_j (V_{2j-1} - t_{j-1}) - G_{2_j} \cdot c_{2j-1} \cdot t_{2j-1}}{G_{2_j} \cdot c_{2j}} \quad (26)$$

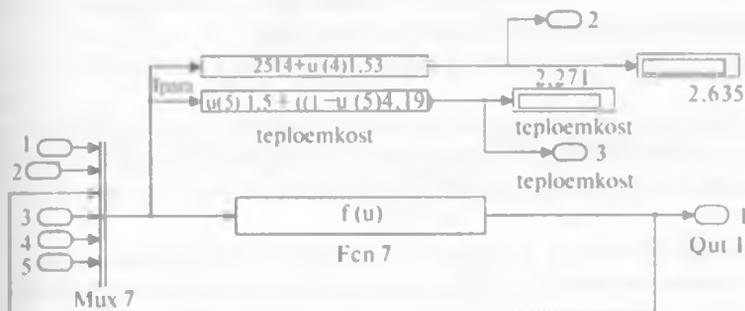
(Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры газовой фазы приведено на рис. 2.2 в теме 2).

Преобразуя уравнения (21–23), можно определить температуру жидкости для статического режима:

$$T = ((G_0 \cdot a_0 \cdot C_0 \cdot u_1 / u_5) + u_2 - (G_0 \cdot a_0 \cdot C_C \cdot T / u_4) - (G_0 \cdot ((a_0 / u_5) - (a_0 / u_4)) \cdot u_3)) / (V_{га} R_0 C_C), \quad (27)$$

где  $G_0$  — расход исходной пульпы;  $a_0$  — начальная концентрация пульпы на входе в аппарат;  $V_{\theta a}$  — объем аппарата;  $R_0$  — теплопроводность материала аппарата;  $C_0$  — теплоемкость пульпы;  $C_c$  — теплоемкость среды (температура пульпы на входе в аппарат).

Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры жидкой фазы, теплоемкости пульпы и энтальпии водяного пара имеет вид:



### 8.3. Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры жидкой фазы, теплоемкости пульпы и энтальпии водяного пара

Парциальное давление воздуха в БВА создает условие квазивакуума (как бы вакуума). Для такого случая температура кипения жидкости определяется для рассчитанного условия квазивакуума. В нашем примере (преобразованием уравнения температуры кипения) концентрация жидкости определяется линейным уравнением:

$$a_i = a_0 + \left( k r \left( t_i - 100 \left( P : P_{\text{общ}} \right)^k \right) \right), \quad (28)$$

$W = G_0(a_0/a_i)$  — количество испаренной воды.

Здесь  $a_0$ ,  $a_i$  — начальная и конечная концентрация жидкости;  $k_r$  — температурный коэффициент;  $P$  — расчетное парциальное давление;  $P_{\text{общ}}$  — общее давление;  $k$  — степенной коэффициент воздействия давления (в данном случае равен 0,378).

Другая величина, необходимая для расчета процесса выпаривания, — энтальпия водяного пара. Она рассчитывается в алгоритмическом блоке (рис. 8.3) компьютерной модели по уравнению:

$$I = 2541 + 1,53t. \quad (29)$$

Модель (рис. 8.8) представляет собой совокупность алгоритмических блоков, каждый из которых характеризует определенный процесс, происходящий в выпарном аппарате.

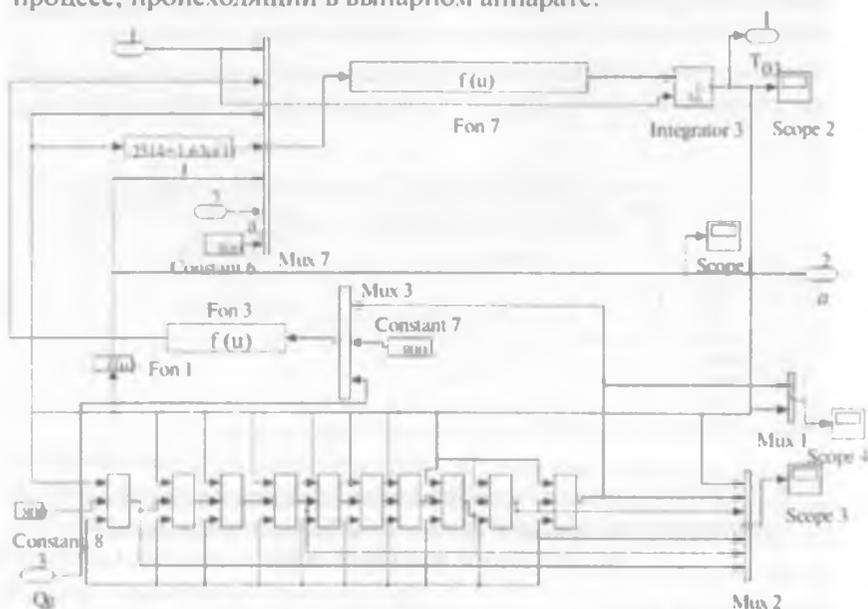


Рис. 8.8. Компьютерная модель процесса БВА с учетом разбиения по газожидкостной фазе на квазислоя

Опишем наиболее важные из них. Это блоки расчета температуры жидкости, концентрации жидкости, тепла, передаваемого газом, и температуры газа по квазислоям.

Предложена новая методика расчета процесса выпарки жидкости на основе полученной обобщенной модели процесса выпарки. По данной методике расчет процесса осуществляется циклическим способом, задаваясь начальными условиями, и затем определяется парциальное давление воды в выходящей парогазовой смеси. Для более точных расчетов рекомендована методика с использованием определения равновесных условий в 2-фазной системе. Достоверность методики расчета процесса выпарки показана на примере выпарки жидкости минерального удобрения. Соответствие результатов расчета реальному процессу определено классическими методами на основе расчета материально-теплового баланса и математического моделирования. Согласованность результатов составила 98 %.

#### 8.4. Пример расчета.

##### Синтез оптимальной системы выпаривания в БВА

**Постановка задачи оптимизации.** Выпаривание аммофосной пыли осуществляется в аппаратах барботажного типа, но при постановке задачи оптимизации из-за недостаточно организованной структуры потоков нужно решить ряд вопросов:

во-первых, газ не имеет достаточного контакта с жидкостью, поэтому его эффективность и, как следствие, аппарата достаточно низкая;

во-вторых, структура потоков выпарных аппаратов барботажного типа по жидкостной фазе больше всего подходит к комбинированной структуре потоков идеального перемешивания с байпасной линией.

В аппаратах барботажного типа входящая концентрированная пыль проскакивает к выходящей пыли, тем самым концентрация жидкости, выходящей из аппарата, получается недостаточно высокой. Поэтому увеличение эффективности таких аппаратов требует рассмотрения трех критериев оптимизации: производительность должна быть высокой; расход газа — наименьшим; концентрация жидкости — высокой.

Упрощенным решением является приведение задачи оптимизации к одному критерию: при постоянной определенной производительности и расходе газа искать возможность увеличения концентрации жидкости.

Дальнейший анализ критерия оптимизации показывает, что этот фактор требует анализа влияний ее составляющих:

$$D_{\text{выход}} = (C - C_3) \cdot B_{\text{жл}} \rightarrow \max \quad (30)$$

где  $C$  — цена продукции;  $C_3$  — себестоимость продукции;  $B_{\text{жл}}$  — количество продукции;

В общем случае, для достижения максимального дохода предприятия возникает многокритериальная задача в виде:

$$1) C_3 \rightarrow \min; \quad 2) C \rightarrow \max; \quad 3) B_{\text{жл}} \rightarrow \max.$$

Однако в нашем случае, так как цена продукции ( $C$ ) остается постоянной, появляется возможность уменьшения себестоимости продукции и увеличения производительности БВА.

За счет обеспечения режима оптимального ГСП появляется возможность уменьшения себестоимости продукции и повышения

Модель (рис. 8.8) представляет собой совокупность алгоритмических блоков, каждый из которых характеризует определенный процесс, происходящий в выпарном аппарате.

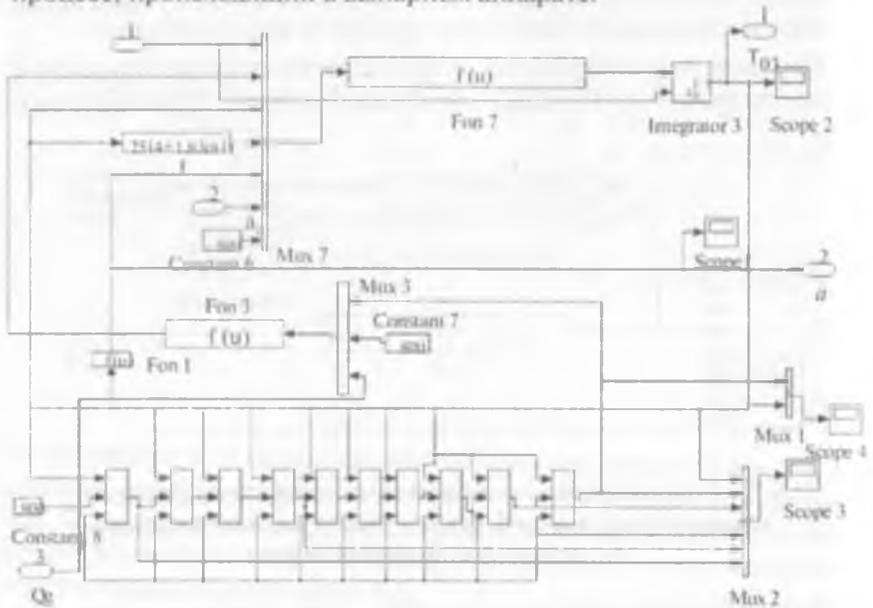


Рис. 8.8. Компьютерная модель процесса БВА с учетом разбиения по газожидкостной фазе на квазислоя

Опишем наиболее важные из них. Это блоки расчета температуры жидкости, концентрации жидкости, тепла, передаваемого газом, и температуры газа по квазислоям.

Предложена новая методика расчета процесса выпарки жидкости на основе полученной обобщенной модели процесса выпарки. По данной методике расчет процесса осуществляется циклическим способом, задаваясь начальными условиями, и затем определяется парциальное давление воды в выходящей парогазовой смеси. Для более точных расчетов рекомендована методика с использованием определения равновесных условий в 2-фазной системе. Достоверность методики расчета процесса выпарки показана на примере выпарки жидкости минерального удобрения. Соответствие результатов расчета реальному процессу определено классическими методами на основе расчета материально-теплового баланса и математического моделирования. Согласованность результатов составила 98 %.

#### 8.4. Пример расчета.

##### Синтез оптимальной системы выпаривания в БВА

**Постановка задачи оптимизации.** Выпаривание аммофосной пульпы осуществляется в аппаратах барботажного типа, но при поставке задачи оптимизации из-за недостаточно организованной структуры потоков нужно решить ряд вопросов:

во-первых, газ не имеет достаточного контакта с жидкостью, поэтому его эффективность и, как следствие, аппарата достаточно низкая;

во-вторых, структура потоков выпарных аппаратов барботажного типа по жидкостной фазе больше всего подходит к комбинированной структуре потоков идеального перемешивания с байпасной линией.

В аппаратах барботажного типа входящая концентрированная пульпа проскакивает к выходящей пульпе, тем самым концентрация жидкости, выходящей из аппарата, получается недостаточно высокой. Поэтому увеличение эффективности таких аппаратов требует рассмотрения трех критериев оптимизации: производительность должна быть высокой; расход газа — наименьшим; концентрация жидкости — высокой.

Упрощенным решением является приведение задачи оптимизации к одному критерию: при постоянной определенной производительности и расходе газа искать возможность увеличения концентрации жидкости.

Дальнейший анализ критерия оптимизации показывает, что этот фактор требует анализа влияний ее составляющих:

$$D_{\text{доход}} = (C - C_3) \cdot B_{\text{из}} \rightarrow \max \quad (30)$$

где  $C$  — цена продукции;  $C_3$  — себестоимость продукции;  $B_{\text{из}}$  — количество продукции;

В общем случае, для достижения максимального дохода предприятия возникает многокритериальная задача в виде:

$$1) C_3 \rightarrow \min; \quad 2) C \rightarrow \max; \quad 3) B_{\text{из}} \rightarrow \max.$$

Однако в нашем случае, так как цена продукции ( $C$ ) остается постоянной, появляется возможность уменьшения себестоимости продукции и увеличения производительности БВА.

За счет обеспечения режима оптимального ГСП появляется возможность уменьшения себестоимости продукции и повышения

производительности БВА или увеличения выхода продукции при постоянстве остальных составляющих дохода:

$$\begin{cases} B_{\text{итд}} \rightarrow \max, \\ Cз \rightarrow \min, \\ \text{при } U = \text{const} \end{cases} \quad (31)$$

Для этого случая критерий оптимизации можно охарактеризовать минимизацией влагосодержания выходящей жидкости из БВА:

$$a_{\text{вт}}^0 \rightarrow \min, \quad (32)$$

где  $a_{\text{вт}}^0$  — влагосодержание жидкости, %.

В качестве оптимизирующего фактора выбрано количество последовательно соединенных квазиаппаратов или многоячеечная гидродинамическая структура потоков жидкой фазы в кубе БВА.

**Выбор критерия оптимизации.** Увеличение доли концентрированной жидкости должно способствовать увеличению дохода предприятия. Поэтому в качестве первоначального критерия оптимизации должен рассматриваться общий доход предприятия, то есть необходимо, чтобы производство по данной линии давало максимальную прибыль. В данном случае в качестве критерия оптимизации принята выходная концентрация жидкости.

Анализ выпарных аппаратов барботажного типа показывает, что увеличение выходной концентрации жидкости можно осуществить путем создания улучшенной гидродинамической структуры потоков по жидкой фазе в кубе БВА. Таким образом, оптимизирующим фактором, влияющим на концентрацию влаги жидкости, является гидродинамическая структура потоков БВА по жидкой фазе.

В целом, задача оптимизации будет решена путем определения следующей целевой функции:

$$\begin{cases} a = f(N, a_0 \dots) \rightarrow \min \\ B = \text{const} \\ G_r = \text{const} \end{cases} \quad (33)$$

Здесь  $a_{\text{вт}} \text{ min} = 30\%$ , оптимизирующим фактором является  $N$  — количество БВА или число ячеек жидкой фазы в кубе БВА.

**Решение задачи оптимизации.** Для определения оптимальной гидродинамической структуры потоков проведены вычислительные

эксперименты на основе компьютерной модели процесса выпарки в БВА с применением метода оптимизации линейного программирования, сущность которого заключается в нахождении оптимального решения путем движения в сторону линейного ограничения по оптимизируемым параметрам процесса с учетом их структурных взаимосвязей в системе.

Решение задачи оптимизации осуществлено путем определения числа последовательно соединенных БВА или числа ячеек в структуре потоков в кубе выпарного аппарата.

Модель выпаривания жидкости в двух и более последовательно соединенных БВА сформализована на основе пакета прикладной программы «Matlab».

Последовательно можно улучшать гидродинамическую структуру потоков жидкой фазы в БВА, где она характеризуется моделью идеального перемешивания с байпасной линией. Нами найдены способы перехода к комбинированной модели многоячеечной гидродинамической структуре потоков. Путем линейного программирования определено оптимальное число последовательно соединенных квазиаппаратов или число ячеек (рис 8.9).

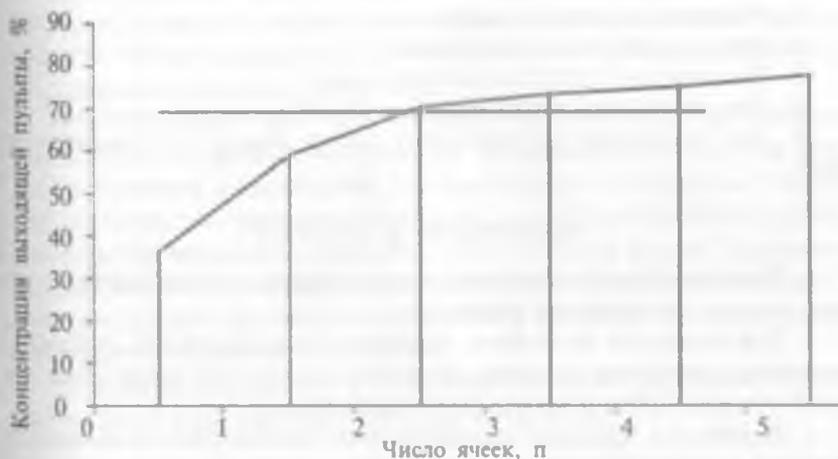


Рис. 8.9. График изменения выходной концентрации в зависимости от числа квазиаппаратов

Как видно из рис. 8.10, оптимальным решением является 2-квазиаппаратная система.

*Ключевые слова:* процесс выпаривания; процесс теплопередачи; кожухотрубный выпарной аппарат; барботажный аппарат; функция оптимизации; гидродинамическая структура; квазислой; квазиаппарат; ячеечные модели; байпасные линии; критерий оптимизации; случайный поиск; линейное программирование.

### **Контрольные вопросы**

1. Из каких подсистем состоит БВА?
2. Что представляет собой многоступенчатый анализ аппарата выпарки?
3. Из каких подсистем состоит многоуровневая структура системы и процесса выпарки?
4. Что представляет собой рабочая камера?
5. Что такое квазислой?
6. Как составляется математическое описание процесса в квазислое?
7. Как составляется математическое описание процесса в рабочей камере?
8. Как изменяются температура и концентрация жидкости?
9. Какие компромиссные задачи решаются для оптимизации процесса?
10. Что такое оптимизация?
11. Какова цель оптимизации?
12. Каковы критерии оптимизации?
13. Что выбрано критерием оптимизации?
14. Как определены оптимальные условия?
16. Как компьютер осуществляет расчет изменения температуры газа?

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 8**

1. Разъяснены понятия анализа, моделирования и компьютерного расчета системы выпаривания жидкостей.
2. Для выпарных аппаратов, подобных кожухотрубным аппаратам, приведена компьютерная модель, состоящая из моделей процессов в греющей камере, стенке и пространстве выпаривания.
3. Приведены пусковые характеристики кожухотрубного выпарного аппарата, рассмотрены изменения температуры в греющей камере, стенке и пространстве выпаривания, по которым осуществляется синтез оптимального аппарата.
4. Приведен многоступенчатый системный анализ построения компьютерной модели и выбора оптимального решения выпаривания в барботажном выпарном аппарате.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Artikov A., Masharipova Z., Reybnazarova Z.* To question of the automatic calculation of the process of the drying material WCIS -2010. World conference on intelligent systems for industrial automation.—Tashkent. 2010. TSTU.
2. *Артиков А. А., Додаев К. О., Акбаров А.Х., Рустамов Б. Т.* Анализ и синтез процессов переработки томатов. — Т. «Учительчи». 1997.
3. *Рейнназарова З. Д., Артиков А. А.* Математическая модель процесса выпарки в рабочей зоне барботажного выпарного аппарата // Химическая промышленность. — Москва. 2008. Т. 85. № 6. С. 310–313.
4. *Рейнназарова З. Д., Артиков А. А.* Оптимизация процесса выпаривания в производстве аммофоса // Химическая промышленность. — Москва. 2009. Т. 86. № 4. С. 184–188.
5. *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. — М.: «Альянс». 2008. 751 с.

## Т Е М А 9. АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ МАССОБМЕННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ЭКСТРАКЦИИ МАСЛИЧНОГО МАТЕРИАЛА

Цель темы — ознакомление с методами многоступенчатого системного анализа и синтеза массообменных систем. Одной из представителей массообменной системы является экстракция веществ в системе «твердое тело—жидкость».

Дорогой магистрант, изучая тему, Вы научитесь шаг за шагом углубляться в систему экстракции, используя принцип расчленения установки на аппараты, квазиаппараты или квазислоя, ознакомитесь с компьютерными моделями, способам принятия решения в выборе оптимальной массообменной системы. В этом Вам помогут разработанные нами компьютерные модели, на основе которых Вы сможете быстро рассчитать исследуемый технологический процесс и выбрать оптимальную систему.

Компьютерная модель и программы автоматизированного расчета имеются в библиотеке кафедры ИАБГХТИИ.

### П л а н

9.1. Многоступенчатый анализ системы экстракции в системе «твердое тело—жидкость»

9.2. Математическое описание процесса на уровне квазислоя частицы экстрагируемого материала

9.3. Математическое описание процесса на уровне частицы экстрагируемого материала

9.4. Компьютерная модель процесса экстракции в рабочей камере установки.

9.5. Пример исследований с помощью компьютерной модели

### Основные понятия

**Экстракция** — (позднелат. *extractio* — извлечение, от *extraho* — вытягиваю, извлекаю) перевод одного или нескольких компонентов раствора из одной фазы в контактирующую с ней другую жидкую фазу.

**Рабочая камера** — объем, где происходит основной процесс экстракции.

**Частица** — представляется в виде шара; разделяя ее на равные квазислой, изучается процесс экстракции.

**Экстрагенты** — жидкости, обеспечивающие переход целевых компонентов из твердой фазы; для экстракции масла — растворитель, иногда экстракционный бензин.

**Шрот** — обезжиренный масличный материал.

**Квазислой** — мысленный слой частицы.

**Квазиаппарат** — мысленная элементарная рабочая камера.

**Компьютерная модель** — модель оригинала (системы и процесса) на компьютере.

**Иерархические уровни** — уровни, выявленные на основе МСА установки.

**Модель многоячеечной экстракции** — модель процесса экстракции с использованием квазиаппаратов.

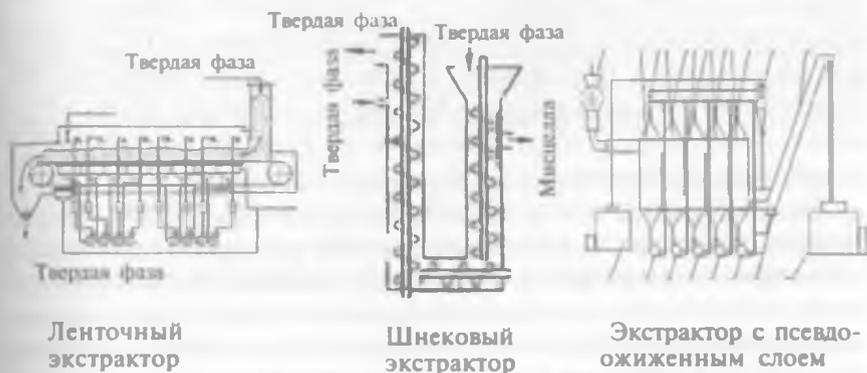
### 9.1. Многоступенчатый анализ системы экстракции в системе «твердое тело—жидкость»

В основу анализа и моделирования процесса экстракции масличного материала положена методология многоступенчатого системного подхода, так как экстракция — это технологический процесс, являющийся системой со сложными внутренними физико-химическими связями.

При математическом моделировании процесса экстракции использован метод многоступенчатого анализа системы.

В качестве первичной системы (система I) принята установка (на рисунках показаны экстракторы) для экстрагирования масла.

Она является частью технологической линии, в ней получают промежуточную продукцию.



Полная математическая модель процессов в масштабе аппарата включает математические модели процессов в функциональных элементах аппарата.

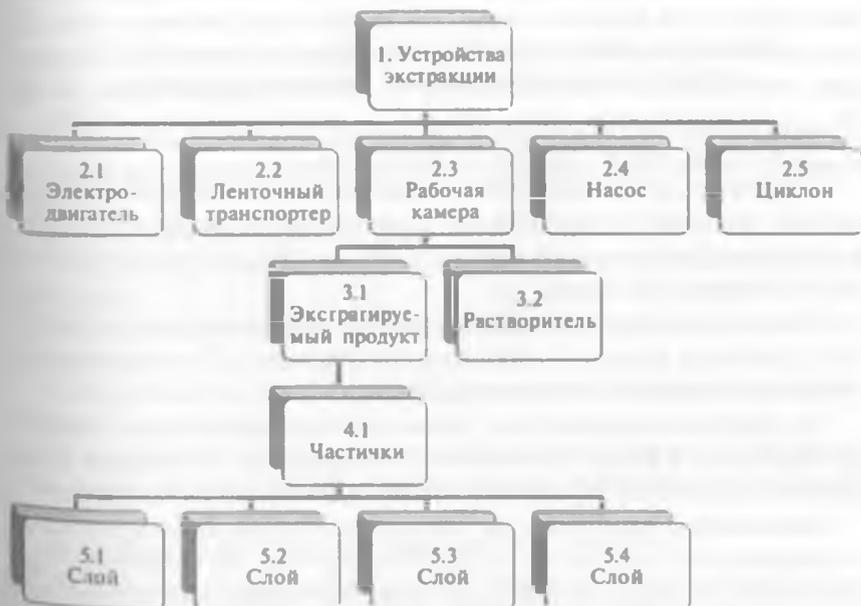


Рис. 9.1. Схема иерархической системы экстракции

На *первом иерархическом уровне* системы осуществляется анализ процесса на установке экстракции. Входными параметрами данного уровня являются: расход жмыха ( $G_{\text{жм}}$ ); масличность жмыха ( $M_{\text{жм}}$ ); расход растворителя ( $G_{\text{рп}}$ ); концентрация растворителя ( $a_{\text{рп}}$ ); давление растворителя, подаваемого в установку ( $P_2$ ); температура растворителя ( $T_2$ ). Выходные параметры следующие: расход шрота ( $G_{\text{шр}}$ ); масличность шрота ( $M_{\text{шр}}$ ); изменение во времени концентрации мисцеллы на иерархическом уровне установки ( $a_{(r)}$ ).

На *втором иерархическом уровне* рассматриваются элементы установки. В системе 2.2 ленточный транспортер (размер перфорации сеточной ленты и скорость ее движения выбираются опытным путем в соответствии с размером частиц) обеспечивает подачу и перемещение экстрагируемого материала в рабочую камеру. Сеточный транспортер приводится в действие электродвигателем (система 2.1).

В следующей, основной, системе 2.3 рассматривается процесс экстракции в рабочей камере установки.

Основными входными параметрами системы данного уровня являются: расход жмыха ( $G_{\text{м}}$ ); концентрация мисцеллы ( $a_3$ ); давление растворителя на входе в камеру ( $P_3$ ); температура растворителя ( $T_3$ ); входная масличность жмыха ( $M_{\text{м}}$ ). Выходные параметры следующие: расход жмыха, переработанного на данном иерархическом уровне ( $G_{\text{жм}}$ ), концентрация мисцеллы ( $a_{(r)}$ ), масличность шрота ( $M_{(r)}$ ), ( $P_{\text{мц}}$ ); температура мисцеллы на выходе ( $T_{\text{мц}}$ ).

Созданная для данного иерархического уровня математическая модель, выражает изменение во времени концентрации масла в растворителе (мисцеллы) и масличности частиц, экстрагируемых в рабочей камере установки.

Насос (система 2.4) подает жидкость — мисцеллу или растворитель в рабочую камеру. Гидроциклоны (система 2.5) разделяют суспензию на твердую и жидкую фазу.

На *третьем иерархическом уровне* системы осуществляется анализ процесса в фазах. В системах 3.1 твердой и 3.2 жидкой фазы изучается взаимное межфазное воздействие процесса экстракции.

Входными параметрами системы твердой фазы являются: расход растворителя в твердую фазу ( $G_{\text{рп}}$ ); температура растворителя ( $T_{\text{рп}}$ ); концентрация растворителя ( $a_{\text{рп}}$ ). Выходные параметры: расход масла из твердой фазы ( $G_{\text{рп}}$ ), концентрация мисцеллы, перешедшей из твердой фазы в растворитель ( $a_{\text{мц}}$ ).

На четвертом иерархическом уровне системы осуществляется анализ процесса экстракции на уровне частицы. Входные параметры данного уровня: расход растворителя в частицу ( $G_{раств}$ ); температура растворителя ( $T_{раств}$ ); концентрация масла в растворителе ( $a_{раств}$ ). Выходные параметры: расход мисцеллы из частицы и ее концентрация.

Созданная для данного иерархического уровня математическая модель включает математические описания процесса экстракции, происходящего в частице.

В системах пятого иерархического уровня изучается процесс экстракции в квазислоях частицы. Считается, что частица делится на равные слои, например на 5 слоев, и вещество (масло) из внутренних слоев путем молекулярной диффузии переходит в следующие поверхностные слои, а на самом внешнем слое масло путем конвективной диффузии переходит в объем растворителя. Входные параметры данного уровня следующие: расход мисцеллы в слой ( $G_{раств}$ ); концентрация масла в мисцелле на входе в слой ( $a_{раств}$ ); поверхность внешнего воздействия слоя ( $F_{внешн}$ ). Выходные параметры: расход мисцеллы из слоя ( $G_{масл}$ ); концентрация масла в мисцелле, перешедшей из слоя в следующий слой ( $a_{мц}$ ).

## 9.2 Математическое описание процесса на уровне квазислоя частицы экстрагируемого материала

Для математического описания процесса на уровне квазислоя частицы экстрагируемого материала приняты следующие допущения:

- 1) частица имеет форму шара;
- 2) частица делится на квазислои, толщина разделенных слоев одинакова;
- 3) в каждом квазислое частицы количество масла распределено равномерно;
- 4) принимается, что пористая часть частицы заполнена жидкостью;
- 5) для каждого слоя предыдущий слой принимается как внешний, а последующий слой, в свою очередь, принимается как внутренний;
- 6) плотность мисцеллы принимается постоянной.

На основании допущений осуществлено математическое моделирование. На рисунках 9.2–9.4 показаны параметры процессов в квазислоях.

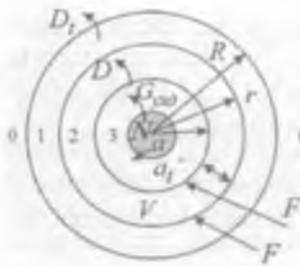


Рис. 9.2 Вид процесса экстракции в самом внутреннем слое частицы с входными и выходными параметрами

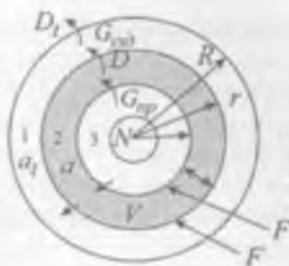


Рис. 9.3 Вид процесса экстракции в среднем слое частицы с входными и выходными параметрами

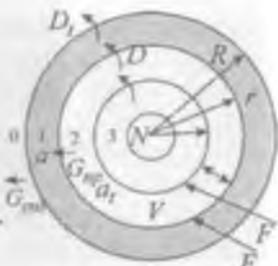


Рис. 9.4 Вид процесса экстракции в самом внешнем слое частицы с входными и выходными параметрами

**Построение математической модели для самого внутреннего слоя частицы.** Для определения скорости изменения массы масла во внутреннем квазислое частицы рассмотрено следующее уравнение на основе материального баланса:

Скорость изменения массы масла $\frac{dM_{\text{масл}}}{dt}$	=	Приходящее масло $G_{\text{пр}}$	-	Уходящее масло $G_{\text{ухд}}$
---	---	-------------------------------------	---	------------------------------------

$$\frac{dM_{\text{масл}}}{dt} = G_{\text{пр}} - G_{\text{ухд}} \quad (1)$$

Как известно, количество масла, перешедшего из внутреннего слоя во внешний, равно произведению количества мисцеллы, перешедшего из данного слоя, и концентрации масла в составе мисцеллы. В вышеприведенной формуле масса масла равна:

$$M_{\text{масл}} = M_{\text{мц}} \cdot a_{\text{масл}} \quad (2)$$

Тогда

$$\frac{d(M_{\text{мц}} \cdot a_{\text{масл}})}{dt} = G_{\text{пр}} - G_{\text{ухд}} \quad (3)$$

Здесь в формуле для самого внутреннего слоя частицы  $G_{\text{пр}} = 0$ , то есть расход масла, поступающего в самый внутренний слой, равен нулю.

Тогда:

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{m} (-G_{\text{вн}}), \quad (4)$$

где  $G_{\text{вн}}$  — расход масла, вышедшего из самого внутреннего слоя,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Масса масла, находящегося в самом внутреннем слое, равна произведению объема мисцеллы в данном слое на плотность мисцеллы в слое:

$$m = V \cdot \rho. \quad (5)$$

Из формулы (5) находим массу масла в частице ( $m$ ), кг. Объем мисцеллы в самом внутреннем слое ( $V_{\text{шар}}$ ),  $\text{м}^3$ , находим путем произведения объема данного слоя на пористость ( $Z$ ), то есть масличность, или количество масла:

$$V = (V_{\text{шар}}) \cdot Z. \quad (6)$$

Объем самого внутреннего слоя с учетом того, что частица имеет форму шара, находим по формуле объема шара:

$$V_{\text{шар}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3, \quad (7)$$

где  $r$  — радиус самого внутреннего слоя, м.

Радиус частицы равен произведению толщины на количество слоев.

Плотность мисцеллы определяется по формуле:

$$\rho = \rho_{\text{раств}} \cdot (1 - a) + \rho_{\text{масл}} \cdot a, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{раств}}$  — плотность растворителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{\text{масл}}$  — плотность масла,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $a$  — соответствующая концентрация в данном слое.

Расход масла, перешедшего из внутреннего слоя во внешний, равен произведению коэффициента массоотдачи, поверхности обмена и разницы концентраций — движущей силы:

$$G_{\text{вн}} = k \cdot F_1 \cdot (a - a_1). \quad (9)$$

Скорость экстракции прямо пропорциональна коэффициенту молекулярной диффузии, плотности мисцеллы и обратно пропорциональна толщине слоя:

$$k = \frac{D \cdot \rho}{\delta}. \quad (10)$$

Толщина любого слоя вычисляется соотношением радиуса частицы и количества слоев:

$$\delta = \frac{R}{n} \quad (11)$$

Внешняя поверхность слоя определяется по формуле:

$$F = 4 \cdot \pi \cdot r^2. \quad (12)$$

На основе математических преобразований полученных выражений в прикладной программе «Matlab» была создана компьютерная модель для процесса внутреннего слоя (рис. 9.5).

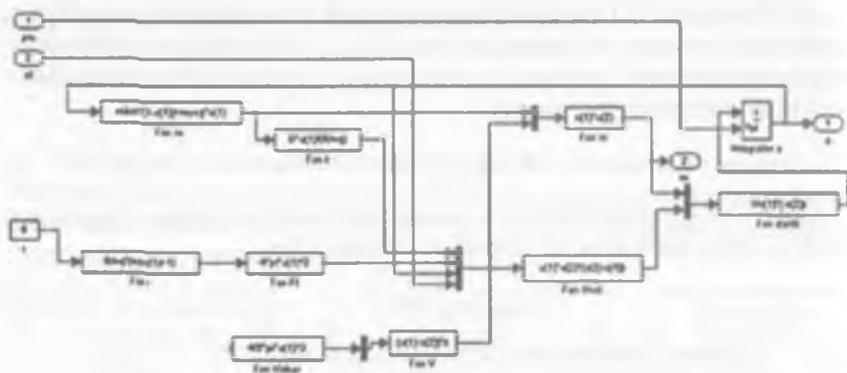


Рис. 9.5. Компьютерная модель процесса внутреннего слоя, выполненная в программе «Matlab»

Средний слой отличается уравнением расчета объема среднего слоя. Объем масла в среднем слое равен произведению объема среднего слоя на пористость ( $Z$ ):  $V = (V_{внеш} - V_{внутр шар})Z$ . По нему вычисляется маслячность или количество масла:

$$\delta = \frac{R}{n} \quad (13)$$

Рабочая поверхность внешних и внутренних слоев определяется по формулам:

$$F_t = 4 \cdot \pi \cdot r^2; \quad (14)$$

$$F_i = 4 \cdot \pi \cdot r_M^2.$$

На основе переработки полученных математических выражений в программе «Matlab» была создана компьютерная модель процесса в среднем слое (рис. 9.6).

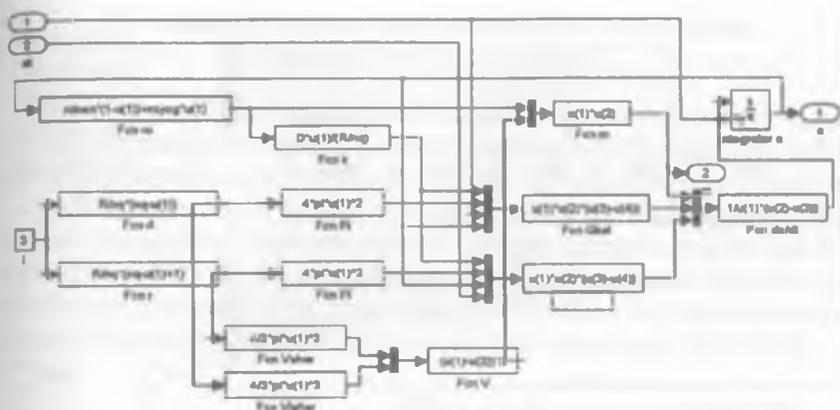


Рис. 9.6. Компьютерная модель процесса в среднем слое, выполненная в программе «Matlab»

Аналогично были получены математические выражения и создана компьютерная модель процесса для самого внешнего слоя (рис. 9.7).

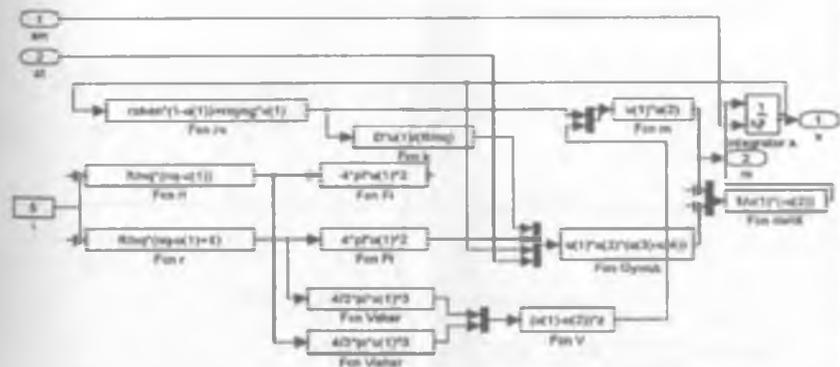


Рис. 9.7. Компьютерная модель процесса для самого внешнего слоя

### 9.3. Математическое описание процесса на уровне частицы экстрагируемого материала

Объединив компьютерные модели процессов каждого квази-слоя (они представлены в виде блоков расчета), формализована компьютерная модель процесса экстракции в частице (рис. 9.8).

На рис. 9.9 показана динамика изменения маслячности по времени в каждом квазислое частицы материала.

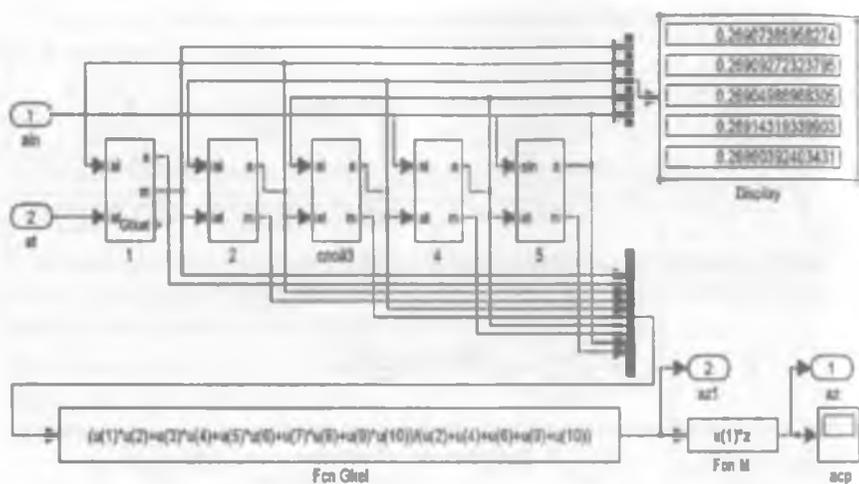


Рис. 9.8. Компьютерная модель процесса в одной частице материала

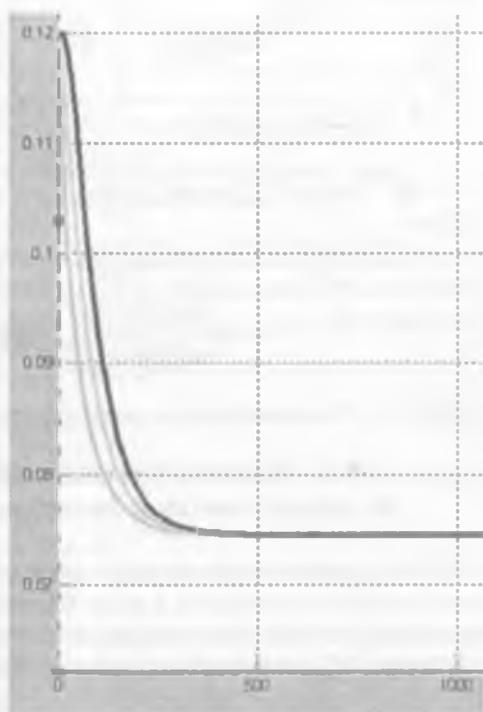


Рис. 9.9. Изменение по времени распределения масла по слоям частицы:  $D_y = 2$  мм

## 9.4. Компьютерная модель процесса экстракции в рабочей камере установки

Для построения компьютерной модели осуществлена агрегация алгоритмических блоков. Компьютерная модель процесса экстракции в рабочей камере установки состоит из блока расчета процесса на уровне частицы и блока расчета процесса в жидкой фазе. На основе проведенных исследований была предложена установка экстракции с использованием тонкодисперсной фазы материала и осуществлено компьютерное моделирование процессов в одноквазипаратном и многоквазипаратном экстракторах (рис. 9.10–9.13).

Рис. 9.10. Компьютерное моделирование процессов в одинарном аппарате

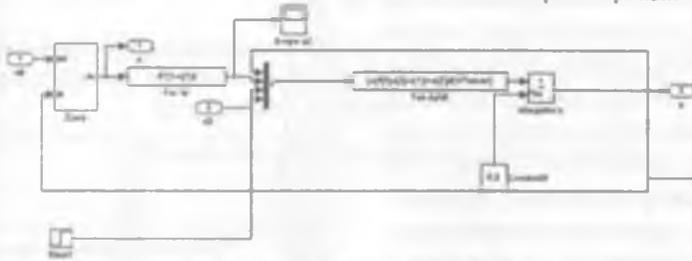


Рис. 9.11. Блочный вид модели

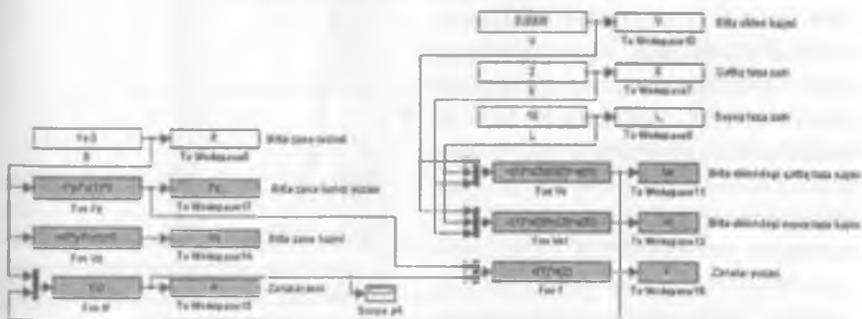


Рис. 9.12. Блок введения исходных данных

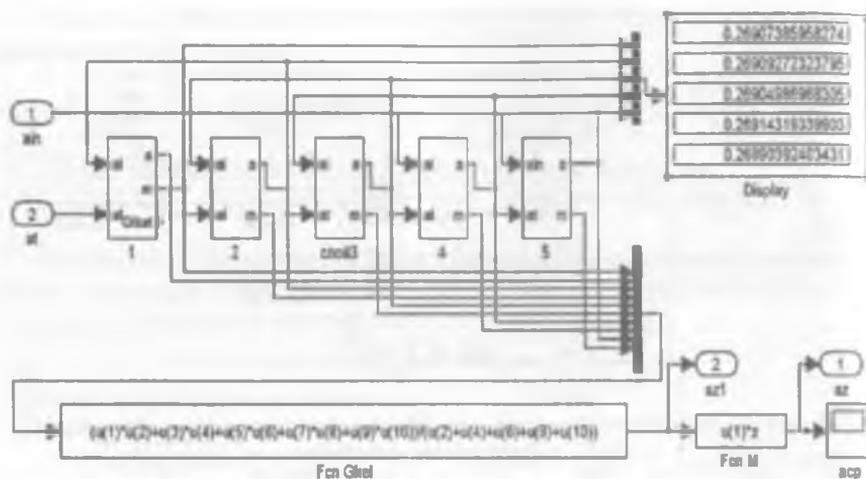


Рис. 9.8. Компьютерная модель процесса в одной частице материала

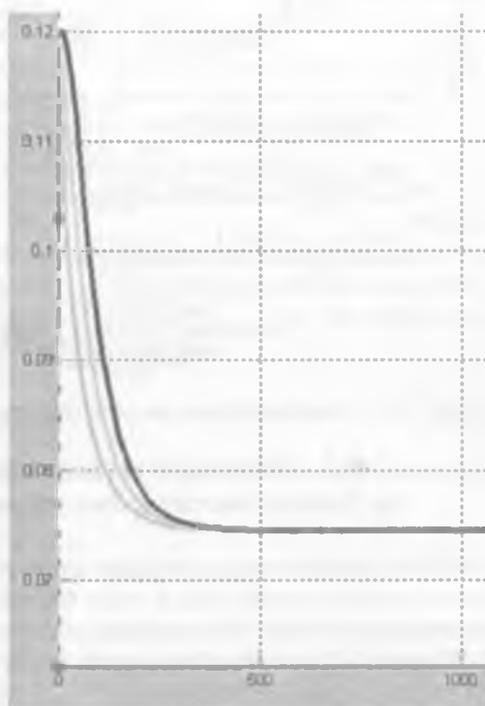


Рис. 9.9. Изменение по времени распределения масла по слоям частицы:  $D_y = 2$  мм

### 9.4. Компьютерная модель процесса экстракции в рабочей камере установки

Для построения компьютерной модели осуществлена агрегация алгоритмических блоков. Компьютерная модель процесса экстракции в рабочей камере установки состоит из блока расчета процесса на уровне частицы и блока расчета процесса в жидкой фазе. На основе проведенных исследований была предложена установка экстракции с использованием тонкодисперсной фазы материала и осуществлено компьютерное моделирование процессов в одноквазиаппаратном и многоквазиаппаратном экстракторах (рис. 9.10–9.13).

Рис. 9.10. Компьютерное моделирование процессов в однинрном аппарате

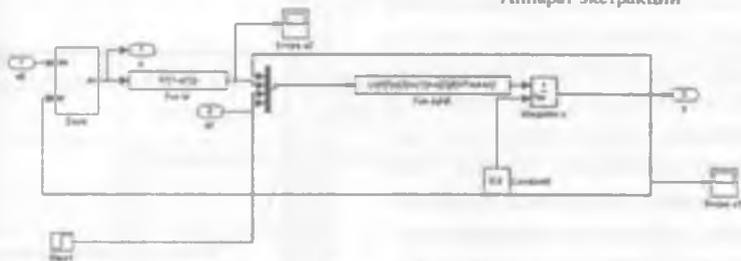


Рис. 9.11. Блочный вид модели

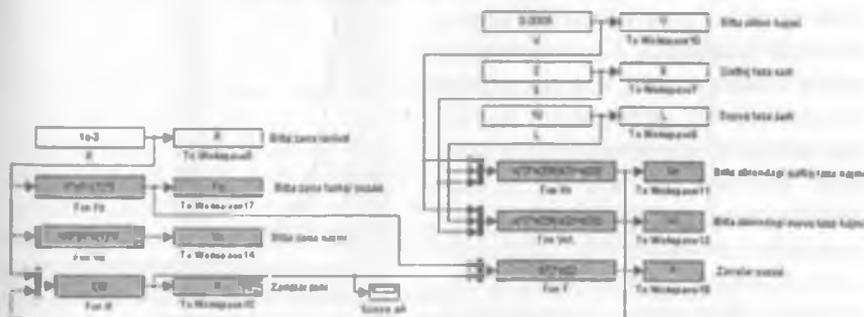


Рис. 9.12. Блок введения исходных данных

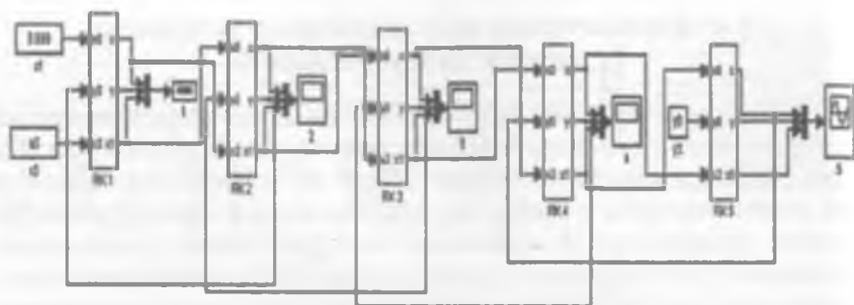


Рис. 9.13. Компьютерное моделирование процессов в многоквазиаппаратном экстракторе

### 9.5. Пример исследований экстракции с помощью компьютерной модели

Поиск оптимальной системы экстракции рассмотрен на примере выбора оптимальных решений для тонкодисперсных систем. Результаты компьютерного моделирования и расчета процесса экстракции мелкодисперсных материалов приведены на рис. 9.14, где показана динамика пуска установки, характеризующая изменение масляности мелкодисперсного материала по квазиаппаратам многоступенчатой противоточной установки. Кривые сверху вниз показывают, что исходная масляность материала (0,12), масляность материала после первого, второго, третьего и т. д. квазиаппаратов дискретно последовательно уменьшается. По заданной остаточной масляности материала выбирается оптимальное число квазиаппаратов.

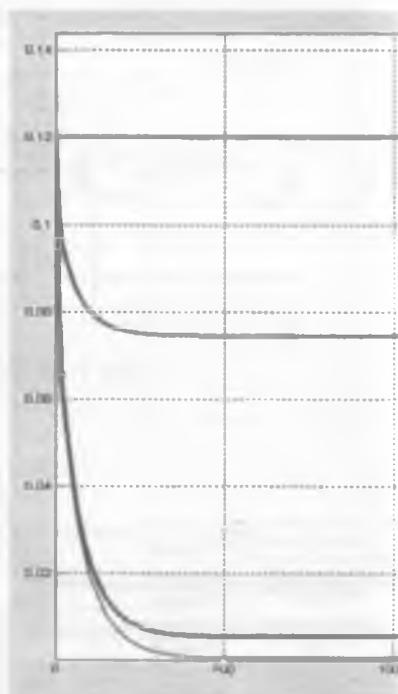


Рис. 9.14

Проведенные теоретические исследования показали, что для рассмотренных условий трехквaziаппаратная дискретно-противоточная установка является оптимальной для эффективного осуществления процесса извлечения масла.

Поиск оптимального управления системой экстракции маслянистого материала. Результаты исследований также позволяют разработать систему автоматического регулирования экстракцией маслянистого материала (рис. 9.15–9.16).

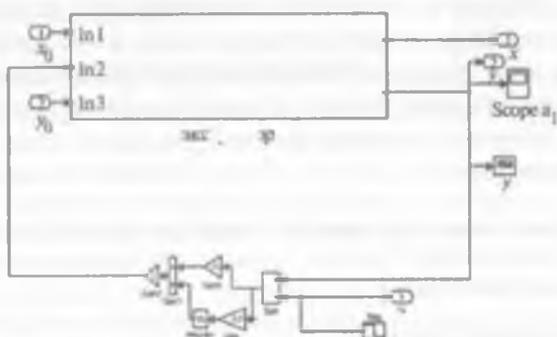


Рис. 9.15. Компьютерная модель поиска оптимального регулирования процессом экстракции: верхний блок (экстрактор) — объект автоматизации, нижние блоки — ПИ (регулятор)

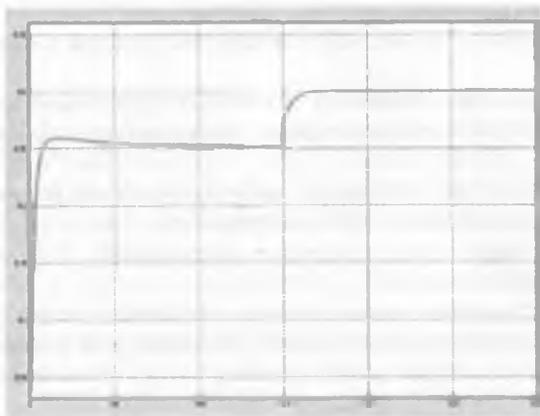


Рис. 9.16. Вид переходного процесса оптимального регулирования процессом экстракции. Пропорционально интегральный регулятор при  $K = 2$ ,  $T_u = 1$

Как видно из рис. 9.16, система регулирования процессом экстракции по каналу «расход растворителя—концентрация мисцеллы» при использовании пропорционально интегрального регулятора с параметрами настройки (при коэффициенте усиления  $K = 0,7$ , времени интегрирования  $T_u = 3,3$ ) имеет устойчивый характер. На рисунке показана динамика пускового периода. Первоначально задание по концентрации мисцеллы равнялось 0,25 массовой доле. После достижения этой концентрации было введено возмущение к системе. Вторая часть кривой показывает результат регулирования процессом перевода концентрации масла в мисцелле до 0,3.

Как видно, при использовании пропорционально интегрального регулятора с параметрами настройки (при коэффициенте усиления  $K = 0,7$ , времени интегрирования  $T_u = 3,3$ ) система имеет устойчивый характер.

*Ключевые слова:* экстракция; растворитель; МСА; рабочая камера; модель; квазиаппарат; частица; квазислой; концентрация; частица; масляность; оптимизация.

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется массообменным?
2. Какой процесс называется экстракцией?
3. Какие вещества называются экстрагентами?
4. Назовите элементы рабочей камеры.
5. Какой обмен осуществляется при экстракции маслячного материала?
6. Как называются аппараты, в которых происходит экстракция?
7. Какие физические показатели учитываются в процессе экстракции?
8. Что используют в процессе экстракций в качестве растворителя?
9. Как осуществляется МСА экстрактора?
10. Какой обмен осуществляется в экстракции?
11. Что такое квазислой?
12. Как составляется математическое описание процесса в квазислое?
13. Какие компромиссные задачи решаются для оптимизации процесса?
14. Из каких подсистем состоит система экстракции?
15. Что является критерием оптимизации экстракции?
16. Из каких зон состоит система экстракции?
17. Из каких подсистем состоит многоуровневая структура системы экстракции и процесса?

18. Что выбрано критерием оптимизации экстракции?
19. Что такое рабочая камера?
20. Как составляется математическое описание процесса экстракции в квазислое?
21. Как составляется математическое описание процесса экстракции в рабочей камере?
22. Какие компромиссные задачи решаются для оптимизации процесса экстракции?
23. Что такое оптимизация?
24. Какова цель оптимизации?

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 9

1. Разъяснены понятия анализа, моделирования и компьютерного расчета системы экстракции «твердое тело—жидкость».

2. Описан многоступенчатый анализ системы экстракции «твердое тело—жидкость», приведена компьютерная модель, состоящая из моделей процессов в квазислоях, частице материала и рабочей камере экстрактора.

3. Приведены пусковые характеристики экстракции «твердое тело—жидкость» и рассмотрено изменение концентрации как в экстрагируемом материале, так и в жидкости.

4. Рассмотрены вопросы выбора оптимального решения системы экстракции «твердое тело—жидкость» и системы оптимального автоматизированного управления процессом экстракции «твердое тело—жидкость».

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Жумаев К. К.* Дисс. канд. техн. наук. — Ташкент. 1994.
2. *Хамидов Б. Т.* Дисс. канд. техн. наук. — Ташкент. 2008.
3. *Хасанов Ж. Х.* Дисс. канд. техн. наук. — Ташкент. 2010.
4. *Дворецкий С. И., Егоров А. Ф., Дворецкий Д. С.* Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов: ТГТУ. 2003. 224 с.
5. *Кафаров В. В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.
6. *Юсупбеков Н. Р., Гулямов Ш. М., Зайнутдинова М. Б., Умарова Г. М.* Имитационное моделирование и оптимизация процесса экстрагирования растительных масел. //Сборник трудов международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». — Тамбов. 2002. С. 38–41.

## ТЕМА 10. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ТЕПЛОМАССОБМЕНА НА ПРИМЕРЕ ДИСТИЛЛЯЦИИ ЖИДКОСТИ

Цель темы — показать на примере тепломассообменной системы процесс перегонки инертным газом. Технология с использованием данного процесса применяется в различных отраслях, в частности, в масложировой промышленности.

Дорогой магистрант, изучая тему, Вы научитесь шаг за шагом углубляться в тепломассообменную систему, используя принцип расчленения установки на аппараты и квазиаппараты, ознакомитесь с компьютерными моделями, в том числе отображениями условий равновесия, способами принятия решения в выборе оптимальной тепломассообменной системы. Вам помогут разработанные нами компьютерные модели, с помощью которых Вы сможете быстро рассчитать исследуемый технологический процесс и выбрать оптимальную систему.

Компьютерные модели и программы автоматизированного расчета имеются в библиотеке кафедры ИАБ ТХТИ.

Оригинальностью отличается пример установления адекватности модели реальному процессу. Исследования проведены путем планирования экспериментов.

### П л а н

10.1. Анализ и синтез оптимальной системы перегонки инертным газом

10.1.1. Системный анализ установки дистилляции/дезодорации хлопкового масла

10.1.2. Математическое моделирование процесса удаления летучих компонентов из мисцеллы растительного масла

10.1.3. Математическое описание процесса в фазах

10.1.4. Математическая модель процесса переноса между фазами

10.1.5. Математическая модель процесса в одной тарелке

10.1.6. Математическое описание процесса в рабочей зоне аппарата

### Основные понятия

*Тепломассообмен* — процесс массообмена между фазами воздействием тепла.

*Мисцелла* — раствор масла в растворителе.

**Дистилляция** (от лат. *distillatio* — стекание каплями) — перегонка, разделение жидких смесей на отличающиеся по составу фракции. Процесс основан на различии температур кипения компонентов смеси.

**Энтальпия** (от греч. *enthalpo* — нагреваю) — свойство вещества, указывающее количество энергии, которую можно преобразовать в тепло.

**Дистиллятор мисцеллы растительного масла** — аппарат перегонки растворителя инертным газом (водяным паром) из масла.

**Рабочая камера** — камера, где происходит основной процесс.

**Тарелки** — основные элементы, составляющие рабочую зону дистиллятора, где происходит тепломассообменный процесс.

**Дезодорация** — процесс перегонки остатков летучих компонентов из масла.

**Компьютерная модель** — отображение процесса на компьютере.

**Равновесное состояние между фазами** — состояние, при котором процесс массообмена между фазами останавливается.

**Компьютерная модель процесса изменения равновесного условия в двухфазной системе** — при введении параметров двухфазной системы компьютер позволяет автоматически рассчитать переход системы в равновесие.

**Полупромышленная установка** — экспериментальная установка, имеющая другие размеры, работающая в промышленных условиях.

## 10.1. Анализ и синтез системы перегонки инертным газом

### 10.1.1. Системный анализ установки дистилляции/дезодорации хлопкового масла

Одним из представителей системы перегонки инертным газом является технологическая линия дистилляции мисцеллы в производстве растительного масла, где происходят процессы тепло- и массообмена. Можно составить многоступенчатую иерархическую структуру технологической схемы дистилляции мисцеллы растительного масла на примере полупромышленной установки, испытанной на Ташкентском МЖК (рис. 10.1). На этой установке также были проведены исследования по дезодорации масла.

Технологическую линию дистилляции мисцеллы растительного масла можно принять за начальную систему — *первый иерархический*

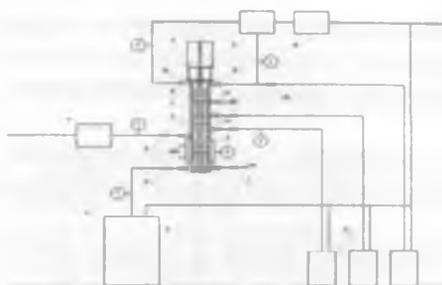


Рис. 10.1. Полупромышленная установка дистилляции/дезодорации растительного масла

уровень. Она разделена на следующие элементы: система 1 — подвод материала, система 2 — установка дистилляции мисцеллы, система 3 — конденсация и вакуум, система 4 — отвод продукции.

Для анализа и составления математических моделей нужно уточнить параметры системы.

Система 2 «Установка дистилляции мисцеллы» имеет следующие входные параметры: температура мисцеллы растительного масла ( $t_0$ ); концентрация мисцеллы растительного масла ( $x_m$ ); расход мисцеллы ( $G_0$ ); расход острого водяного пара ( $D_0$ ); температура ( $t_d$ ); конструкционные параметры установки. Выходными параметрами системы являются: расход мисцеллы ( $G_1$ ); ее концентрация ( $x_1$ ); температура концентрируемой мисцеллы ( $t_1$ ), вторичный расход пара ( $D_1$ ); температура ( $t_{d1}$ ). Процесс дистилляции мисцеллы растительного масла происходит за счет острого водяного пара. Система интенсифицирует процесс дистилляции вращения роторных дисков в аппарате.

Система 3 «Система конденсации и вакуума» используется для конденсации вторичных паров. Конденсатор охлаждается при помощи воды. Его входными параметрами являются: расход ( $G_0$ ); температура пара ( $t_0$ ); расход воды охлаждающего агента ( $L_0$ ) и температура ( $t_{10}$ ). Выходные параметры: расход конденсата ( $G_1$ ) и его температура ( $t_1$ ); расход воды охлаждающего агента ( $L_1$ ) и температура ( $t_{11}$ ). Элементами подсистемы являются рубашка и рабочая поверхность.

Система 4 «Отвод продукции» — сборная. При дистилляции мисцеллы переработанный продукт и полученный конденсат собираются в соответствующих емкостях. Продукт одновременно накапливается и охлаждается до необходимой температуры.

В иерархической структуре третьей ступени рассматриваются элементы систем второй ступени, в частности, системы 2 «Установка дистилляции мисцеллы»: подсистема 2.1 «Установка нагрева мис-



Рис. 10.2. Иерархическая структура технологической линии дистилляции мисцеллы хлопкового масла

целлы растительного масла»; подсистема 2.2 «Аппарат дистилляции мисцеллы растительного масла»; подсистема 2.3 «Сбор обработанной продукции». Подсистема 2.2 «Аппарат дистилляции мисцеллы растительного масла» состоит из подсистем: 2.2.1 «Электродвигатель», 2.2.2 «Рабочая камера», 2.2.3 «Вакуум-отвод».

В иерархическую структуру четвертой ступени входит подсистема 2.2.2 «Рабочая камера», состоящая из рабочих камер тарелок 2.2.2.1–2.2.2.3.

Иерархической структурой пятой ступени является подсистема «Тарелки», которая состоит из распылительных и собирающих распыленную мисцеллу дисков (2.2.2.2.1), жидкой фазы (2.2.2.2.2), паровой фазы (2.2.2.2.3).

Далее при анализе *шестой иерархической ступени* можно рассмотреть составы фаз: мисцелла (2.2.2.2.1), растворитель (2.2.2.2.2), пары растворителя (2.2.2.3.1), водяные пары (2.2.2.3.2). Здесь можно ограничиться этим углублением в технологическую линию.

Системный анализ позволяет найти оптимальный режим процесса и дает возможность использовать полученные данные для определения конструктивных размеров аппарата и синтеза оптимальной установки.

### 10.1.2. Математическое моделирование процесса удаления летучих компонентов из мисцеллы растительного масла

Для того чтобы определить равновесную концентрацию легколетучего компонента, нужно определить его парциальное давление. Согласно закону Дальтона общее давление паровой фазы равно сумме парциального давления компонентов на границе раздела фаз:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{бен.}} + P_{\text{в.п.}} + P_{\text{м}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{бен.}}$ ,  $P_{\text{в.п.}}$ ,  $P_{\text{м}}$  — соответственно парциальное давление бензина, водного пара и летучих компонентов масла, кПа.

Для определения количества легколетучего компонента уточнено уравнение:

$$m_i = \frac{\frac{x_i}{M_i}}{\frac{x_1}{M_1} + \frac{x_2}{M_2} + \frac{x_3}{M_3} + \frac{1 - x_1 + x_2 + x_3}{M_4}}, \quad (2)$$

где  $M_1, M_2, M_3, M_4$  — молекулярная масса компонентов, кг/кмоль;  $x_1, x_2, x_3$  — молекулярная масса летучих компонентов из хлопкового масла, %.

Парциальное давление паров летучего компонента определяется уравнением:

$$p = \frac{G \cdot y}{\sum \frac{G_i y_i}{M_i}} P_{\text{общ}}, \quad (3)$$

где  $y$  — концентрация летучего компонента в газовой фазе, кмоль;  $G$  — расход паровой фазы, кг/с;  $P_{\text{общ}}$  — общее давление, кПа.

После математических преобразований компьютерное отображение парциального давления паров летучего компонента можно представить в виде:



Рис. 10.3. Компьютерная модель процесса изменения парциального давления летучих веществ мисцеллы растительного масла:

$$(u(1) = G, u(2) = y)$$

Зная парциальное давление паров летучего компонента, можно определить его равновесную концентрацию в жидкой фазе. Для расчета системы в качестве равновесной концентрации принимают экспериментальное уравнение в виде:

$$x^* = \frac{P}{(b_{11}t - b_{10}) \cdot 100} \quad (4)$$

Тогда, компьютерное отображение равновесной концентрации можно представить в виде:

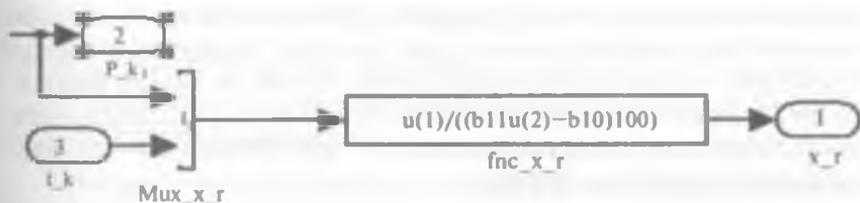


Рис. 10.4. Компьютерная модель процесса изменения равновесной концентрации для жидкой фазы:  $u(1) = P, u(2) = t$

В классических методах расчета иногда используется уровень насыщения острого водяного пара (инертного газа) при дистилляции мисцеллы, он характеризуется коэффициентом:

$$\varphi = \frac{P_{бен}}{P_{бен.р.}} \quad (5)$$

где  $P_{бен}$  — действительное парциальное давление паров экстракционного бензина на поверхности мисцеллы;  $P_{бен.р.}$  — парциальное давление паров экстракционного бензина в равновесном состоянии.

Паровую фазу можно рассматривать как идеальный газ. Парциальное давление изменяется в соответствии с количеством молекул каждого компонента. Это выражение можно записать следующим образом:

$$\frac{N_{бен}}{N_{о.в.п.}} = \frac{P_{бен}}{P_{о.в.п.}} \quad \text{и} \quad \frac{G_{бен}}{G_{о.в.п.}} = \frac{M_{бен}}{M_{о.в.п.}} \frac{P_{бен}}{P_{о.в.п.}}, \quad (6)$$

где  $N_{бен}$ ,  $N_{о.в.п.}$  — соответственно количество молекул экстракционного бензина и острого водяного пара;  $P_{бен}$ ,  $P_{о.в.п.}$  — соответственно парциальное давление экстракционного бензина и острого водяного пара;  $G_{бен}$ ,  $G_{о.в.п.}$  — соответственно расход экстракционного бензина и острого водяного пара;  $M_{бен}$ ,  $M_{о.в.п.}$  — соответственно молекулярный вес экстракционного бензина и острого водяного пара.

### 10.1.3. Математическое описание процесса в фазах

На основе материального баланса определяется математическое описание изменения количества экстракционного бензина в жидкой фазе.

В роторно-дисковом устройстве с помощью диска распыляемая жидкая фаза интенсивно испаряет летучие компоненты в острый водяной пар в каждой рабочей зоне тарелки. Гидродинамическую структуру газо-жидкостной фазы в этом устройстве можно рассматривать моделью идеального смешивания. Тогда в жидкой фазе скорость изменения массы растворителя — экстракционного бензина — выглядит следующим образом:

$$\frac{dm_{бен}}{dt} = G_{бен.мц} - G_{бен.м} - G_{бен.в.п.}, \quad (7)$$

где  $G_{бен.мц}$  — расход бензина с приходящей мисцеллой, кг/с;  $G_{бен.м}$ ,  $G_{бен.в.п.}$  — расход бензина с выходящей мисцеллой и испарившегося в паровую фазу, кг/с.

Расход экстракционного бензина с приходящей мисцеллой определяется по формуле:

$$G_{бен.мц} = \frac{100 - x_{мц.н}}{100} \cdot G_{мц}, \quad (8)$$

где  $x_{мц.н}$  — начальная концентрация мисцеллы растительного масла, %.

Расход экстракционного бензина с уходящей мисцеллой определяется по формуле:

$$G_{\text{бен.м}} = G_{\text{мц}} \frac{x_{\text{мц.н}}}{x_{\text{мц.к}}} \frac{100 - x_{\text{мц.к}}}{100}, \quad (9)$$

где  $x_{\text{мц.к}}$  — конечная концентрация мисцеллы растительного масла, %.

На основе теплового баланса осуществляется математическое описание изменения количества тепла жидкой фазы.

Скорость изменения количества тепла в жидкой фазе определяется уравнением:

$$\frac{dQ_{\text{мц}}}{d\tau} = q_{\text{мц}} - q_{\text{м}} - q_{\text{бен}} - q_{\text{вл}}, \quad (10)$$

где  $q_{\text{мц}}$  — энергия, поступающая с мисцеллой, кДж/с;  $q_{\text{м}}$  — энергия, уходящая с мисцеллой, кДж/с;  $q_{\text{бен}}$  — энергия, уносимая молекулами экстракционного бензина в паровую фазу, кДж/с;  $q_{\text{пар}}$  — энергия, переданная от паровой фазы к жидкой фазе, кДж/с.

Количество тепла жидкой фазы вычисляется по известному выражению:

$$Q_{\text{мц}} = m_{\text{мц}} c_{\text{мц}} t_{\text{мц}}, \quad (11)$$

где  $m_{\text{мц}}$  — масса мисцеллы растительного масла в зоне тарелки, кг;  $c_{\text{мц}}$  — теплоемкость мисцеллы растительного масла, кДж/(кг °С),  $t_{\text{мц}}$  — температура мисцеллы, °С.

Тепловая энергия, приходящая с мисцеллой, определяется по формуле:

$$q_{\text{мц}} = G_{\text{мц}} c_{\text{мц}} t_{\text{мц.б}}, \quad (12)$$

где  $t_{\text{мц}}$  — начальная температура мисцеллы растительного масла на входе в установку, °С.

Расход тепла с уходящей мисцеллой вычисляется по формуле:

$$q_{\text{м}} = G_{\text{м}} c_{\text{м}} t_{\text{мц.о}}, \quad (13)$$

или после математических преобразований:

$$q_{\text{м}} = G_{\text{мц}} \frac{a_{\text{мц.н}}}{a_{\text{мц.к}}} c_{\text{м.ой}} t_{\text{мц.к}}, \quad (14)$$

где  $c_{\text{м}}$  — теплоемкость выходящей мисцеллы, кДж/(кг °С),  $t_{\text{мц.к}}$  — температура мисцеллы на выходе, °С.

Паровую фазу можно рассматривать как идеальный газ. Парциальное давление изменяется в соответствии с количеством молекул каждого компонента. Это выражение можно записать следующим образом:

$$\frac{N_{бен}}{N_{о.в.п.}} = \frac{P_{бен}}{P_{о.в.п.}} \quad \text{и} \quad \frac{G_{бен}}{G_{о.в.п.}} = \frac{M_{бен}}{M_{о.в.п.}} \frac{P_{бен}}{P_{о.в.п.}}, \quad (6)$$

где  $N_{бен}$ ,  $N_{о.в.п.}$  — соответственно количество молекул экстракционного бензина и острого водяного пара;  $P_{бен}$ ,  $P_{о.в.п.}$  — соответственно парциальное давление экстракционного бензина и острого водяного пара;  $G_{бен}$ ,  $G_{о.в.п.}$  — соответственно расход экстракционного бензина и острого водяного пара;  $M_{бен}$ ,  $M_{о.в.п.}$  — соответственно молекулярный вес экстракционного бензина и острого водяного пара.

### 10.1.3. Математическое описание процесса в фазах

На основе материального баланса определяется математическое описание изменения количества экстракционного бензина в жидкой фазе.

В роторно-дисковом устройстве с помощью диска распыляемая жидкая фаза интенсивно испаряет летучие компоненты в острый водяной пар в каждой рабочей зоне тарелки. Гидродинамическую структуру газо-жидкостной фазы в этом устройстве можно рассматривать моделью идеального смешивания. Тогда в жидкой фазе скорость изменения массы растворителя — экстракционного бензина — выглядит следующим образом:

$$\frac{dm_{бен}}{dt} = G_{бен.мц} - G_{бен.м} - G_{бен.в.п.}, \quad (7)$$

где  $G_{бен.мц}$  — расход бензина с приходящей мисцеллой, кг/с;  $G_{бен.м}$ ,  $G_{бен.в.п.}$  — расход бензина с выходящей мисцеллой и испарившегося в паровую фазу, кг/с.

Расход экстракционного бензина с приходящей мисцеллой определяется по формуле:

$$G_{бен.мц} = \frac{100 - x_{мц.н}}{100} G_{мц}, \quad (8)$$

где  $x_{мц.н}$  — начальная концентрация мисцеллы растительного масла, %.

Расход экстракционного бензина с уходящей мисцеллой определяется по формуле:

$$G_{бен.м} = G_{мц} \frac{x_{мц.н}}{x_{мц.к}} \cdot \frac{100 - x_{мц.н}}{100}, \quad (9)$$

где  $x_{мц.к}$  — конечная концентрация мисцеллы растительного масла, %.

На основе теплового баланса осуществляется математическое описание изменения количества тепла жидкой фазы.

Скорость изменения количества тепла в жидкой фазе определяется уравнением:

$$\frac{dQ_{жл}}{d\tau} = q_{мц} - q_{м} - q_{бен} - q_{вл}, \quad (10)$$

где  $q_{мц}$  — энергия, поступающая с мисцеллой, кДж/с;  $q_{м}$  — энергия, уходящая с мисцеллой, кДж/с;  $q_{бен}$  — энергия, уносимая молекулами экстракционного бензина в паровую фазу, кДж/с;  $q_{пар}$  — энергия, переданная от паровой фазы к жидкой фазе, кДж/с.

Количество тепла жидкой фазы вычисляется по известному выражению:

$$Q_{жл} = m_{мц} c_{мц} t_{мц}, \quad (11)$$

где  $m_{мц}$  — масса мисцеллы растительного масла в зоне тарелки, кг;  $c_{мц}$  — теплоемкость мисцеллы растительного масла, кДж/(кг °С),  $t_{мц}$  — температура мисцеллы, °С.

Тепловая энергия, приходящая с мисцеллой, определяется по формуле:

$$q_{мц} = G_{мц} c_{мц} t_{мц.б}, \quad (12)$$

где  $t_{мц}$  — начальная температура мисцеллы растительного масла на входе в установку, °С.

Расход тепла с уходящей мисцеллой вычисляется по формуле:

$$q_{м} = G_{м} c_{м} t_{м.в}, \quad (13)$$

или после математических преобразований:

$$q_{м} = G_{мц} \frac{a_{мц.н}}{a_{мц.к}} c_{м.ой} t_{м.к}, \quad (14)$$

где  $c_{м}$  — теплоемкость выходящей мисцеллы, кДж/(кг °С),  $t_{м.к}$  — температура мисцеллы на выходе, °С.

**Математическое описание изменения количества тепла паровой фазы.** Теплота, полученная паровой фазой от паров экстракционно-го бензина определяется формулой:

$$q_{бен} = G_{бен} i_{бен}, \quad (15)$$

где  $i_{бен}$  — энтальпия паров экстракционного бензина, кДж/кг.

Переданная из паровой в жидкую фазу теплота вычисляется с помощью формулы:

$$q_{в.п.} = \alpha F (t_{в.п.} - t_{мц}), \quad (16)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $F$  — общая поверхность капель,  $\text{м}^2$ ;  $t_{в.п.}$  — температура паровой фазы,  $^{\circ}\text{C}$ .

Из уравнения теплового баланса (10) после математических преобразований на основе вышеприведенных уравнений сформализованы математическое описание и компьютерная модель, характеризующая изменение температуры жидкой фазы:

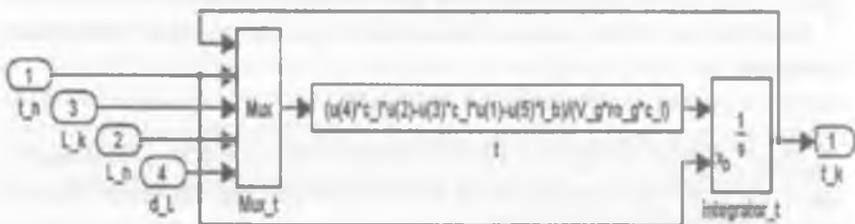


Рис 10.5. Компьютерная модель процесса изменения температуры в жидкой фазе

Острый водяной пар движется снизу вверх. Принимая динамическую структуру потока паровой фазы в качестве модели идеального вытеснения, можно записать следующее выражение:

$$\frac{dQ_{н.ф.}}{d\tau} + w_n \frac{dQ_{н.ф.}}{dh} = -q_{в.п.} - q_{бен}, \quad (17)$$

где  $Q_{н.ф.}$  — количество тепла паровой фазы, кДж;  $w_n$  — скорость пара, м/с; расход острого водяного пара можно принять как постоянный расход;  $q_{в.п.}$  — расход тепла с приходящим паром, кДж/с;  $q_{бен}$  — расход тепла для нагрева молекул экстракционного бензина, переходящего из жидкой фазы в паровую, кДж.

Сумма количества тепла острого водяного пара и паров экстракционного бензина равна количеству тепла газовой фазы.

$$Q_{n,ф} = Q_{o,в.п.} + Q_{бен}. \quad (18)$$

Зная объем паровой фазы, можно выразить количество тепла паровой фазы:

$$Q_{n,ф} = V_{в.п.} \cdot \rho_{n,ф} \cdot c_{n,ф} \cdot t_{в.п.} \quad (19)$$

где  $V_{в.п.}$  — общий объем острого водного пара и экстракционных бензиновых паров, м<sup>3</sup>;  $\rho_{n,ф}$  — средняя плотность паровой фазы кг/м<sup>3</sup>.

Средняя плотность определяется по аддитивному закону:

$$\rho_{n,ф} = y\rho_{бен} + (1-y)\rho_{o,в.п.}, \quad (20)$$

где  $y$  — доля бензина в паровой фазе, кмоль;  $c_{n,ф}$  — средняя сравнительная теплоемкость паровой фазы, кДж/(кг·°С).

Учитывая объем водяного пара и паров бензина, получено уравнение:

$$Q_{n,ф} = \frac{k_1}{\rho_{o,в.п.}} G_{o,в.п.} \cdot \rho_{n,ф} \cdot c_{n,ф} \cdot t_{в.п.} \quad (21)$$

Затраченная теплота на нагревание молекул экстракционного бензина паровой фазой определяется формулой:

$$q_{бен} = G_{бен} \cdot c_{бен} (t_{в.п.} - t_{мч}). \quad (22)$$

После математических преобразований сформулировано математическое описание для температуры паровой фазы:

$$\frac{d\left(\frac{k_1}{\rho_{усб}} G_{усб} \cdot \rho_{n,ф} \cdot c_{n,ф} \cdot t_{в.п.}\right)}{d\tau} + w_n \frac{d\left(\frac{k_1}{\rho_{o,в.п.}} G_{o,в.п.} \cdot \rho_{n,ф} \cdot c_{n,ф} \cdot t_{в.п.}\right)}{dh} = \alpha F (t_{мч} - t_{в.п.}) + G_{бен} \cdot c_{бен} (t_{мч} - t_{в.п.}). \quad (23)$$

Для расчета процесса изменения температуры газовой фазы с учетом концентрирования мисцеллы по квазиаппаратам в квазиаппарате можно принять динамическую структуру полного перемешивания. Такое допущение было принято при составлении компьютерной модели процесса дистилляции в квазиаппарате. Изменение по времени температуры паровой фазы выражено в виде:

$$\frac{dt_{a,n}}{d\tau} = \frac{1}{V \cdot \rho_{a,n} \cdot c} \left[ G(ct_{ax} - ct_{a,n}) + \alpha_V V (t_{a,n} - t_{a,n}) \right] \quad (24)$$

Исследования на компьютерной модели показали, что при использовании источников тепла более высокой мощности влияние доли тепла газовой фазы незначительно.

#### 10.1.4. Математическое описание процесса переноса между фазами

Процесс передачи вещества включает в себя процессы в двух взаимодействующих фазах через поверхность границы фаз. Принимая это во внимание, количество вещества  $M$ , перешедшее за единицу времени с одной фазы во вторую, выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} M &= K_y F (y - y^*); \\ M &= K_x F (x^* - x), \end{aligned} \quad (24)$$

где  $K_y$  — коэффициент массообмена, выражающий концентрацию вещества в газовой фазе;  $K_x$  — коэффициент массообмена, выражающий концентрацию вещества в жидкой фазе.

Движущая сила процесса массоотдачи выражается разницей между рабочей и равновесной концентрациями компонента.

Трудность расчета процесса заключается в практической невозможности прямого расчета межфазной поверхности. Поэтому для расчета массообмена используют объемные коэффициенты массоотдачи:

$$V = \frac{F}{a}, \quad (25)$$

где  $a$  — удельная площадь контакта фаз,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Имея в виду формулу (25), получим:

$$\begin{aligned} M &= K_y a V (y - y^*) = K_{yV} V (y - y^*); \\ M &= K_x a V (x^* - x) = K_{xV} V (x^* - x), \end{aligned} \quad (26)$$

где  $K_{yV}$  и  $K_{xV}$  — объемные коэффициенты массоотдачи.

На основе вышеизложенного сформулирована компьютерная модель процесса, определяющая расход летучего компонента из жидкой фазы (рис. 10.6).

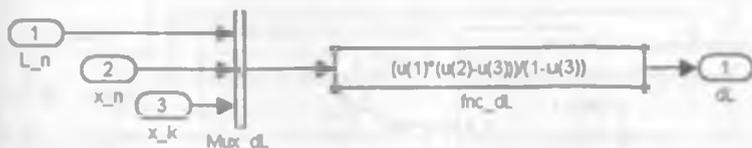


Рис. 10.6. Компьютерная модель процесса перехода/расхода летучих веществ мисцеллы растительного масла из жидкой фазы в газовую фазу

### 10.1.5. Математическая модель процесса в одной тарелке

Математическая модель описания процесса в рабочей зоне одной тарелки выглядит следующим образом:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{L_n x_n - L \cdot x - K_V V_L (x - x^*)}{V_L \rho_L}$$

$$L = L_n - \sum \Delta L$$

$$\Delta L = \frac{L_n (x_n - x)}{1 - x}$$

$$y = \frac{G_n y_n + \Delta L}{G}$$

$$G = G_n + \sum \Delta L$$

$$x^* = \frac{p}{(h_1 t - h_0) \cdot 100}$$

$$p = \frac{G \cdot y}{\sum \frac{G_i y_i}{M_i}} P_{\text{vн}}$$

$$\frac{dt_{\text{мц}}}{d\tau} = \left( G_{\text{мц}} c_{\text{мц}} t_{\text{мц}} - G_{\text{мц}} \frac{x_{\text{мц}6}}{x_{\text{мц}0}} c_{\text{мц}} t_{\text{мц}} - G_{\text{бен}} i_{\text{бен}} + \alpha F (t_{\text{вн}} - t_{\text{мц}}) \right) / V_L \rho_L c_L$$

Агрегируя математические модели процессов в подсистемах (объединяя алгоритмические блоки) формализована компьютерная модель для процесса дистилляции мисцеллы в рабочей зоне одной тарелки дистиллятора мисцеллы с помощью программы «Matlab Simulink» (рис. 10.7).

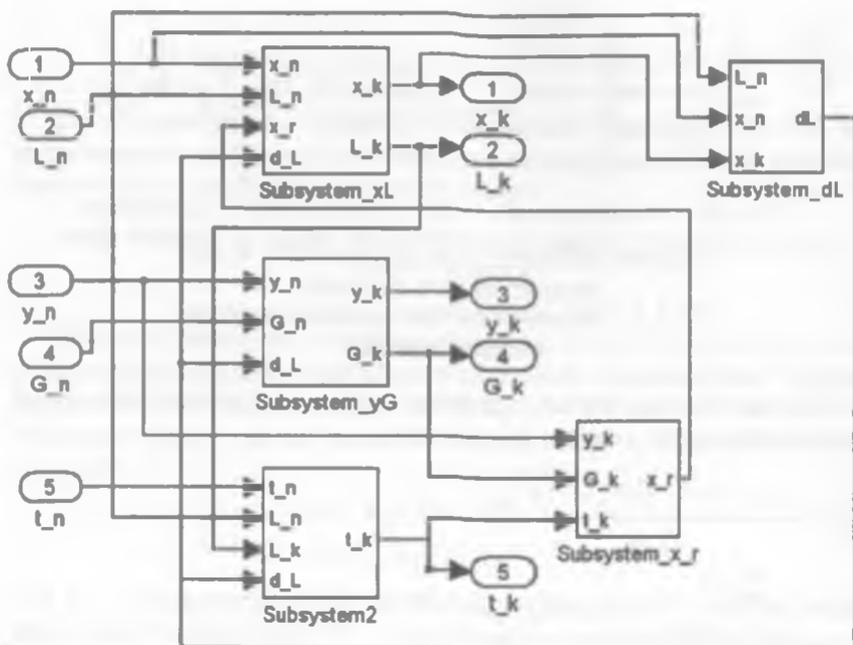


Рис. 10.7. Компьютерная модель процесса дистилляции мисцеллы в рабочей зоне одной тарелки

**Обозначения параметров в компьютерной модели:**

<i>Начальные параметры первой ступени:</i>	
$x_n$	начальная концентрация получаемого легколетучего компонента
$L_n$	начальный расход получаемого легколетучего компонента
$y_n$	начальная концентрация паровой фазы легколетучего компонента
$G_n$	начальный расход паровой фазы легколетучего компонента
$t_n$	начальная температура получаемой жидкости

Выходные параметры первой ступени:	
$x_k$	концентрация легколетучего компонента с выходящей жидкостью
$L_k$	расход легколетучего компонента с выходящей жидкостью
$y_k$	концентрация легколетучего компонента в выходящей паровой фазе
$G_k$	расход легколетучего компонента в выходящей паровой фазе
$t_k$	температура выходящей жидкости

### 10.1.6. Математическое описание процесса в рабочей зоне аппарата

Путем агрегации компьютерных моделей процесса дистилляции мисцеллы в рабочей зоне тарелки дистиллятора мисцеллы с помощью программы «Manlab Simulink» формализована общая компьютерная модель процесса дистилляции мисцеллы для 6-тарельчатого аппарата (рис. 10.8).

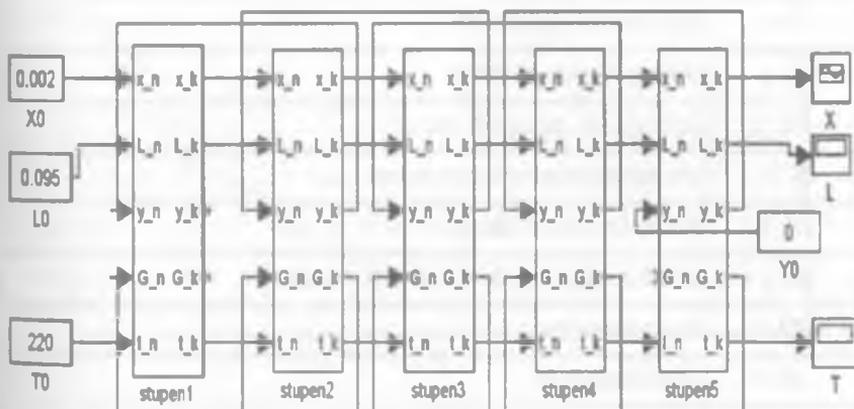


Рис. 10.8. Компьютерная модель процесса дистилляции для 6-тарельчатого аппарата

Для каждой рабочей зоны тарелки существуют входные и выходные параметры. Выходные параметры предыдущего этапа считаются входными параметрами следующего этапа, то есть выходные параметры первой зоны являются входными параметрами второй зоны, и т. д.

С помощью прикладной программы «Manlab Simulink» проведено исследование на компьютерной модели перегонки летучих компонентов для полупромышленной установки роторно-дисковой дистилляции мисцеллы растительного масла. Для выполнения расчетов были приняты следующие значения параметров:

Начальный расход мисцеллы растительного масла, кг/с	0,04–0,06
Начальная концентрация мисцеллы растительного масла, в массовых долях	0,90–0,95
Начальная температура мисцеллы растительного масла, °С	100–150
Давление в дезодораторе, кПа	10–60
Расход острого водного пара, кг/с	0,05–0,04

*Обозначения параметров в компьютерной модели:*

V_l	объем жидкости
Ro_l	плотность жидкости
V_g	объем паровой фазы
Ro_g	плотность паровой фазы
K_v	коэффициент массоотдачи
M_b	молекулярная масса
M_v	молекулярная масса водяного пара
B11	коэффициент
B10	коэффициент
C_l	теплоемкость жидкости
I_b	энтальпия пара

Алгоритм ввода значений вышеуказанных параметров для проведения вычислений на компьютерной модели показан на рис. 10.9.

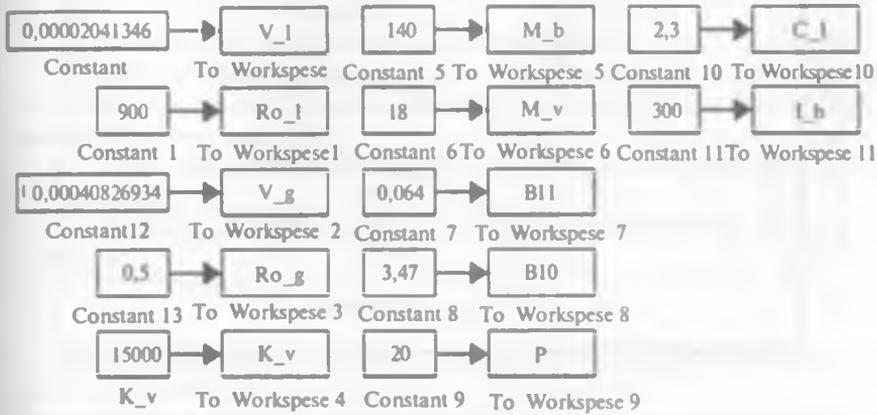


Рис 10.9. Алгоритм ввода значений параметров для проведения вычислений на компьютерной модели

Изменение концентрации летучего компонента в жидкой фазе по времени в 6-тарельчатом дистилляционном процессе представлено на рис. 10.10, в паровой фазе — на рис. 10.11.

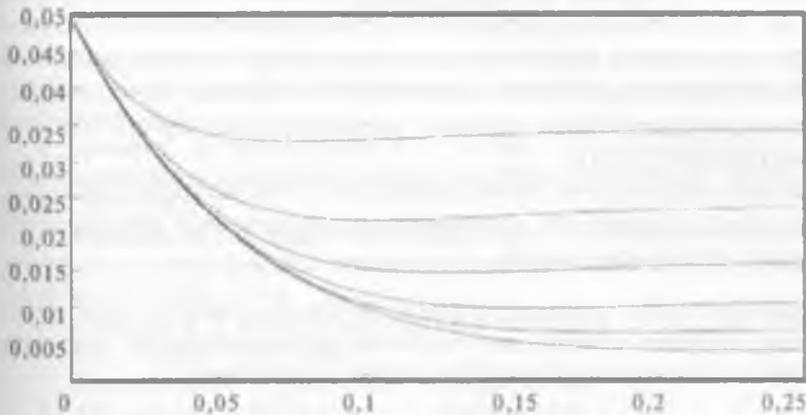
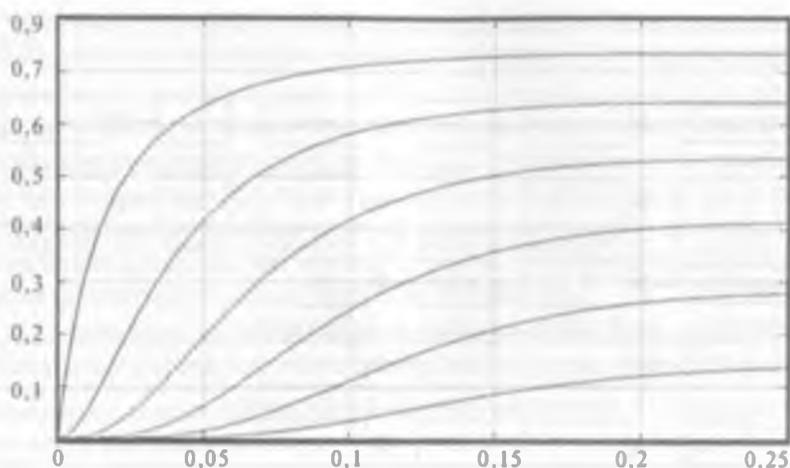


Рис 10.10. Динамика пускового периода. Изменение по времени концентрации легколетучего компонента в жидкой фазе:  
 $x_H = 0,05\%$ ;  $t_H = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $L_H = 0,04$ ;  $P_{yM} = 30\text{ кПа}$



*Рис 10.11.* Динамика пускового периода. Изменение по времени концентрации легколетучего компонента в паровой фазе по времени:  $x_H = 0,05 \%$ ;  $t_H = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L_H = 0,04$ ;  $P_{ум} = 30 \text{ кПа}$

Во время многоступенчатого процесса дистилляции мисцеллы концентрация легколетучих компонентов при переходе из жидкой фазы с первой рабочей зоны тарелки в следующую по времени уменьшается; верхняя кривая отражает нижнюю первую тарелку (см. рис. 10.10). Концентрация легколетучих компонентов в паровой фазе увеличивается. Имеется дискретное увеличение концентрации легколетучих компонентов в паровой фазе по каждой ступени рабочей зоны; верхняя кривая отражает характеристику верхней шестой тарелки (см. рис. 10.11).

Анализ результатов, проведенных на компьютерных моделях, показывает возможность интенсификации процесса дистилляции мисцеллы хлопкового масла.

*Ключевые слова:* теплообмен; перегонка; дистилляция; дезодорация; хлопковое масло; многоступенчатая иерархическая структура; равновесие; технологическая схема; модель; оптимизация.

### Контрольные вопросы

1. Как происходит процесс дистилляции мисцеллы хлопкового масла?
2. Из чего состоит модель процесса в тарелке?
3. Из чего состоит иерархическая структура аппарата?

4. Из чего состоит иерархическая структура тарелки, установки?
5. Из чего состоит модель процесса в рабочей зоне?
6. В чем суть системного анализа установки дезодорации хлопкового масла?
7. Из каких зон состоит система дистилляции?
8. Что такое рабочая камера?
9. Как составляется математическое описание процесса в рабочей камере?
10. Какие компромиссные задачи решаются для оптимизации процесса?
11. Из каких подсистем состоит многоуровневая структура системы и процесса?

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 10

1. Разъяснен многоступенчатый анализ системы тепломассообмена на примере дистилляции/дезодорации растительного масла.
2. Показаны анализ и построение математического описания дистилляции в системе выбранной одной тарелки.
3. С помощью блочного принципа показан способ формализации компьютерной модели тепломассообменного процесса.
4. Разъяснена методика получения характеристик на компьютерной модели, отражены вопросы синтеза оптимальных условий системы дистилляции и дезодорации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Артиков А. А.* Процессы и аппараты пищевых производств (математическое моделирование, теплообменные процессы, выпаривание). — Т.: «Укитувчи», 1983.
2. *Артиков А., Маматкулов А. Х., Додаев К. О., Яхшимурадова Н. К.* Системный анализ концентрирования растворов инертным газом. — Т.: «Фан». 1987. 164 с.
3. *Дворецкий С. И., Егоров А. Ф., Дворецкий Д. С.* Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов: ТГТУ. 2003. 224 с.
4. *Кафаров В. В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии — М.: «Химия». 1985. 448 с.
5. *Маматкулов О. А.* Дисс к.т.н. — Ташкент. 2009.
6. *Мухитдинов Д. П.* Дисс к.т.н. — Ташкент. 2012.
7. *Хамдамов А. М.* Дисс к.т.н. — Ташкент. 2010.

## ТЕМА 11. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

Цель темы — разъяснение многоступенчатого метода анализа и синтеза системы и процесса сушки материала. Для получения предварительной информации показывается применение многоступенчатого метода анализа системы и расчета процесса на примере сушки материала в аппарате и автоматизированного поиска дискретного режима подвода энергии. Работа выполнена совместно с З. Машариповой.

Дорогой магистрант, изучая тему, Вы научитесь углубляться в систему сушки материала используя принцип расчленения установки на аппараты, рабочую зону, фазы материала и газа, квазислои и макромолекулярные строения. Ознакомитесь с компьютерными моделями, способами принятия решения в выборе оптимальной системы сушки. Тема ограничена расчетом процесса на уровне фаз материала и газа. При желании Вы сможете рассчитать процесс сушки с учетом и последующих углублений. Помогут Вам в этом разработанные нами компьютерные модели. Вы сможете быстро рассчитать исследуемый технологический процесс и выбрать оптимальную систему.

Компьютерная модель и программы автоматизированного расчета имеются в библиотеке кафедры ИАБ ТХТИ.

### План

- 11.1. Интересный пример
- 11.2. Многоступенчатый системный анализ системы сушки материалов
- 11.3. Математическое моделирование процессов в системе макромолекул
- 11.4. Математическое моделирование процесса сушки, протекающего на уровне квазислоя высушиваемого материала
- 11.5. Математическое моделирование процесса сушки, протекающего на уровне иерархии «твердая фаза, газовая фаза, нагреватель»
- 11.6. Компьютерное отображение межфазных взаимоотношений равновесного состояния по концентрации влаги в жидкой фазе
- 11.7. Математическое моделирование процесса сушки в рабочей камере аппарата

## 11.1. Интересный пример

Анализ системы на примере сушки материала в аппарате в СВЧ подводе энергии. При многоступенчатом анализе аппарат сушки представлен как основная система, где изучением процесса сушки определены ее входные и выходные параметры. Основная выбранная система расчленяется на отдельные системы-элементы: систему подвода материала, рабочую зону, систему отвода материала. В свою очередь, рабочая зона также расчленена на системы: зону подвода энергии, газовую фазу и фазу высушиваемого материала. На этом уровне ограничено углубление в систему. Определены входные и выходные параметры.

Компьютерная модель и вид автоматизированного расчета процесса в рабочей зоне аппарата сушки материала представлены на рис. 11.1.

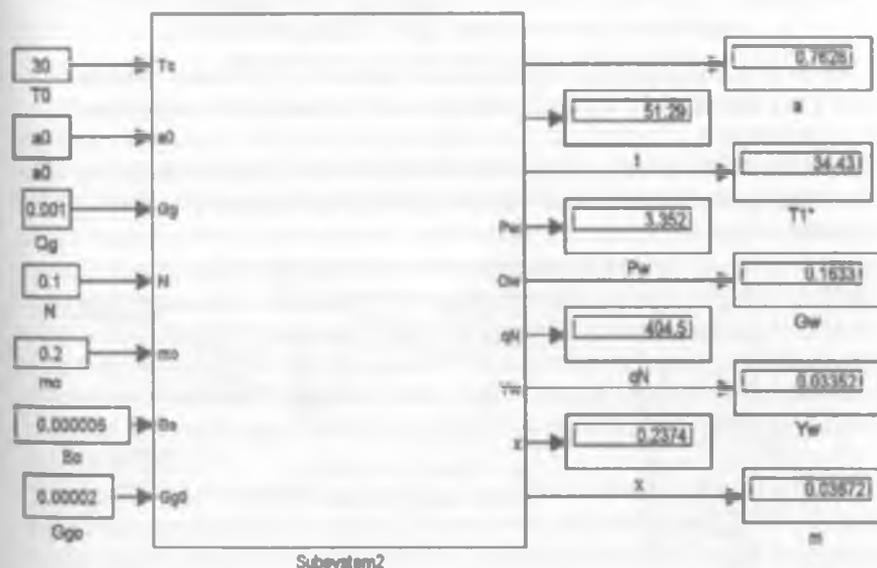


Рис. 11.1. Компьютерное отображение автоматизированного расчета процесса сушки в аппарате

Углубляясь в систему, можно увидеть составляющие блоков компьютерной модели (рис. 11.2).

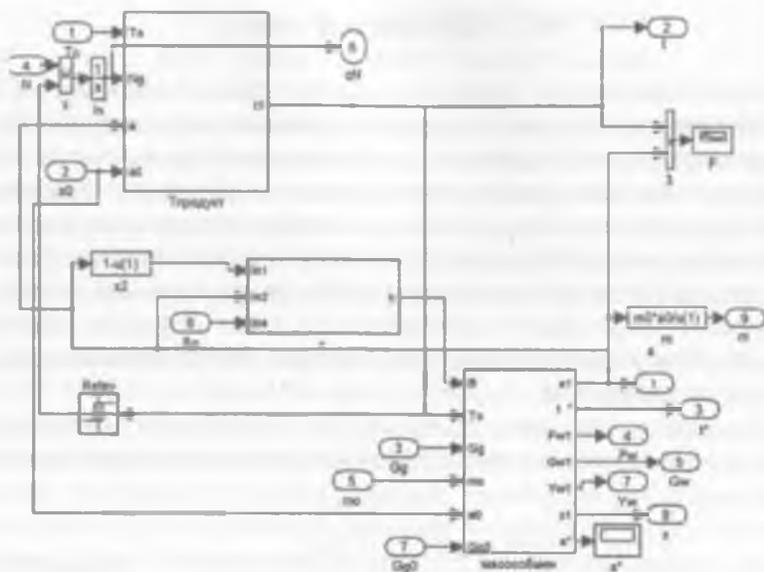


Рис.11.2. Компьютерное отображение первого углубления, состоящего из отдельных блоков и системы регулирования температуры

Один из блоков — блок нагревания материала с изменением температуры, теплоемкости и энтальпии водяного пара представлен на рис. 11.3.

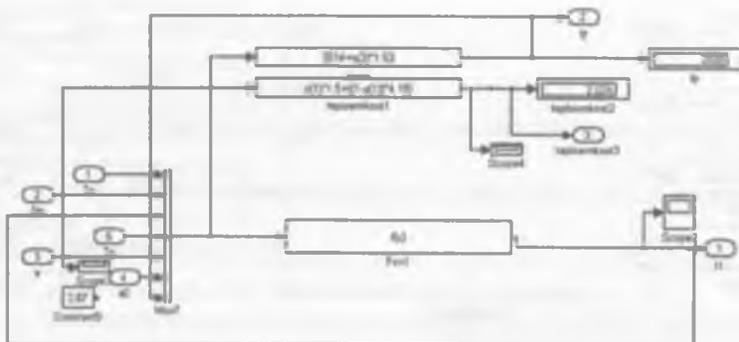


Рис.11.3. Компьютерное отображение второго углубления

Для расчета процесса изменения равновесного состояния и влажности материала путем массообмена также построен блок. Его компьютерная модель представлена на рис. 11.4.



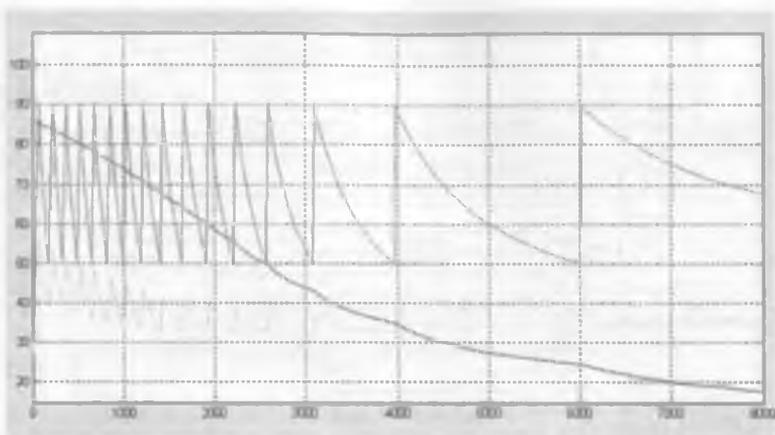


Рис. 11.5. Изменение по времени температуры материала при оптимальном дискретном теплоподводе: верхняя кривая — действительная температура; нижняя — равновесная

### Основные понятия

**Простой системный анализ** — рассмотрение системы в виде физической комбинации составляющих элементов установки сушки.

**Анализ установки сушки** — рассмотрение аппаратов совместно с выбранными в них процессами; определяются параметры и делаются предварительные рассуждения их взаимовлияния;

**Многоступенчатый анализ** — последовательное дискретное углубление в систему установки сушки.

**Сушка** — удаление жидкости (чаще всего влаги воды, реже — иных жидкостей, например, летучих органических растворителей) из веществ и материалов тепловыми способами.

**Сублимация** (возгонка, от лат. *sublimo* — возношу) — переход вещества из твердого состояния непосредственно (без плавления) в газообразное.

**Денатурация белков** (от лат. *de-* — приставка, означающая отделение, удаление и лат. *nature* — природа) — термин биологической химии, означающий потерю белками их естественных свойств (растворимости, гидрофильности и др.) вследствие нарушения пространственной структуры их молекул.

**Рабочая камера** — объем, где происходит сушка материала.

**Квазислой** — мысленный слой высушиваемого материала.

**Компьютерная модель** — отображение процесса на компьютере.

*Равновесное состояние между фазами* — состояние, при котором процесс массообмена между фазами останавливается.

*Компьютерная модель процесса изменения равновесного условия в двухфазной системе:* при введении параметров двухфазной системы компьютер позволяет автоматически рассчитать переход системы в равновесие.

*Осциллирующий режим* — режим дискретного включения нагрева при сушке материала.

## 11.2. Многоступенчатый системный анализ системы сушки материалов

Многоступенчатый системный анализ системы переработки материала предполагает рассмотрение процессов в отдельных функциональных подсистемах. Для этого осуществляется разделение общей технологической схемы на подсистемы, производится анализ информации о процессах в каждой подсистеме и разрабатывается метод объединения результатов исследований, полученных в каждой подсистеме. На основе такой агрегации создается оптимальная технологическая схема.

На основе многоступенчатого метода анализа системы и расчета процесса на примере сушки материала можно учитывать и то, что материалы в процессе переработки меняют свои свойства. При математическом моделировании желательнее учесть эти изменения. Изучение процессов и явлений на различных уровнях иерархии требует дальнейшего развития этого принципа применительно к процессам переработки материала.

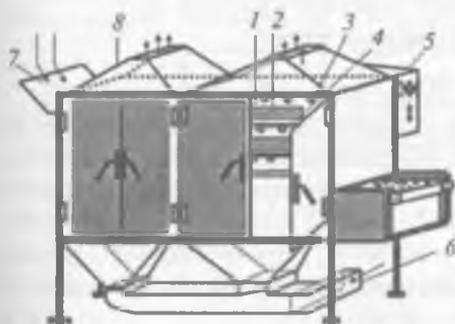


Рис. 11.6. Аппарат ИК — конвективная сушильная установка непрерывного действия:

- 1 — камера;
- 2 — транспортер;
- 3 — ИК-лампа;
- 4 — рефлектор;
- 5 — щит;
- 6 — коммуникация;
- 7 — загрузочное устройство;
- 8 — вытяжка

Систему сушки можно представить в виде многоуровневой системы: на первом иерархическом уровне рассматриваются процессы, протекающие в объеме сушильного аппарата; на втором — процессы в рабочей камере; на третьем изучаются процессы, протекающие в объеме материала; на четвертом — процессы, протекающие в слоях ломтей материала; на пятом уровне имеют место явления, относящиеся к макромолекулам, которые вызывают фазовые, физико-химические и другие превращения; на шестом рассматриваются изменения на атомарно-молекулярном уровне материала.

Для более детального рассмотрения за *первый иерархический уровень* можно принять технологическую линию сушки материала. Тогда аппарат конвективной и вакуумной сушки материала (*подсистема С*) рассматривается на *втором уровне иерархии*. Элементами системы здесь выступают рабочая камера, вентилятор, фильтр и вакуумнасос. *Подсистема С.1* представляет собой рабочую камеру сушильной установки, которая снабжена нагревательными элементами, отражателями и сетчатым поддоном. Вспомогательным оборудованием являются подсистемы С.2, С.3 и С.4. *Подсистема С.2* — вентилятор, обеспечивающий равномерную подачу воздуха по всему объему



Рис. 11.7. Иерархическая структура технологического процесса сушки материала

му конвективной сушильной установки. *Подсистема С.3* — фильтр, обеспечивающий очистку поступающего воздуха. Для создания вакуума предусмотрена *подсистема С.4*, которая представляет собой вакуум-насос.

На *третьем уровне иерархии* подсистема С.1. расчленена на подсистемы С.1.1, С.1.2, С.1.3 и С.1.4. *Подсистема С.1.1* представляет собой элемент ИК-нагревателя. *Подсистема С.1.2* — газовая фаза. Здесь протекают процессы перемещения газовой фазы, поглощения влаги и теплообмена. *Подсистема С.1.3* — продукт (твердая фаза). *Подсистемой С.1.4* является сетчатый поддон. Для обеспечения равномерного прохода и распределения воздуха по всей поверхности высушиваемого продукта сетка изготовлена в виде решетки из нержавеющей стали. Коэффициент прохода воздуха составляет 0,8.

На *четвертом уровне иерархии* рассматриваются элементы продукта подсистемы С.1.3. Это квазислой материала (С 1.3.1—С 1.3.п)

На *пятом уровне иерархии* в процессе нагрева происходят структурные изменения, имеющие место на макромолекулярном уровне. Составными элементами этого уровня иерархии выступают *подсистемы С.1.3.1.1* — микроэлементы, *С.1.3.1.2* — белок, *С.1.3.1.3* — витамины, *С.1.3.1.4* — сахар и др. Основным процессом являются структурные превращения биологических веществ, явления денатурации белков, разрушения микроэлементов, потеря витаминов.

*Шестым уровнем* могут быть атомарно-молекулярные строения.

В большинстве случаев ограничиваются рассмотрением процессов на третьем уровне, что является достаточным и имеет существенное значение. Для более широкого представления процессов и явлений магистранту разъясняются вопросы моделирования начиная с пятого глубинного уровня.

### **11.3. Математическое моделирование процессов в системе макромолекул**

Для построения математической модели процесса сушки материала выбрана методика составления математической модели начиная с нижнего уровня иерархической структуры — системы макромолекул. Составлены математические описания процессов, в которых участвуют витамины и белки. Данное предложение найдет применение для более точных расчетов и синтеза технологии, учитывающих существенные изменения в макромолекулярном составе продуктов.

При необходимости можно углубиться еще дальше, учитывая изменения на уровне простых молекул. Ограничимся расчетами на уровне клеток высушиваемого материала.

Исследованиями ряда ученых рассмотрено сохранение питательных веществ в продуктах в ходе сушки. При этом изучены превращения витаминов и белков.

Уравнение, отражающее содержание питательных веществ в составе продуктов в ходе сушки материала, предложено в виде:

$$N(\tau) = N_0 \cdot \exp(-\lambda^*(t) \cdot \tau_0), \quad (1)$$

$N(\tau)$  где — конечное содержание данного вещества после сушки, мг на 100г;  $N_0$  — содержание вещества в сырье до начала сушки, мг на 100г;  $\lambda^*(t)$  — константа, характеризующая распад вещества при определенной температуре сушки,  $c^{-1}$ .

Например, содержание витамина С в процессе сушки растительного сырья после обработки ИК-излучением определяется по формуле

$$N(\tau) = N_{обр}(\tau_{обр}) \cdot \exp[-\lambda^*(t) \cdot \tau_c], \quad (2)$$

где,  $N_{обр}$  — содержание витамина С после обработки в течение времени  $\tau_{обр}$ .

$$N_{обр}(\tau_{обр}) = N_0 \cdot \exp[-\lambda^*(t_{обр}) \cdot \tau_{обр}], \quad (3)$$

где  $-\lambda^*(t_{обр})$  — константа распада вещества при температуре по воздействию ИК-обработки.

Вышеприведенные уравнения, рассмотренные на нижнем уровне иерархии, отражают содержание витаминов в составе растительного сырья. Как известно, важным источником полезных веществ являются витамины С, Р и В<sub>с</sub>. Отсутствие или недостаток хотя бы одного из витаминов В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>12</sub>, В<sub>15</sub> вызывает авитаминоз или гиповитаминоз.

Изучая содержание витаминов в ходе сушки, нами составлено дифференциальное уравнение, которое имеет вид:

$$\frac{dm_{B_i}}{d\tau} = U_{B_i} - m_{B_i} \cdot \lambda_{B_i}^* \quad (4)$$

где  $B_i$  — количество витамина после сушки;  $m_{B_i}$  — количество сохранившихся витаминов;  $U_{B_i}$  — скорость распада витаминов.

Данное математическое описание отражает закономерности изменения количества витаминов и скорости распада веществ.

Количество витаминов определяется их количеством до и после сушки:

$$m_{B_{i,обш}} = m_{B_{i,n}} - m_{B_{i,c}}, \quad (5)$$

где  $m_{B_{i,n}}$  — количества витаминов в начале сушки.

Скорость распада витаминов можно выразить следующим гиперболическим уравнением:

$$U_{B_i} = \kappa \cdot \exp\left(\frac{t-65}{9}\right). \quad (6)$$

Потерю витаминов в ходе сушки можно отразить единой системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_{B_{i,c}}}{dt} = U_{B_i} \cdot m_{B_{i,обш}}; \\ m_{B_{i,обш}} = m_{B_{i,n}} - m_{B_{i,c}}; \\ U_{B_i} = \kappa \cdot \exp\left(\frac{t-65}{9}\right) \end{cases} \quad (7)$$

Аналогично можно рассмотреть преобразования микроэлементов, сахаров белков и других макромолекул в процессе сушки. Например, процесс денатурации белков также выражается с помощью следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dm_c}{dt} = U_m \cdot m_c, \quad (8)$$

где,  $m_c$  — масса изменяемых белков;  $U_m$  — скорость денатурации белков;  $m_c$  — количество сохранных белков.

Количество сохранных белков определяется общим количеством белков, находящихся в продукте, и денатурированных белков в течение процесса сушки:

$$m_c = m_H - m_6. \quad (9)$$

Скорость денатурации белков зависит от множества факторов, например температуры, и определяется аналогичным уравнением:

$$U_m = 0,5\kappa \cdot \exp\left(\frac{t-85}{9}\right). \quad (10)$$

Процесс денатурации белков можно выразить системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_6}{d\tau} = U_m \cdot m_c; \\ m_c = m_n - m_6; \\ U_m = 0,5\kappa \cdot \exp\left(\frac{t-85}{9}\right) \end{cases} \quad (11)$$

На основе использования методов нечетких множеств («Matlab Simulink») или методов случайного поиска можно построить математическую модель процесса денатурации белков и выполнить ее параметрическую идентификацию.

#### 11.4. Математическое моделирование процесса сушки, протекающего на уровне квазислоя высушиваемого материала

Для составления математического описания изменения температуры продукта рассмотрим тепловой баланс на элементарном слое высушиваемого материала. Разница между приходящим ( $Q_{ax}$ ) и уходящим ( $Q_{вых}$ ) теплом характеризуется скоростью накопления тепла в виде:

Скорость накопления тепла $Q_{общ}$	=	Приходящее тепло $Q_{ax}$	-	Уходящее тепло $Q_{вых}$
---	---	---------------------------------	---	--------------------------------

$$Q_{общ} = Q_{ax} - Q_{вых} \quad (12)$$

Здесь приход тепла для поверхностного слоя определяется по формуле:

$$Q_{ax} = \alpha \cdot F_s \cdot (t_a - t_k), \quad (13)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup> °С;  $F_s$  — площадь поверхности материала, м<sup>2</sup>;  $t_a$  — температура воздуха, °С;  $t_k$  — начальная температура изделия, °С.

Уходящее тепло из слоя выражается формулой:

$$Q_{вых} = -\frac{\lambda \cdot F_s}{h_k} (t_k - t_1), \quad (14)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $t_1$  — температура слоя, °С;  $t_k$  — толщина слоя, мм.

Подстановкой значений  $Q_{вх}$  и  $Q_{вых}$  в уравнение (12), после математических преобразований было получено описание для *определения температуры в слоях изделий*:

— для поверхностного слоя

$$\frac{dt_k}{d\tau} = \frac{\left[ \alpha \cdot F_S (t_k - t_{k-1}) - \frac{\lambda \cdot F_S}{\Delta h} (t_{k-1} - t_{i_{i-1}}) \right]}{m_k \cdot c_k} + \frac{G}{m} - t_{i_{i-1}} - \frac{G_i}{m c_k}; \quad (15)$$

— для срединных слоев

$$\frac{dt_{п.с.п.}}{d\tau} = \frac{\left[ \frac{\lambda \cdot F_S}{dh} (t_k - 2t_{i_{i-1}} + t_{2_{i-1}}) \right]}{m c} + \frac{G}{m} t_{i_{i-1}}; \quad (16)$$

— для последнего слоя

$$\frac{dt_{с.р.с.п.}}{d\tau} = \frac{\left[ \frac{\lambda \cdot F_S}{dh} (t_{i_1} - t_{s_{i-1}}) \right]}{m c} + \frac{G}{m} t_{i-1}. \quad (17)$$

Для построения математической модели *перемещения влаги* рассмотрен материальный баланс для элементарного слоя. Изменение массы влаги в верхнем квазислое определяется формулой:

$$\frac{dm_{вх}}{d\tau} = U_{вх}^1 - U_{вых}^1, \quad (18)$$

где  $U_{вх}$ ,  $U_{вых}$  — входящее и выходящее количество влаги в квазислое изделия. Количество влаги выражается формулами:

$$G_{вх} = -\beta \cdot F_S \cdot (x_{II} - x_p), \quad (19)$$

$$G_{вых} = K D_n \cdot (x_{II} - x_p), \quad (20)$$

где  $\beta$  — коэффициент массоотдачи, кг/м<sup>2</sup>·с;  $x_1$  — начальное значение безразмерного влагосодержания материала;  $x_2$  — безразмерная концентрация влаги в слое изделия;  $K D_n$  — коэффициент массообмена, кг/с, определяемый по формуле:

$$K D_n = \frac{F_S \cdot D \cdot \rho}{dh}, \quad (21)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  — плотность изделия, кг/м<sup>3</sup>;  $dh$  — толщина изделия, м.

Подставив уравнения (18–20) в (21), получим:

$$\frac{dm_{ax}}{d\tau} = (-\beta \cdot Fs \cdot (x_1 - x_p) + KDn(x_2 - x_1)). \quad (22)$$

При формировании математического описания последующих  $i$ -х слоев воспользуемся выражениями:

$$U'_{ax} = KDn \cdot (x_{i-1} - x_i); \quad (11.23)$$

$$U'_{оыx} = KDn \cdot (x_i - x_{i+1}). \quad (11.24)$$

где  $x_{i-1}$  — безразмерная концентрация влаги в верхнем слое;  $x_{i+1}$  — безразмерная концентрация влаги в  $(i+1)$ -ом слое;  $x_i$  — безразмерная концентрация  $i$ -го слоя.

Математическое описание представляет собой следующие дифференциальные уравнения:

— *распределение влаги на поверхности слоя*

$$\frac{dw_k}{d\tau} = \frac{(-\beta \cdot Fs \cdot (X_k - X_p) + KDn(X_1 - X_k))}{m_k} (1 - X_1^2); \quad (11.25)$$

— *распределение влаги в первом слое*

$$\frac{dw_1}{d\tau} = \frac{(-\beta \cdot Fs(X_1 - X_s) + KDn(X_2 - X_1))}{m} (1 - X_1^2); \quad (11.26)$$

— *распределение влаги в среднем слое*

$$\frac{dw_{cp.c1}}{d\tau} = \frac{(KDn(X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}))}{m} (1 - X_i^2); \quad (11.27)$$

— *распределение влаги в последнем внутреннем слое*

$$\frac{dw_{cp.c1}}{d\tau} = \frac{KDn(X_{i+1} - X_n)}{m} (1 - X_5^2). \quad (11.28)$$

В большинстве случаев достаточным условием расчета является определение средней влажности материала. Для этого можно воспользоваться математическим описанием классического вида.

Скорость процесса сушки определяется состоянием окружающей среды и условиями сушки. Полный поток влаги можно записать через объемный коэффициент массоотдачи:

$$\frac{d\mu}{d\tau} = j = \beta(x_r - x) = \beta(x^* - x), \quad (11.29)$$

где  $x_r$  — влагосодержание воздуха (кг/кг) на границе слоя, которое считается равновесным, то есть  $x_r = x^*$ ;  $x$  — влажность воздуха в объеме сплошной фазы.

Обе величины находятся по показаниям психрометра. Значения  $J$  потока влаги (%/мин<sup>-1</sup>) определяются по экспериментальным данным. При различных температурах, согласно классическим методам, можно найти величину  $\beta$ , используя соотношение:

$$\beta = \frac{J}{x^* - x}. \quad (30)$$

Коэффициент массоотдачи также зависит от скорости воздуха, температуры и других параметров материала  $\beta = f(v, t, \dots)$ .

### 11.5. Математическое моделирование процесса сушки, протекающего на уровне иерархии «твердая фаза, газовая фаза, нагреватель»

На третьем уровне иерархии объектами рассмотрения являются твердая фаза, газовая фаза и нагреватель. Здесь происходят процессы как в самой системе, так и во взаимосвязанных функциональных подсистемах.

**К вопросу математического моделирования процесса энергоподвода при сушке материалов.** Здесь рассматривается формализация математического описания энергоподвода, например, начиная с процесса проникновения ИК-лучей в слой продукта (нагрев продукта, распределение тепловой энергии).

Процесс нагрева продукта ИК-лучами отражается множеством теплофизических и терморadiационных характеристик. Действие ИК-лучей основано на поглощении ИК-излучения обрабатываемыми изделиями и превращении поглощенной лучистой энергии в тепло. В целом математическое описание процесса поглощения изделием лучистого потока имеет вид:

$$Q(h) = Q_0 \cdot \exp(-sh), \quad (31)$$

где  $S$  — коэффициент экстинкции лучей, 1/м;  $Q_0$  — энергия, сообщаемая облучаемому материалу;  $h$  — толщина.

Для СВЧ нагрева можно принимать  $Q = Q_0$ , то есть в заданных пределах энергия поглощается всем объемом высушиваемого материала.

К вопросу математического моделирования процесса на уровне твердой фазы. В твердой фазе происходит перемещение тепла и влаги. Для построения математического описания перемещения тепла рассмотрено дифференциальное уравнение теплового баланса для элементарного слоя образца продукта.

Уравнение теплового баланса процесса сушки материала с инфракрасными лучами можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{обш}} = dQ_m + dQ_{\text{исп}} + dQ_{\text{нов}}, \quad (32)$$

где  $dQ_m$  — энергия, затраченная на нагрев материала;  $dQ_{\text{исп}}$  — энергия, затраченная на испарение влаги;  $dQ_{\text{нов}}$  — энергия, обмена между поверхностью материала и окружающей средой.

Энергия, затраченная на нагрев материала, равна:

$$dQ_m = G_m \cdot c_m \cdot dt_m, \quad (33)$$

где  $G_m$  — масса облучаемого материала, кг/с;  $c_m$  — удельная теплоемкость материала, Дж/кг·К;  $dt_m$  — изменение температуры материала, К.

Энергия, поглощаемая поверхностью изделий за время, округляется как:

$$dQ_{\text{нов}} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_{\lambda} \cdot q_{\lambda} \cdot F \cdot dt. \quad (34)$$

Энергия, затраченная на испарение влаги,

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{исп}} \cdot I, \quad (35)$$

где  $G_{\text{исп}}$  — расход потока влаги;  $I$  — энтальпия пара/

После математической переработки вышеприведенных уравнений можно получить компьютерное отображение и построить алгоритмический блок расчета температуры высушиваемого материала. Он включает расчеты нагревания материала, изменение его температуры и теплоемкости, а также изменение энтальпии водяного пара.

К вопросу математического моделирования процесса на уровне газовой фазы. Аналогичным образом на основе теплового баланса газовой фазы можно получить компьютерную модель процесса теплоотдачи от газовой фазы к высушиваемому материалу

Тепловой процесс характеризуется теплообменом между газовой и твердой фазами и определяется по формуле:

$$Q = \alpha \cdot V \cdot (t_1 - t_2), \quad (36)$$

где  $\alpha$  — объемный коэффициент теплоотдачи. Он зависит от множества факторов:

$$\alpha = f(c_n, \lambda, v, \rho \dots). \quad (37)$$

При вводе исходных данных автоматически рассчитываются температура выходящей газовой фазы и энергия, передаваемая газовой фазой при ее охлаждении.

### 11.6. Компьютерное отображение межфазных взаимоотношений равновесного состояния по концентрации влаги в жидкой фазе

Для более точного расчета процесса сушки материалов предложено компьютерное отображение процесса перехода в равновесное состояние. Элементами двухфазной системы являются твердая и газовая фазы. Представляя эти фазы также системами, имеющими входные и выходные параметры, определяется их взаимовлияние по четырем основным факторам: температура в системе (в основном температура жидкой фазы) ( $t$ ); концентрация летучего компонента в жидкой фазе ( $x$ ); концентрация летучего компонента в газовой фазе ( $y$ ); давление в системе ( $P$ ).

В связи с этим движущая сила процесса [3] может быть охарактеризована комбинацией этих четырех факторов:

$$F(t, x, y, P) = 0, \quad (38)$$

При анализе процесса в открытой системе на состояние равновесия также будут влиять и другие факторы, в частности, разность температуры фаз и др. Ограничимся рассмотрением отображения процесса перехода системы в равновесное состояние, используя вышеперечисленные основные факторы. При расчете теплообмена необходимо применять их комбинации. В большинстве случаев для определения движущей силы процесса выявляется равновесное значение концентрации летучего компонента в жидкой фазе по его содержанию в газовой фазе, температуре жидкости и давлению в системе:

$$X = f(y, t, P) \quad (39)$$

В зависимости от величины этого параметра определяется движущая сила в виде разницы между действительной и равновесной концентрацией того компонента, который десорбируется или сорбируется:

$$\Delta x = x^{\circ} - x. \quad (40)$$

Из-за недостаточной точности аналитических способов равновесную концентрацию летучего компонента в жидкой фазе определяют экспериментальным путем. Предложено множество экспериментальных методов [1, 5]. В частности, с учетом парциального давления летучего компонента в газовой фазе:

$$x^* = f(t, P = f(y, P)) \quad (41)$$

Например, при сушке жидкости аммофоса [4], преобразовав уравнение температуры кипения, равновесную концентрацию летучего компонента можно отобразить в виде:

$$x^* = 0.6353 - 0.376t + 0.6594P^{0.378}, \quad (42)$$

где  $t \in 50 - 100$ .

С другой стороны, учитывая парциальное давление ( $P_y = y P_{общ}$ ) через концентрацию летучего компонента, которая в большинстве случаев характеризуется (как известно) соотношением числа молекул летучего компонента к общему количеству молекул газовой фазы:

$$y = \frac{N}{N_{общ}} \quad (43)$$

или из общезвестного уравнения:

$$y = \left( \frac{\frac{G_Y + G_{Oy}}{M_w}}{\frac{G_Y + G_{Oy}}{M_v} + \frac{G_w - G_{Oy}}{M_w}} \right) \quad (44)$$

получаем:

$$P = y P_{общ} = \left( \frac{\frac{G_Y + G_{Oy}}{M_w}}{\frac{G_Y + G_{Oy}}{M_v} + \frac{G_w - G_{Oy}}{M_w}} \right) P_{общ} \quad (45)$$

где  $G_Y$  — расход летучего компонента из жидкости;  $G_w$  — расход воздуха;  $M_w$  — молекулярная масса летучего компонента;  $M_v$  — молекулярная масса воздуха;  $G_{Oy}$  — расход летучего компонента в первичном воздухе.

Расход испаренного летучего компонента записывается в виде:

$$G_y = G_0 \left( 1 - \frac{x_0}{x} \right). \quad (46)$$

Тогда общий расход летучего компонента в газовой фазе выражается формулой:

$$G_w = G_{0y} + G_y. \quad (47)$$

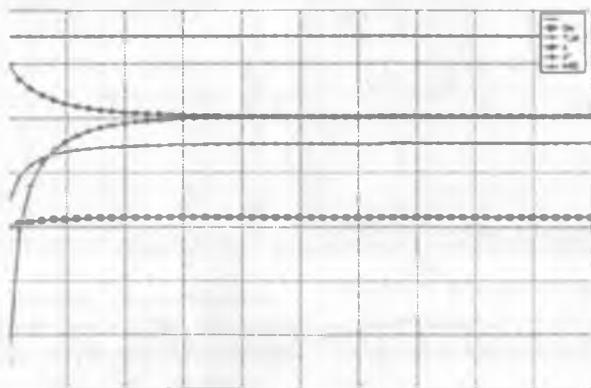
После формализации описания равновесной концентрации жидкости и имея ввиду ее действительное значение можно перейти к описаниям процесса массообмена в виде [6]:

$$\frac{dx}{d\tau} = \beta_x (x - x^*). \quad (48)$$

Таким образом, процесс перехода к равновесию в системе по концентрации летучего компонента в жидкости можно отобразить следующей системой математических описаний:

$$\left\{ \begin{array}{l} x^* = f(y, t, P) \\ P_y = y^* P_{\text{общ}} \\ t \rightarrow t(x) \\ y = f(G, G, R, M) \\ \frac{dx}{d\tau} = \beta_x (x - x^*) \end{array} \right. \quad (49)$$

Изотермический процесс перехода в равновесное состояние по концентрации влаги в высушиваемом материале имеет вид:



### 11.7. Математическое моделирование процесса сушки в рабочей камере аппарата

Компьютерная модель процесса сушки материала в рабочей камере аппарата формируется из компьютерных моделей процессов, протекающих в рассмотренных выше иерархических подсистемах.

Математическое описание процесса сушки материала, протекающего на уровне иерархии рабочей камеры, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dm_{Bi_k}}{d\tau} = U_{Bi} \cdot m_{Bi_{обм}}, \\ m_{Bi_{обм}} = m_{Bi_n} - m_{Bi_k}, \\ U_{Bi} = 0,3\kappa \cdot \exp\left(\frac{t-65}{9}\right), \end{cases} \quad (50)$$

$$\begin{cases} \frac{dm_G}{d\tau} = U_m \cdot m_c, \\ m_c = m_n - m_G, \\ U_m = 0,5\kappa \cdot \exp\left(\frac{t-85}{9}\right), \end{cases} \quad (51)$$

$$Q(h) = Q_0 \cdot \exp(-sh) \quad (52)$$

$$\frac{dt_k}{d\tau} = \frac{\left[ \alpha \cdot Fs \cdot (t_k - t_{k-1}) - \frac{\lambda \cdot Fs}{\Delta h} (t_{k-1} - t_{i-1}) + Q(h) \right]}{m_k \cdot c_k} + t_{0i-1} - G \cdot it \quad (53)$$

$$\frac{dt_{II.CII}}{d\tau} = \frac{\left[ \frac{\lambda \cdot Fs}{dh} (t_k - 2t_{j-1} + t_{2i-1}) \right]}{m \cdot c} + t_{j-1} \quad (54)$$

$$\frac{dt_{CP.CII}}{d\tau} = \frac{\left[ \frac{\lambda \cdot Fs}{dh} (t_i - t_{5i-1}) \right]}{m \cdot c} + t_{5i-1} \quad (55)$$

$$\frac{dw_k}{d\tau} = \frac{(-\beta \cdot Fs(X_k - X_p) + KDn(X_1 - X_k))}{m_k} \cdot (1 - X_1^2) \quad (56)$$

$$\frac{dw_1}{d\tau} = \frac{(-\beta \cdot Fs(X_1 - X_s) + KDn(X_2 - X_1))}{m} (1 - X_1^2) \quad (57)$$

$$\frac{dw_{с\text{ред}с\text{т}}}{d\tau} = \frac{(KDn(X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}))}{m} (1 - X_i^2) \quad (58)$$

$$\frac{dw_{ср.с\text{т}}}{d\tau} = \frac{KDn(X_{i+1} - X_n)}{m} (1 - X_5^2) \quad (59)$$

$$\begin{aligned} x^* &= f(y, t, P) & t &\rightarrow t_{ж} \\ P_y &= y^* P_{общ} & y &= f(G, G, R, M) \end{aligned} \quad (60)$$

Данное математическое описание можно применять при необходимости очень точных расчетов, требующих учета существенных изменений на уровне квазислоев и макромолекул. Для расчета процесса в обычных задачах, не требующих такого учета, общее математическое описание было упрощено. Путем агрегирования алгоритмических блоков был разработан алгоритм расчета (см. рис. 11.2).

Компьютерное отображение включает рассмотренные выше алгоритмические блоки. Углубляясь в систему, можно увидеть составляющие блоков компьютерной модели (см. рис. 11.3, 11.4).

**Пример расчета оптимального непрерывного теплоподвода при периодической сушке материала.** С помощью компьютерной модели осуществлен автоматизированный расчет процесса сушки материала и поиск оптимального теплоподвода — изменение мощности нагрева по времени (рис. 11.8).

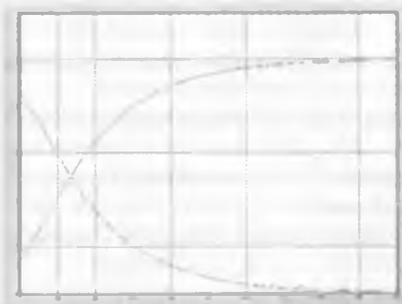


Рис. 11.8. Изменение по времени концентрации влаги (уменьшаемая кривая) и сухих веществ (возрастающая кривая) в материале

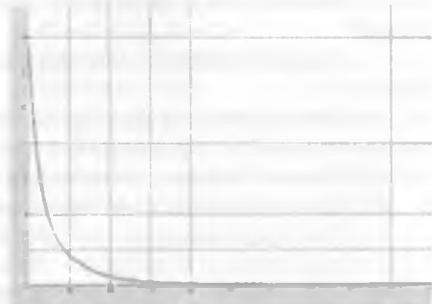


Рис. 11.9. Кривая оптимального теплоподвода — изменение мощности нагрева по времени

Как видно, концентрация влаги в материале по времени уменьшается криволинейно: с уменьшением влаги уменьшается испарение воды из высушиваемого материала, что требует уменьшения подачи тепловой энергии. Для поддержания заданной температуры высушиваемого материала требуется последовательное уменьшение подачи тепловой энергии по форме кривой, приведенной на рис. 11.9.

Компьютер также автоматически рассчитывает и другие параметры процесса сушки материала. Результаты поиска оптимальных условий при дискретной подаче энергии приведены в начале темы. На основе полученных результатов разработаны установка и технологическая линия сушки материалов.

*Ключевые слова:* сушка; компьютерная модель; квазислой; алгоритмический блок; влага; денатурация белков; фазы материала и газа; многоуровневая система; равновесное условие, коэффициент массообмена, конвективная сушка; критерий Нуссельта; оптимизации теплоподвода процесса сушки материала.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие алгоритмические блоки включает компьютерная модель сушки материала?
2. Какое математическое описание отражает свойства материала в математической модели технологического процесса?
3. Что такое равновесная температура?
4. Как составляется математическое описание процесса в квазислое?
5. Что такое рабочая камера?
6. Каковы результаты расчета изменения температуры сушки материала?
7. Как составляется математическое описание процесса в рабочей камере?
8. Как называется функция, описывающая оптимальный критерий технологического параметра?
9. Какие компромиссные задачи решаются для оптимизации процесса?
10. Как выбираются оптимальные условия?
11. Как представляется многоступенчатый анализ аппарата сушки?

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕМЕ 11**

1. Разъяснен многоступенчатый анализ сушки продуктов. При компьютерном моделировании последовательно формализованы математические описания и компьютерные модели процессов всех подсистем рассматриваемых уровней, в частности, процессов атомарно-молекуляр-

ного уровня, уровня квазислоев продукта, твердой и газовой фаз, рабочей камеры и аппарата.

2. Разъяснено понятие компьютерного отображения равновесного состояния в системе сушки продуктов. Используя блочный принцип пакета прикладной программы «Matlab», формализована общая компьютерная модель процесса сушки материала.

3. Показаны результаты экспериментов на компьютерной и физической моделях. Приведен характер изменения температуры, влажности материала, концентрации преобразованных атомарных молекулярных строений по продолжительности сушки продукта.

4. Разъяснена методика поиска оптимальных условий и выбора оптимальной технологической системы сушки продуктов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Артыков А.* Компьютерные методы анализа и синтеза химико-технологических систем. Электронный учебник. — Ташкент. ТКТИ. 2010.

2. *Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Дворецкий Д.С.* Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов. ТГТУ. 2003. 224 с.

3. *Френкс Р.* Математическое моделирование в химической технологии. — М.: «Химия». 1971.

4. *Артыков А.А.* Процессы и аппараты пищевых производств (математическое моделирование, теплообменные процессы, выпаривание). — Т.: «Укигвчи». 1983.

5. *Гартман Т.Н.* Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. — М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. 416 с.

6. *Рейнназарова З.Д., Артыков А.А.* Математическая модель процесса выпарки в рабочей зоне барботажного выпарного аппарата // Химическая промышленность. — Москва. 2008. Т. 85. № 6. С. 310–313.

7. *Жураев Хайрулло Файзиевич.* Дисс. д.т.н. — Ташкент. 2005.

8. *Чориев Абдусаттор.* Дисс. к.т.н. — Ташкент. 2005.

9. *Гинзбург А.С.* Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. — М.: «Агропромиздат». 1985. 336 с.

10. *Мухиддинов Д.Н.* Теоретические основы и разработка эффективных методов сушки хлопка-сырца и продуктов его переработки. Дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н. — Москва. МЭИ. 1986.

11. *Мухиддинов Д. Н., Нуриддинов Ш., Мурадов И., Хаджимуродова З.З.* Математическое моделирование процесса сушки масличных семян в фонтариюшем слое. // Вестник ТашГТУ. № 1, 2009. С. 32–34.

12. *Красников В. В.* Кондуктивная сушка. — М.: «Энергия». 1979. 288 с.

13. *Кретов И.Т., Шашкин А.И., Шахов С.В., Черных В.Б., Белозерцев А.С.* Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки пищевых продуктов в поле СВЧ. // Пищевая технология. 2003. № 5–6. С. 65–68.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

*Каримов И.А.* Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. — Т.: «Узбекистон». 2009. С. 56.

*Artikov A.* Multistage system analysis, modeling and automated calculation of the technological processes. Avicenna. Fryeburg. 2011. № 2. P 101–105.

*Артиков А.* К вопросу развития системного анализа на примере технологических объектов. <http://victor-safronov.narod.ru/systems-analysis/papers/to-question-of-systems-analysis-development.html>.

Chemical Engineering (Modeling, Simulation and Similitude) Tanase C. Dobre and Jose C. Sanchez Marcano, WILEY-VCH. 2007.

Integrated design and simulation of chemical processes (Computer – aided chemical engineering, 13). Elsevier. 2003.

Process modeling, Simulation, and Control for Chemical engineering, second edition, William L. Luyben, International Edition. 1996.

*Алиев Р.А., Алиев Р.Р.* Теория интеллектуальных систем. — Баку. 2001. 719 с.

*Артиков А., Акбаров А.Х., Рустамов Б.Т. и др.* Анализ и синтез процессов переработки томатов. — Т.: «Укитувчи». 1997.

*Артиков А., Маматкулов А.Х., Додаев К.О., Яхшимуродова Н.К.* Системный анализ концентрирования растворов инертным газом. — Т.: «Фан». 1987. 164 с.

*Артиков А., Остапенков А. М., Курбанов Дж. М., Саломов Х.Т.* Электрофизические методы воздействия на пищевые продукты. — Т.: «Фан». 1992.

*Артиков А.А.* Процессы и аппараты пищевых производств (математическое моделирование, теплообменные процессы, выпаривание). — Т.: «Фан». 1983.

*Артиков А., Маматкулов А.Х., Хамидов Н.И.* Анализ и синтез биотепломассообменных процессов — Т.: «Фан». 1994.

*Артиков А., Маматов И., Яхшимуродова.* Анализ воздействия активной воды при тепловой обработке продуктов питания. — Т.: «Фан». 1994.

*Бояринов А.И., Кафаров В.В.* Методы оптимизации в химической технологии. — М.: «Химия». 1975. 575 с.

*Гартман Т.Н.* Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. — М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. 416 с.

*Петровский В.С., Данилов А.Д.* Автоматизация технологических процессов. — Воронеж: ВГЛТА. 2010. 431 с.

*Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Дворецкий Д.С.* Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. — Тамбов. ТГТУ. 2003. 224 с.

*Закгейм А.Ю.* Введение в моделирование химико-технологических процессов. — М.: «Химия». 1982.

*Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. — М.: «Альянс». 2008. 751 с.

*Кафаров В. В., Дорохов. И. Н.* Системный анализ процессов химической технологии. — М.: «Наука». 1976. 500 с.

*Кафаров В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: «Химия». 1985. 448 с.

*Кафаров, В.В., Мешалкин В.П.* Анализ и синтез химико-технологических систем. Учебник для вузов. — М.: «Химия». 1991. 432 с.

Машины и аппараты пищевых производств. Учебник. для вузов. *С.П. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков.* Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. — М.: «Высшая школа. 2004. 1805 с.

*Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. — М.: «Наука». 1981. 490 с.

*Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. — Ленинград: «Химия». 1987. 510 с.

*Френкс Р.* Математическое моделирование в химической технологии. Перев. с англ. — М. «Химия». 1971.

*Юсупбеков Н.Р., Мухитдинов Д.Р. Базаров М.Б., Халилов А.Ж.* Бошқариш системаларини компьютерли моделлаштириш асослари. Учебное пособие. — Навои: «Navoiy Gold Servis». 2008. 391 с.

## ДИССЕРТАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

### Диссертации докторов наук

*Сафаров Адил Файзуллаевич.* Дисс. д.т.н. Москва. 1992.

*Курбанов Жамшид Мажидович.* Дисс. д.т.н. Москва. 1993.

*Маматкулов Абдукодир Хамиджанович.* Дисс. д.т.н. Ташкент. 1994.

*Маматов Иломон.* Дисс. д.т.н. Ташкент. 2000.

*Хамидов Неъматилло Ибрагимович.* Дисс. д.т.н. Санкт-Петербург. 1996.

*Данилов Александр Дмитриевич.* Дисс. д.т.н. Воронеж. 2004.

*Жураев Хайрулло Файзиевич.* Дисс. д.т.н. Ташкент. 2005.

*Додаев Кучкор Одилевич.* Дисс. д.т.н. Ташкент. 2006.

*Беляева Марина Александровна.* Дисс. д.т.н. Москва. 2010.

## Диссертации кандидатов наук

- Юнусов Исмат Иногамович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1973.  
*Мусаев Анвар Камалович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1974.  
*Маматкулов Абдуқодир Хамиджанович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1984.  
*Худойбердиев Абсалом Абдурашулович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1985.  
*Яхшимурадова Нурия Комиловна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1985.  
*Додаев Кучкор Одилевич.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1985.  
*Шомуродов Тахир Шомуродович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1988.  
*Носиров Хондамир Эркинович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1989.  
*Ахмедбаева Хосила Саидвалиевна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1989.  
*Данилов Александр Дмитриевич.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1989.  
*Шомуродова Дилшода Маликовна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1990.  
*Кодирова Раъно Халиковна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1990.  
*Усманов Ахтам Усманович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1990.  
*Мехмонов Илхом Исломович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1991.  
*Жураев Хайрулло Файзиевич.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1991.  
*Нарзиев Мирзо Саидович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1992.  
*Беляева Марина Александровна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1993.  
*Бабаяров Равшан Атабекович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1993.  
*Жумаев Тура Рамазонович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1993.  
*Жумаев Каюм Каримович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1994.  
*Гафуров Карим Хакимович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1994.  
*Парпиев Нодир Нусратович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1994.  
*Корабев Дилшод Темурович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1994.  
*Умарова Ранохон Алихановна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1994.  
*Акбаров Атахамжон Хасанович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 1997.  
*Халманбетов Дыйканбек Кадыевич.* Дисс. к.т.н. Тараз. 1998.  
*Абдурахмонов Олим Рустамович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2000.  
*Сафарова Шахида Адъловна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2003.  
*Рустамов Ботир Турдиевич.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2003.  
*Атауллаев Шерзод Набиуллаевич.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2005.  
*Чориев Абдусаттор.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2005.  
*Кодиров Шерали.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2008.  
*Акромов Одил.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2008.  
*Хамидов Баходир Тажитдинович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2008.  
*Маматкулов Олимхон Абдукадырович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2009.  
*Саидмуродов Ектам Азимович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2010.  
*Рейдназарова Зинахон Давлетназаровна.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2010.  
*Хамдамов Анвар Махмудович.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2010.  
*Жохонгир Хикматович Хасанов.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2010.  
*Норинбоев Б.Г.* Дисс. к.т.н. Ташкент. 2012.

## СОДЕРЖАНИЕ

От автора .....	3
<b>Тема 1. Введение</b> .....	4
1.1. Роль и значение дисциплины .....	4
1.2. Цель и задачи изучения дисциплины .....	6
1.3. Требования к знаниям магистров .....	6
1.4. Знания необходимые для изучения дисциплины .....	7
<b>Тема 2. Многоступенчатый метод анализа систем</b> .....	8
2.1. Интересный пример .....	9
2.2. Основные понятия .....	11
2.3. Введение в многоступенчатый анализ системы .....	11
2.4. Состояние проблемы .....	12
2.5. Многоступенчатый анализ системы .....	13
2.6. Интересные примеры .....	14
<b>Тема 3. К вопросу моделирования технологических процессов систем</b> .....	19
3.1. Основные понятия .....	19
3.2. Требования предъявляемые к моделированию .....	21
3.3. Способы математического и компьютерного моделирования процессов и систем .....	22
3.4. Многоступенчатый подход к формализации компьютерной модели .....	24
3.5. К вопросу синтеза оптимальной системы .....	26
<b>Тема 4. Экспериментально-статистическое отображение процессов и явлений</b> .....	28
4.1. Интересный пример .....	28
4.2. Основные понятия .....	30
4.3. О формализации статистических моделей процессов технологических систем .....	31
4.4. Интересные примеры по определению эмпирических уравнений .....	33
4.5. О планировании эксперимента .....	33
<b>Тема 5. Применение нейронной сети в моделировании и расчете процессов и систем</b> .....	37
5.1. Интересный пример. Компьютерное выражение равного условия в системе «жидкость—пар» с помощью нейронной сети .....	38
5.2. Введение в нейронные сети .....	40
5.3. История нейронных сетей .....	41
5.4. Устройство нейронных сетей .....	43

5.5. Функции активации .....	43
5.6. Обучение многослойной сети .....	44
5.7. Обратное распространение ошибки .....	45
5.8. Способы обеспечения и ускорения сходимости .....	46
5.9. Интересный пример .....	48
<b>Тема 6. Анализ, моделирование механических процессов и синтез оптимальных условий .....</b>	<b>51</b>
6.1. Интересный пример .....	51
6.2. Об определении квазиаппаратов по динамической структуре потоков материалов, энергии или в целом по информации .....	53
6.3. Интересный пример .....	55
6.4. О моделировании процесса перемешивания в жидких средах .....	56
6.5. Анализ системы, моделирование процесса, синтез оптимальных условий процесса измельчения материалов ....	59
<b>Тема 7. Анализ, моделирование и синтез оптимальных тепловых процессов и систем .....</b>	<b>66</b>
7.1. Интересный пример. Моделирование и расчет процессов в рабочей зоне теплообменника .....	66
7.2. Процессы в теплообменниках .....	68
7.3. Многоступенчатый анализ теплообменника .....	69
7.4. Математическое описание элементарного процесса в регулирующем органе .....	71
7.5. Математическое описание процесса теплообмена при идеальном смешении .....	71
7.6. Математическое описание процессов в паровом пространстве греющей камеры .....	72
7.7. Математическое описание процессов в стенке и нагаре .....	76
7.8. Моделирование процессов в рабочей зоне теплообменника. Примеры синтеза оптимального теплообменника .....	77
<b>Тема 8. Анализ, моделирование и расчет процесса выпарки жидкостей .....</b>	<b>82</b>
8.1. Интересный пример. Анализ моделировании и расчет процесса выпаривания жидкостей .....	82
8.2. Синтез системы барботажного выпаривания жидкости .....	85
8.3. Компьютерное отображение алгоритма расчета температуры жидкой фазы, теплоемкости пульпы и энтальпии водяного пара .....	93
8.4. Пример расчета. Синтез оптимальной системы выпаривания в БВА .....	95

<b>Тема 9. Анализ, моделирование и синтез массообменных систем на примере экстракции маслячного материала</b> .....	99
9.1. Многоступенчатый анализ системы экстракции в системе «твердое тело—жидкость» .....	100
9.2. Математическое описание процесса на уровне квазислой частицы экстрагируемого материала .....	103
9.3. Математическое описание процесса на уровне частицы экстрагируемого материала .....	107
9.4. Компьютерная модель процесса экстракции в рабочей камере установки .....	109
9.5. Пример исследований экстракции с помощью компьютерной модели .....	110
<b>Тема 10. Анализ и синтез системы тепломассообмена на примере дистилляции жидкости</b> .....	114
10.1. Анализ и синтез системы перегонки инертным газом .....	115
10.1.1. Системный анализ установки дистилляции/дезодорации хлопкового масла .....	115
10.1.2. Математическое моделирование процесса удаления летучих компонентов из мисцеллы растительного масла .....	118
10.1.3. Математическое описание процесса в фазах .....	120
10.1.4. Математическое описание процесса переноса между фазами .....	124
10.1.5. Математическая модель процесса в одной тарелке .....	125
10.1.6. Математическое описание процесса в рабочей зоне аппарата .....	127
<b>Тема 11. Анализ и синтез системы сушки материалов</b> .....	132
11.1. Интересный пример .....	133
11.2. Многоступенчатый системный анализ системы сушки материалов .....	137
11.3. Математическое моделирование процессов в системе макромолекул .....	139
11.4. Математическое моделирование процесса сушки, протекающего на уровне квазислой высушиваемого материала .....	142
11.5. Математическое моделирование процесса сушки, протекающего на уровне иерархии «твердая фаза, газовая фаза, нагреватель» .....	145
11.6. Компьютерное отображение межфазных взаимоотношений равновесного состояния по концентрации влаги в жидкой фазе .....	147
11.7. Математическое моделирование процесса сушки в рабочей камере аппарата .....	150
Рекомендуемая литература .....	154

АСКАР АРТИКОВ

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ  
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА  
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

*Учебник для магистрантов  
технологических специальностей*

Издательство «VORIS-NASHRIYOT»  
Ташкент — 2012

Редактор *Г. Полещикова*  
Худ. редакторы *Б. Ибрагимов, Ж. Гурова*

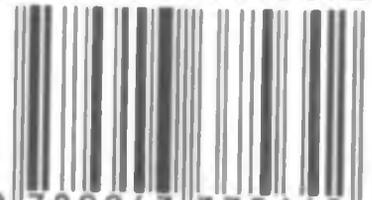
Издательская лицензия АІ № 195 от 28.08.2011.  
Подписано в печать с оригинала-макета 05.09.2012.  
Формат 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Кегль 10 н/шп. Гарнитура «Times».  
Печать офсетная. Печ. л. 10,0. Изд. л. 9,3. Тираж 500.  
Заказ № 514.

Издательство «VORIS-NASHRIYOT». Ташкент, ул. Навои, 30.

Отпечатано в ДП «Niso Poligraf». Ташкент, ул. Х. Байкаро, д. 41.

**Voris**  
NASHRIYOT

ISBN 978-9943-375-64-2



9 789943 375642