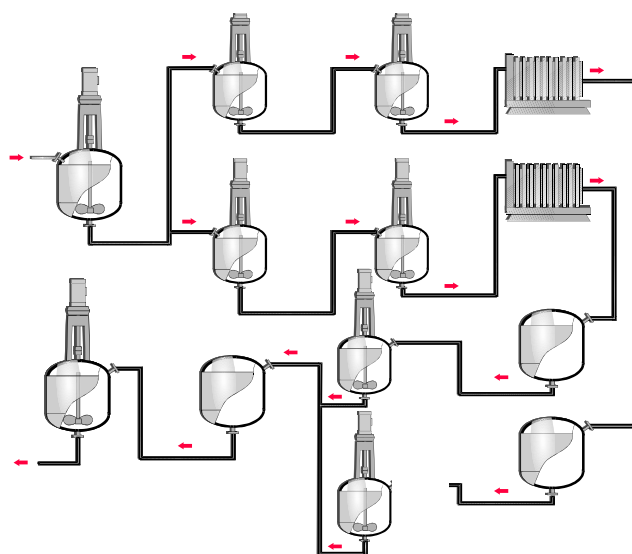


С.В. Карпушкин

# ВЫБОР АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ МНОГОАС- СОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ



МОСКВА  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"  
2006

С.В. Карпушкин

# ВЫБОР АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ МНОГОАС- СОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

---

МОСКВА  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"  
2006

УДК 66.001.2:65.011  
ББК Л11-5  
К26

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор  
А.Ф. Егоров

Доктор технических наук, профессор  
С.И. Дворецкий

Карпушкин С.В.  
К26 Выбор аппаратного оформления многоассортиментных химических производств. – М. : "Издательство Машиностроение-1", 2006. – 140 с.

Предложена методика определения аппаратного оформления химико-технологических систем многоассортиментных производств, широко распространенных в промышленности органического синтеза: рассмотрены основные особенности функционирования реальных химико-технологических систем; сформулированы задачи определения характеристик режима их работы и аппаратного оформления стадий с оборудованием различных типов; представлены условия разрешимости задач, методы и алгоритмы их решения.

Предназначена для специалистов, занимающихся расчетами техно-

логического оборудования многоассортиментных химических производств, моделированием и оптимизацией процессов принятия проектных решений в данной области, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 66.001.2:65.011  
ББК Л11-5

ISBN 5-94275-262-1

© Карпушкин С.В., 2006  
© "Издательство Машиностроение-1",  
2006

Научное издание

КАРПУШКИН Сергей Викторович

## ВЫБОР АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Монография

Редактор З.Г. Чернова  
Компьютерное макетирование Е.В. Кораблевой

Подписано к печати 20.04.2006.

Формат 60×84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем: 8,14 усл. печ. л.; 8,05 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 222<sup>М</sup>

"Издательство Машиностроение-1", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Проблема определения аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментных химических производств .....	7
1.1. Место и содержание определения АО ХТС .....	8
1.1.1. Этап разработки ХТС .....	8
1.1.2. Этап определения АО ХТС производства .....	11
1.1.3. Этапы компоновочных расчетов, составления расписания работы ХТС, утилизации отходов производства .....	14
1.2. Особенности функционирования оборудования ХТС МХП .....	16
1.2.1. Порядок определения продолжительностей реализации стадий выпуска продукта .....	17
1.2.2. Варианты организации совместной работы стадий ХТС с различными основными аппаратами .....	19
1.2.3. Организация переработки партий продукта на стадиях с несколькими основными аппаратами .....	23
1.2.4. Изменения размера партии продукта в ходе ее переработки на стадиях ХТС .....	24
1.3. Постановки и методы решения задач определения АО ХТС МХП .....	30
1.3.1. Постановки задачи определения АО ХТС при упрощенном представлении режима его работы .....	30
1.3.2. Постановки задачи определения АО ХТС в условиях неопределенности значений некоторых параметров .....	36
1.3.3. Постановки задач оптимизации режима функционирования ХТС периодического действия ... ..	39
1.3.4. Методы решения задач определения АО и режима функционирования ХТС периодического действия .....	47
2. Постановки задач определения аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментных химических производств .....	56
2.1. Предпосылки разработки математических постановок задач определения АО ХТС МХП .....	56
2.1.1. Допущения, принятые при постановке задач определения АО ХТС МХП .....	56
2.1.2. Исходные данные и результаты решения задач определения АО ХТС МХП .....	60
2.2. Постановка задачи выбора режима функционирования ХТС МХП .....	66
2.2.1. Соотношения для определения характеристик режима функционирования ХТС .....	66
2.2.2. Условия синхронизации циклов работы аппаратов стадий ХТС .....	70
2.2.3. Критерий оптимизации режима функционирования АО ХТС МХП .....	73
2.3. Постановки задач выбора оборудования стадий ХТС МХП .....	77
2.3.1. Соотношения для выбора основной аппаратуры стадий ХТС МХП .....	77
2.3.2. Выбор вспомогательной аппаратуры стадий ХТС МХП .....	80
2.3.3. Критерий оптимальности аппаратурного оформления стадии ХТС .....	83

3. Методы решения задач определения аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментных химических производств .....	88
3.1. Необходимые условия существования решений задач определения АО ХТС МХП .....	89
3.1.1. Условие существования диапазонов допустимых значений размеров партий продуктов ХТС .....	90
3.1.2. Условие существования допустимых вариантов АО стадий ХТС .....	95
3.1.3. Условие обеспечения требуемой производительности ХТС .....	99
3.2. Алгоритмы решения задач определения АО ХТС МХП .....	102
3.2.1. Алгоритм решения задачи определения характеристик режима функционирования ХТС .....	103
3.2.2. Алгоритм решения задач определения АО стадий ХТС .....	108
3.3. Методика определения АО ХТС проектируемого МХП .....	113
3.3.1. Схема улучшения базового варианта АО ХТС ....	116
3.3.2. Примеры определения АО ХТС реальных МХП ....	120
Заключение .....	129
Список литературы .....	130

## ВВЕДЕНИЕ

Ключевой проблемой разработки нового производства и обновления существующего с целью изменения номенклатуры и объемов выпуска продуктов, а также реализации усовершенствованных (энергосберегающих, экологически безопасных) технологий, является определение аппаратурного оформления (АО) входящих в его состав химико-технологических систем (ХТС), т.е. типов, числа, геометрических размеров и характеристик режима функционирования основных и вспомогательных аппаратов каждой системы. При решении этой проблемы приходится иметь дело с множеством разнообразных прикладных задач, связанных с определением оптимальных конструкционных и режимных параметров единиц производственного оборудования. Самый широкий комплекс задач приходится решать при определении аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств (МХП), примерами которых могут служить производства химических красителей и полупродуктов, добавок к полимерным материалам, фармацевтических препаратов, кино-фотоматериалов, химических реактивов. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- широкой номенклатурой выпускаемой продукции при небольших объемах (до 1000 т/год) и коротких сроках выпуска большинства ее марок, частыми изменениями ассортимента и объемов выпускаемых продуктов;
- большим разнообразием видов технологических процессов, способов их организации и осуществления, типов технологического оборудования, характерных для химической промышленности;
- преимущественно периодическим режимом работы ХТС этих производств (продукты выпускаются отдельными партиями, которые последовательно проходят все стадии переработки), при этом для реализации отдельных стадий часто используются аппараты непрерывного действия, работающие в квазинепрерывном режиме;
- формированием АО ХТС как совокупности обособленных аппаратурных стадий – установок, предназначенных для реализации физико-химических стадий процессов получения продуктов, которые предусмотрены технологическими регламентами (подготовка сырья, химические превращения, выделение продуктов и т.д.);
- неодинаковой степенью загрузки технологического оборудования в различные периоды его работы.

Заметим, что в той или иной степени указанные особенности характерны для подавляющего большинства производств основной химии и органического синтеза, так как кроме основной продукции все они выпускают отходы, утилизация которых требует создания специальных ХТС и обеспечения их функционирования. Другими словами, практически любое химическое предприятие можно рассматривать как многоассортиментное: целевые продукты поступают на рынок и обеспечивают прибыль, а отходы преобразуются в сырье для других производств или утилизируются в экологически безопасное состояние, что увеличивает издержки и снижает прибыль.

Согласно принятой в последние годы классификации, среди производств, для которых характерен периодический способ реализации технологических процессов, широкий ассортимент продуктов и небольшие объемы их выпуска, выделяют следующие группы технологических систем [1 – 4]:

- однопродуктовые, предназначенные для выпуска единственного продукта;
- многопродуктовые, ориентированные на последовательный выпуск нескольких продуктов, причем число задействованных аппаратурных стадий и структура материальных потоков при выпуске разных продуктов могут быть неодинаковыми;
- многоцелевые, способные выпускать несколько продуктов одновременно, причем маршруты следования разных партий одного и того же продукта по стадиям ХТС могут быть различными.

Однопродуктовые ХТС являются частным случаем многопродуктовых. Многоцелевые не нашли широкого применения в МХП по причинам сложности технологии выпуска продуктов и необходимости тщательной очистки оборудования при переходах с выпуска одного продукта на другой. Предметом рассмотрения в предлагаемой работе являются многопродуктовые ХТС как наиболее распространенный способ организации выпуска продукции МХП [3 – 7].

Целью предлагаемой работы является развитие теории и методов автоматизации определения АО ХТС и характеристик режима его функционирования при разработке проекта нового производства.

## 1. ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Процесс проектирования МХП складывается из трех основных стадий [5 – 7]: маркетинговые исследования (технико-экономическое обоснование), разработка проекта, разработка рабочей документации. В ходе маркетинговых исследований определяются ассортимент и объемы выпуска продуктов, обосновывается способ их производства. При решении этих вопросов принимаются во внимание следующие обстоятельства:

- ситуация на рынке сбыта подобной продукции, наличие заказов на продукцию проектируемого производства, предполагаемые сроки ее поставок;
- доступность сырья, т.е. оценка затрат на его закупку и доставку или на собственное производство;
- доступность регламентов выпуска продуктов, возможности их собственной разработки;
- возможности приобретения необходимого оборудования, использования имеющегося;
- вопросы размещения проектируемого производства (строительства новых или использования имеющихся производственных помещений).

Проект производства включает технологические расчеты, общеинженерную часть и технико-экономические расчеты. В ходе технологических расчетов определяется число и структура ХТС, парк технологического оборудования и его компоновка, календарный план работы производства, нормы расхода сырья и энергии, способы утилизации отходов. Общеинженерная часть проекта включает транспортное обеспечение производства, организацию строительных работ, организацию труда и технику безопасности, систему управления производством. Результатами технико-экономических расчетов являются калькуляции себестоимости готовых продуктов, сметы на приобретение оборудования и сырья, строительные работы.

Рабочая документация – это документы, согласно которым ведется монтаж ХТС производства (включая строительство производственных зданий). В ее состав входят:

- технологические схемы с нанесенным оборудованием, трубопроводами, средствами КИПиА;
- планы и разрезы сооружений с привязкой транспортного и энергетического оборудования;
- материалы по регламентам проведения всех видов работ, связанных с производством продукции;
- пусковая инструкция.

Наиболее важным и ответственным этапом стадии разработки проекта и процесса проектирования в целом являются технологические расчеты. От качества проектных решений, принятых при их выполнении, во многом зависит эффективность функционирования проектируемого производства.

Определим место и содержание определения АО ХТС в процессе выполнения технологических расчетов для проектируемого МХП.

### 1.1. МЕСТО И СОДЕРЖАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АО ХТС

Исследования технологических расчетов методами системного анализа [8 – 11] привели нас к следующему представлению о содержании и взаимосвязях их основных этапов, см. рис. 1.1. Координирующий сигнал  $K_{TR}$  включает основные исходные данные для выполнения технологических расчетов: наименования продуктов и рекомендуемые производительности по каждому из них (месячные, квартальные или годовые объемы выпуска), технологические регламенты синтеза продуктов. Информационный сигнал  $I_{TR}$  содержит результаты выполнения всех этапов технологических расчетов: число ХТС производства, ассортименты и объемы выпуска их продукции за указанный период, аппаратурное оформление каждой ХТС, решения по компоновке оборудования в производственном помещении и трассировке технологических трубопроводов, календарный план работы ХТС производства, график планово-предупредительных ремонтов (ППР) оборудования, расходные нормы и графики потребления сырья и энергоресурсов, графики образования отходов производства и сведения о числе, аппаратурном оформлении и режиме функционирования ХТС, осуществляющих утилизацию отходов.

Рассмотрим содержание этапов технологических расчетов на стадии разработки проекта МХП и связи между ними.

#### 1.1.1. Этап разработки ХТС

Первым этапом технологических расчетов является разработка ХТС. Исходные данные для его выполнения (координирующий сигнал  $K_{TS}$ ) включают: наименования продуктов, планируемые объемы их выпуска за указанный период, наименования стадий синтеза каждого продукта и рекомендации по типу и исполнению основных аппаратов, пригодных для реализации стадий.

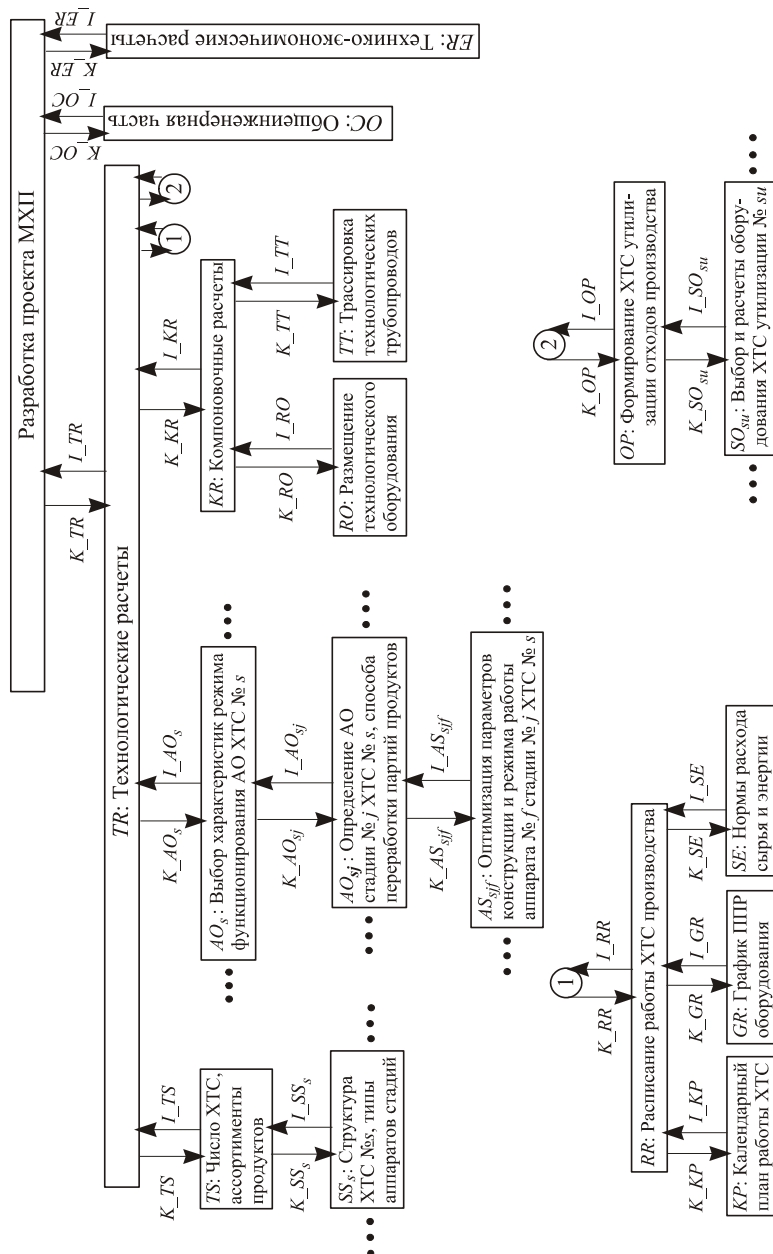


Рис. 1.1. Системное представление процесса разработки проекта МХП

На верхнем уровне решается задача TS разделения ассортимента продукции производства на группы, каждая из которых будет производиться отдельной ХТС. Целью ее решения является обеспечение выпуска всех продуктов в указанных объемах с помощью минимального числа ХТС, причем не исключается возможность выпуска одних и тех же продуктов разными ХТС. Основные ограничения задачи TS:

- сходство технологий выпуска продуктов каждой ХТС (число стадий синтеза и требования к основной аппаратуре для их реализации);
- близость значений суммарных производительностей различных ХТС (для обеспечения минимального разброса размеров однотипных основных аппаратов);
- совместимость цветов продуктов ХТС (актуально для синтетических красителей).

В практике проектирования МХП для решения вопросов определения числа ХТС производства и ассортимента продукции каждой из них чаще всего привлекаются эксперты (опытные технологи). Подходы к постановке и решению задачи TS представлены в [3, 12 – 14].

Координирующий сигнал  $K_{SS_s}$  с верхнего уровня к каждой конкретной ХТС (№ s) включает ассортимент ее продуктов, наименования стадий их синтеза, указания по типам и исполнениям основных и вспомогательных аппаратов стадий, перечень технологических операций каждой стадии и материальные индексы операций (объем или масса веществ, перерабатываемых в ходе операций согласно регламенту). Для каждой ХТС решается задача  $SS_s$  определения числа аппаратных стадий, типов и исполнений основных и вспомогательных аппаратов каждой стадии, структуры материальных потоков при выпуске каждого продукта. Целью решения этой задачи является обеспечение возможности реализации всех стадий синтеза продуктов ХТС № s с помощью минимального числа аппаратных стадий. Основные ограничения:

- соответствие типа и исполнения основного и вспомогательного оборудования каждой аппаратной стадии требованиям к аппаратам для реализации соответствующих стадий синтеза продуктов;

– доступность основных и вспомогательных аппаратов, необходимых для оснащения аппаратурных стадий ХТС.

Вопросы автоматизации определения типов и исполнений аппаратов стадий ХТС МХП, числа задействованных аппаратурных стадий и структуры материальных потоков при выпуске каждого продукта рассмотрены в работах [2, 3, 13, 15 – 18].

По результатам решения задачи  $SS_s$  дополнительно определяются материальные индексы аппаратурных стадий по продуктам – объем или масса веществ, которые необходимо переработать на стадии для получения единицы массы (1 т) каждого продукта.

На верхнем уровне осуществляется анализ содержания информационных сигналов  $I_{SS_s}$  от каждой ХТС (число аппаратурных стадий, число продуктов, партии которых обрабатываются на каждой аппаратурной стадии, типы основных и вспомогательных аппаратов стадий, соотношение материальных индексов продуктов на стадиях), который может привести к выводу о необходимости изменения числа ХТС или ассортимента их продукции и повторного решения задач  $SS_s$ . Информационный сигнал  $I_{TS}$  – это объединение сигналов  $I_{SS_s}$  для всех ХТС производства, формирование которых признано целесообразным.

### 1.1.2. Этап определения АО ХТС производства

На этом этапе определяются характеристики режима функционирования оборудования каждой из ХТС (№ s), выбираются определяющие размеры и число основных и вспомогательных аппаратов каждой стадии системы (№ j), способ переработки партий продуктов на стадиях, осуществляется поиск оптимальных параметров конструкции и режима функционирования каждого основного и вспомогательного аппарата (№ f) каждой стадии.

К числу основных характеристик режима функционирования АО каждой конкретной ХТС при выпуске каждого продукта относятся [1, 2, 4, 13, 19 – 22]:

- размер партии продукта, т.е. масса его партии, прошедшей все стадии переработки;
- длительность цикла работы ХТС, т.е. промежуток времени между моментами начала или окончания процесса переработки двух партий продукта, нарабатываемых одна за другой.

Для определения значения длительности цикла работы ХТС необходимо составить пооперационное расписание циклов переработки партий продукта на стадиях ХТС (определить моменты начала и окончания всех операций циклов работы основных аппаратов всех ее стадий) и рассчитать продолжительности периодов переработки партий продукта на стадиях (промежутков времени между моментами начала первой и окончания последней операции).

Координирующий сигнал  $K_{AO_s}$  включает наименования и объемы выпуска продуктов ХТС № s за указанный период, число ее аппаратурных стадий и маршруты следования партий продуктов по стадиям, типы и исполнения аппаратов стадий (основных и вспомогательных), материальные индексы стадий по продуктам и данные регламентов выпуска продуктов: длительности операций, реализуемых на стадиях или (и) удельные производительности основных аппаратов, диапазоны допустимых значений степени заполнения емкостных аппаратов.

Задача  $AO_s$  – это задача выбора значений размеров партий продуктов и составления пооперационного расписания циклов их переработки аппаратами всех стадий ХТС, обеспечивающих плановую производительность системы по каждому продукту при минимальных затратах на основные виды потребляемых энергоресурсов. Основные ограничения:

- соотношения для определения длительностей, а также моментов начала и окончания всех операций цикла работы аппаратов каждой стадии ХТС при выпуске каждого продукта;
- соотношения для расчета продолжительностей периодов переработки партий продуктов на стадиях ХТС, длительностей циклов работы ХТС при выпуске продуктов, продолжительностей выпуска продуктов;
- ограничения на изменение значений размеров партий продуктов;
- ограничение на сумму продолжительностей выпуска всех продуктов.

Координирующий сигнал  $K_{AO_{sj}}$  содержит все данные сигнала  $K_{AO_s}$ , относящиеся к стадии № j ХТС, а также значения продолжительностей периодов переработки партий продуктов на этой стадии, множества определяющих геометрических размеров аппаратов (основных и вспомогательных), подходящих для ее оснащения, размеры партий и длительности циклов работы ХТС по продуктам. Задача  $AO_{sj}$  – это задача выбора числа и определяющих геометрических размеров основных и вспомогательных аппаратов для стадии № j, а также способа переработки партий продуктов на этой стадии (целиком, равными долями параллельно или последовательно, с объединением нескольких партий). Критерием оптимальности решения задачи  $AO_{sj}$  являются минимальные капитальные затраты на технологическое оборудование стадии, а к числу основных ограничений относятся:

- принадлежность определяющих размеров основных и вспомогательных аппаратов стадии множествам размеров доступных аппаратов выбранного типа (имеющихся на производстве и поставляемых по договорам);
- условия выбора определяющих геометрических размеров основных и вспомогательных аппаратов стадий ХТС;
- соотношения для определения числа основных и вспомогательных аппаратов стадий ХТС.

Заметим, что для решения задачи  $AO_s$  необходимы данные, являющиеся результатами решения задач  $AO_{sj}$  (число основных аппаратов стадий ХТС, способы переработки партий продуктов на стадиях, определяющие



размеры основных аппаратов некоторых стадий), значения которых вначале прогнозируются, а затем уточняются в результате итерационного процесса решения задачи  $AO_s$  и задач  $AO_{sj}$ .

Координирующий сигнал  $K_{AS_{sif}}$  включает исходную информацию для решения задачи  $AS_{sif}$  оптимизации параметров конструкции и режима функционирования аппарата №  $f$  стадии №  $j$  ХТС №  $s$  (основного или вспомогательного). Сигнал  $K_{AS_{sif}}$  содержит тип аппарата, определяющий геометрический размер, перечень реализуемых операций (возможно, различных при выпуске разных продуктов), их регламентные длительности и материальные балансы, рекомендации по режиму реализации операций (температура, давление, гидродинамическая обстановка), физико-химические характеристики рабочих сред, виды тепло-хладагентов, а также перечень составных частей аппарата, подлежащих механическому расчету, материалы, из которых они изготовлены, и способы их соединения. Задачи  $AS_{sif}$  подразделяются на задачи технологического и механического расчета аппарата.

В ходе технологического расчета уточняется определяющий размер аппарата (рабочий объем, рабочая поверхность) и выбирается оптимальный режим реализации операций рабочего цикла при выпуске всех продуктов. В качестве критерия оптимальности здесь могут быть использованы максимум выхода целевого продукта, минимум энергозатрат, минимальная длительность операции, минимальный рабочий размер аппарата при необходимом уровне эффективности. Основные ограничения – соотношения математических моделей операций, реализуемых при выпуске каждого продукта. В результате решения этих задач могут быть уточнены регламентные значения материальных индексов стадий выпуска продуктов и длительностей операций переработки партий продуктов на стадиях, что может потребовать повторного решения задач  $AO_{sj}$  и задачи  $AO_s$ .

Механический расчет основного или вспомогательного аппарата №  $f$  стадии №  $j$  – это определение геометрических размеров элементов аппаратов (толщин стенок, диаметров валов), обеспечивающих выполнение условий их прочности, устойчивости, жесткости и других условий при реализации всех операций на этой стадии в процессе выпуска каждого продукта. Критерий оптимальности решения этой задачи – минимальная материалоемкость составных частей аппарата. Для стандартных аппаратов выполняются поверочные механические расчеты.

Информационный сигнал  $I_{AS_{sif}}$  включает уточненный определяющий размер аппарата №  $f$  стадии №  $j$ , уточненные характеристики режима реализации операций при выпуске каждого продукта: материальные балансы, длительности, температурный режим, давление и кинетические характеристики, а также геометрические размеры составных частей аппаратов, обеспечивающие выполнение условий их прочности, устойчивости и др. (для стандартных аппаратов – сведения о выполнении или невыполнении этих условий при фиксированных размерах составных частей).

Информационный сигнал  $I_{AO_{sj}}$  включает значения числа и определяющих геометрических размеров основных и вспомогательных аппаратов стадии №  $j$  ХТС и указателей способов переработки партий продуктов аппаратами стадии. Информационный сигнал  $I_{AO_s}$  – данные об аппаратурном оформлении всех стадий системы и пооперационном расписании циклов переработки партий всех продуктов аппаратами всех стадий ХТС, а также рассчитанные на его основе значения продолжительностей периодов переработки партий продуктов на стадиях и длительностей циклов работы ХТС по продуктам, продолжительностей выпуска продуктов.

### 1.1.3. Этапы компоновочных расчетов, составления расписания работы ХТС, утилизации отходов производства

Этап компоновочных расчетов включает размещение технологического оборудования всех ХТС в производственном помещении (решение задачи  $RO$ ) и трассировку технологических трубопроводов (решение задачи  $TT$ ) с учетом рекомендаций по способам транспорта веществ между аппаратами. Задача  $RO$  заключается в определении типа (многоэтажное, ангарное), этажности и габаритов производственного здания (если планируется его строительство), координат размещаемых аппаратов. Критерий оптимальности решения задачи  $RO$  – минимальный производственный объем, занимаемый размещаемыми аппаратами. Цель решения задачи  $TT$  – определение пространственного положения трасс всех технологических трубопроводов производства (координаты начал и окончаний, всех точек изменения направления), диаметров и материалов трубопроводов, способов транспорта веществ по каждому из них (если не указан заранее), длительностей транспортных операций, типов и координат размещения трубопроводной арматуры на каждой трассе. Критерий оптимальности решения задачи  $TT$  – минимальные совокупные затраты на технологические трубопроводы, трубопроводную арматуру и транспорт веществ по трубопроводам. Анализ содержания информационного сигнала  $I_{KR}$  (результаты решения задач  $RO$  и  $TT$ ) может привести к выводу о необходимости уточнения числа аппаратурных стадий некоторых ХТС и структуры их материальных потоков (введение дополнительных стадий для обеспечения условий транспорта веществ), а также может потребовать корректировки результатов определения  $AO$  ХТС и характеристик режима его функционирования в связи с уточнением значений продолжительностей транспортных операций.

Составление расписания работы ХТС производства (решение задачи  $RR$ ) представляет собой итерационный процесс последовательного решения задач  $KP$  (составление календарного плана работы ХТС) и  $GR$  (составление графика ППП оборудования стадий системы). Цель решения задачи  $KP$  – определение календарного срока выпуска каждой партии каждого продукта в течение планируемого периода  $T_r$  эксплуатации ХТС при минимальных совокупных простоях оборудования ее стадий и затратах времени на переходы с выпуска одних продуктов на другие. По результатам решения задачи  $KP$  определяется пробег каждого аппарата ХТС за период  $T_r$  и решается задача  $GR$  – календарные сроки техобслуживания и ремонтов оборудования ХТС устанавливаются так, чтобы минимизировать периоды прекращения выпуска продукции (по возможности, совместить ППП

с технологическими простоями оборудования – периодами ожидания подачи следующей партии на переработку и переходами с выпуска одних продуктов на другие). На каждой следующей итерации календарный план корректируется с учетом простоев оборудования, связанных с проведением ППР, причем в ходе этой коррекции сроки проведения ППР могут изменяться в допустимых пределах. Учет графика ППР оборудования ХТС, организация переходов с выпуска одних продуктов на другие в соответствии с графиком их поставок могут понизить производительность выбранного АО системы и привести к необходимости коррекции фонда ее рабочего времени, ассортимента или/и объемов выпуска продуктов и возврата на этап формирования ее АО. На основе результатов решения задач КР и GR решается задача SE определения графиков потребления и расходных норм всех видов сырья и энергии на единицу массы каждого продукта. В ходе решения этой задачи дополнительно определяется количество и состав, формируются графики образования сточных вод и газовых выбросов в атмосферу.

На этапе утилизации отходов решается задача ОР формирования ХТС переработки отходов производства, т.е. выбирается технология утилизации каждого их вида, определяется число ХТС и виды отходов, перерабатываемые на каждой из них, материальные индексы, типы основных и вспомогательных аппаратов стадий. Цель решения задачи ОР – обеспечение возможности приведения отходов в экологически безопасное состояние с помощью минимального совокупного числа аппаратурных стадий. На основе результатов решения задачи ОР формируются координирующие сигналы  $K_{SO_{su}}$ , содержащие исходные данные для решения задач  $SO_{su}$  расчетов технологического оборудования отдельных ХТС утилизации отходов. Цель решения задач  $SO_{su}$  – определение числа основных аппаратов стадий утилизации и определяющих геометрических размеров основных и вспомогательных аппаратов, обеспечивающих переработку указанных видов отходов в соответствии с графиками их образования при минимальных затратах на технологическое оборудование этих ХТС.

Как видно, процесс выполнения технологических расчетов при разработке проекта МХП является итерационным: значения исходных данных предыдущих этапов уточняются по результатам выполнения последующих и расчеты повторяются. Предлагаемый нами подход к автоматизации выполнения технологических расчетов базируется на принципах:

- системного подхода [2, 3, 8 – 11, 23 – 25] и применения CALS-технологий [26 – 29];
- как можно более полного учета особенностей функционирования ХТС реальных МХП;
- математического моделирования процессов принятия проектных решений,
- теории оптимального управления, т.е. формулировки и решения всех рассматриваемых задач как задач оптимизации;
- применения современных информационных технологий.

Эти принципы положены в основу разработки постановок задач, методов и алгоритмов определения АО и характеристик режима функционирования ХТС проектируемых МХП, представленных в работах [10, 30 – 39]. Научные результаты и разработанные на их основе программные продукты использовались при проектировании нескольких десятков ХТС реальных производств (цех отбеливателей Верхнезаволжского ХК, цеха азокрасителей Сивашского АКЗ, цеха полупродуктов, азопигментов и дисперсных красителей Тамбовского ОАО "Пигмент", экспортные предложения МНПО "НИОПиК" и др.).

Перейдем к рассмотрению особенностей функционирования оборудования стадий ХТС МХП, которые необходимо учитывать при выборе их АО и определении характеристик режима работы.

## 1.2. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ХТС МХП

Из литературных источников [1, 2, 4, 13, 19 – 21], нашего собственного 25-летнего опыта проектирования и перепрофилирования ХТС МХП известно, что наиболее важными характеристиками режима их работы, во многом определяющими состав аппаратурного оформления стадий и эффективность его функционирования, являются:

- длительность цикла переработки партий каждого продукта – минимально возможный промежуток времени между моментами начала (завершения) процессов выпуска партий продукта  $T_{ци}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , где  $I$  – число продуктов, выпускаемых ХТС;
- размер партии каждого продукта – масса партии, прошедшей все стадии переработки,  $w_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

Эти характеристики связаны между собой соотношением

$$T_i = \sum_j \tau_{ij} + \left( \frac{Q_i}{w_i} - 1 \right) T_{ци}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1.1)$$

где  $Q_i$  – объем выпуска  $i$ -го продукта;  $T_i$  – продолжительность его выпуска;  $\tau_{ij}$  – продолжительность реализации стадии  $j$  переработки партии  $i$ -го продукта.

Проанализируем влияние различных вариантов организации совместной работы оборудования соседних стадий и способов переработки партий продуктов на стадиях с основными аппаратами различных типов на значения длительностей циклов. Значения  $T_{ци}$  для продуктов ХТС определяются независимо, поэтому дальнейшие рассуждения поведем для системы, выпускающей единственный продукт. Предположим также, что структура материальных потоков ХТС линейна, т.е. стадии выпуска продукта реализуются последовательно, и их число совпадает с числом аппаратурных стадий системы  $J$ .

Если циклы переработки партий продукта перекрываются, т.е. процесс синтеза следующей партии начинается до окончания выпуска предыдущей, то минимальная продолжительность промежутка между выпуском двух партий продукта

$$T_{\text{ц}} = \max\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_j\}, \quad (1.2)$$

где  $\theta_j$  – минимально возможный промежуток времени между моментами окончания переработки аппаратами стадии  $j$  ХТС двух следующих одна за другой партий продукта. Значения  $\theta_j$  зависят от продолжительности реализации стадии  $\tau_j$ , числа  $N_j$  основных аппаратов, входящих в состав ее АО, и способа переработки партий продукта с помощью этих аппаратов.

### 1.2.1. Порядок определения продолжительностей реализации стадий выпуска продукта

Продолжительности реализации стадий выпуска продукта  $\tau_j, j = \overline{1, J}$  складываются из продолжительностей элементарных операций переработки партии продукта. Чаще всего это операции загрузки, физико-химических превращений (гомогенизация, химические реакции, выделение целевых продуктов, в том числе фильтрация и сушка), выгрузки и очистки аппарата, т.е.  $\tau_j = \tau_{1j} + \tau_{0j} + \tau_{\text{ц}j} + \tau_{\text{с}j}$ , где  $\tau_{1j}, \tau_{0j}, \tau_{\text{ц}j}, \tau_{\text{с}j}$  – соответственно длительности операций загрузки, физико-химических превращений, выгрузки и очистки при переработке на стадии  $j$  ХТС одной партии сырья или промежуточных продуктов.

Значения длительностей операций для всех стадий синтеза продукта приводятся в технологическом регламенте его выпуска (раздел "Нормы технологического режима"). Длительности операций очистки, как правило, нормируются в зависимости от типа, размеров аппарата и вида реализуемых в нем процессов. Порядок определения длительностей физико-химических превращений, загрузки и выгрузки зависит от типа основных аппаратов рассматриваемой стадии ХТС.

Если основным оборудованием стадии являются емкостные аппараты периодического действия с перемешивающими устройствами, то физико-химические превращения обычно осуществляются при интенсивном перемешивании, поэтому их длительности практически не зависят от количества перерабатываемой массы и определяются экспериментально или в результате исследований математических моделей соответствующих процессов. Длительности операций загрузки и выгрузки, напротив, прямо зависят от количества перемещаемой массы, способа ее транспорта, расположения аппаратов стадий ХТС друг относительно друга. Этап компоновки технологического оборудования выполняется по окончании определения АО ХТС, поэтому длительности операций загрузки и выгрузки емкостных аппаратов в расчетах оборудования ХТС МХП считаются постоянными (вначале принимаются с запасом, а затем уточняются в ходе компоновки оборудования и трассировки технологических трубопроводов).

Длительности реализации стадий фильтрации и сушки определяются размером партии продукта, удельной производительностью  $a_j$  основных аппаратов стадии (средней производительностью за цикл работы фильтра или сушилки в  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ ) и определяющим геометрическим размером аппаратов  $X_j$  (рабочим объемом или поверхностью):

$$\tau_j = \frac{g_j w}{X_j a_j}, \quad (1.3)$$

где  $g_j$  – основной материальный индекс стадии (результат пересчета материального баланса процесса синтеза продукта на одну тонну): массовый  $m_j$  ( $\text{кг}/\text{т}$ ) или объемный  $v_j$  ( $\text{м}^3/\text{т}$ ).

Для аппаратов периодического действия значение  $\tau_j$  представляет собой суммарную продолжительность всех операций стадии  $j$  выпуска продукта, например, для фильтров – сумму длительностей собственно фильтрования, промывки, осушки осадка и вспомогательных операций (загрузки, выгрузки, очистки). В аппаратах непрерывного действия все операции осуществляются одновременно, поэтому значение  $\tau_j$  для них – это длительность фильтрования плюс продолжительность подготовки к переработке следующей партии (остановка, осмотра и пуска).

Определение значений  $\tau_j$  для стадий, оснащаемых рамными и камерными фильтр-прессами в случае, когда целью фильтрования является выделение твердой фазы суспензии, а также сушилками периодического действия (например, роторными вакуумными), требует дополнительной информации о процессе. Необходимая рабочая поверхность фильтр-пресса зависит от объема получаемого осадка и толщины его слоя  $\delta_j$  (половина глубины рамы или камеры):  $X_j = \frac{v_j w}{\delta_j}$ . Продолжительность реализации стадии фильтрования вычисляется через массовый материальный индекс и удельную производительность фильтра по осадку в  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ :

$$\tau_j = \frac{m_j w}{X_j a_j} = \frac{m_j \delta_j}{v_j a_j}, \quad (1.4)$$

т.е. величина  $\tau_j$  в данном случае не зависит ни от рабочей поверхности фильтр-пресса, ни от размера партии продукта.

Рабочий объем роторной вакуумной сушилки  $V_j$  зависит от объема получаемого сухого продукта и коэффициента ее заполнения  $\phi_j$ , который не может быть больше максимально допустимого  $\phi_j^*$ , т.е.  $V_j = \frac{v_j w}{\phi_j} \geq \frac{v_j w}{\phi_j^*}$ . Продолжительность реализации стадии сушки партии продукта определяется массой испаренной влаги на одну тонну продукта, рабочей поверхностью сушилки  $F_j$  и ее удельной производительностью по влаге в  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ , следовательно,

$$\tau_j = \frac{m_j w}{F_j a_j} = \frac{m_j V_j \phi_j}{v_j F_j a_j} \leq \frac{m_j V_j \phi_j^*}{v_j F_j a_j}. \quad (1.5)$$

В зависимости от типа основных аппаратов соседних стадий ХТС и режима их работы операции загрузки и выгрузки могут быть разделены во времени с операцией "физико-химические превращения" (например, загрузка партии сырья и выгрузка партии полупродукта из емкостного аппарата, загрузка партии суспензии и выгрузка пасты из нутч-фильтра), а могут и совмещаться с ней (например, загрузка суспензии и выгрузка фильтрата из фильтр-пресса при очистном фильтровании, подача суспензии и выгрузка сухого продукта из распылительной сушилки). В последнем случае значения  $\tau_j$  и  $\tau_{j+1}$  предварительно не включаются в  $\tau_j$ , а определяются в процессе выбора АО ХТС.

### 1.2.2. Варианты организации совместной работы стадий ХТС с различными основными аппаратами

Возможные варианты организации совместной работы стадий ХТС, оснащенных фильтрами и емкостными аппаратами с перемешивающими устройствами, иллюстрирует рис. 1.2.

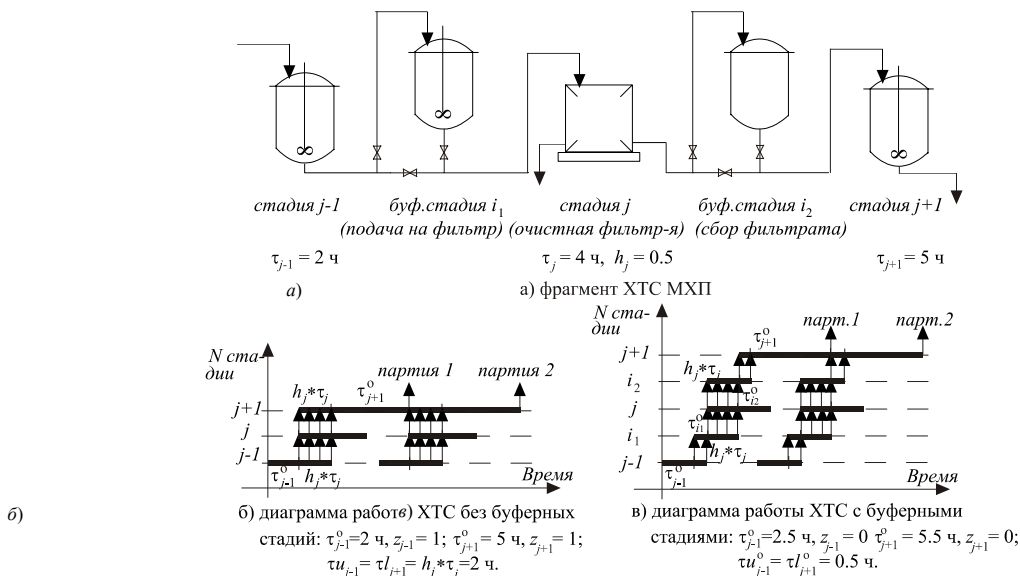


Рис. 1.2. Организация совместной работы стадии фильтрования и стадий с емкостным оборудованием

Для варианта, показанного на рис. 1.2, б, изменения первоначально заданных значений  $\tau_{j-1} = \tau_{j-1}^0$  и  $\tau_{j+1} = \tau_{j+1}^0$  вызваны следующими обстоятельствами:

1. Аппараты стадии  $j - 1$  используются для подачи суспензии на фильтр и, как правило, не освобождаются до окончания операции фильтрования. Исключение составляет случай передачи до начала фильтрования всей суспензии из емкостного аппарата в емкостной фильтр периодического действия – нутч-фильтр, листовой, патронный.

2. Если на стадии  $j$  установлены фильтры непрерывного действия, если разгрузка фильтра периодического действия не одновременна (друк-фильтр со сходящей тканью, ФПАКМ), если в аппараты стадии  $j + 1$  подается фильтрат, то обработка продукта фильтрования в аппаратах стадии  $j + 1$  не начнется до момента сбора в одном из них целой его партии.

Следовательно, для этого варианта  $\tau_{j-1} = \tau_{j-1}^0$  и  $\tau_{j+1} = \tau_{j+1}^0 + \tau_j h_j$ , где  $\tau_{j-1}^0$  – заданные (регламентные) длительности переработки партии продукта на стадиях  $j \pm 1$  без учета длительностей загрузки и выгрузки;  $h_j$  – доля основных операций (фильтрования, а также промывки в случаях, когда промывной фильтрат идет в дальнейшую переработку) от продолжительности цикла обработки одной партии суспензии на стадии  $j$ .

Вариант, показанный на рис. 1.2, в, предусматривает введение в ХТС дополнительных аппаратных стадий, оснащаемых буферными емкостями: стадии  $i_1$  для подачи суспензии на фильтр и стадии  $i_2$  для приема фильтрата. Для этих стадий  $\tau_i = \tau_i^0 + \tau_j h_j$ , где  $\tau_i^0$  – продолжительность транспорта партии суспензии в буфер-

ную емкость ( $\tau_i^0$ ) или партии фильтрата из буферной емкости ( $\tau_i^o$ ), которые обычно принимаются равными 0,5...1,5 ч. Нередко используются комбинированные варианты, когда, например, перед стадией фильтрования вводится буферная стадия, а для приема массы с фильтров используются основные аппараты следующей стадии.

Окончательно, считая, что нумерация стадий ХТС является сквозной, получим

$$\tau_{j\pm 1} = \tau_{j\pm 1}^0 + z_{j\pm 1} \tau_j h_j, \quad (1.6)$$

где  $z_{j\pm 1}$  – указатели необходимости коррекции длительностей переработки партии продукта на стадиях  $j \pm 1$  с учетом времени совместной работы их основных аппаратов с аппаратами стадии  $j$ :  $z_{j\pm 1} = 1$  – коррекция необходима;  $z_{j\pm 1} = 0$  – коррекция не нужна (вся партия суспензии выгружается из аппаратов стадии  $j - 1$  до начала операции фильтрования или вся партия пасты загружается в аппараты стадии  $j + 1$  после окончания ее промывки и осушки).

Аналогично может быть организована совместная работа емкостного оборудования с сушильным.

При непосредственном соединении стадий фильтрования и сушки возможны следующие варианты совместной работы их основных аппаратов (см. рис. 1.3).

а) стадии  $j - 1$  и  $j$  оснащены аппаратами периодического действия, т.е. перегрузка партии пасты из фильтра (например, фильтр-пресса) в сушилку (например, роторную вакуумную) производится одновременно и продолжительность перегрузки заранее включается в  $\tau_{j-1}$  и  $\tau_j$  (значения  $a_{j-1}$  и  $a_j$  задаются для полных циклов работы аппаратов);

б) на стадии  $j - 1$  аппараты периодического действия (например, листовые фильтры), а на стадии  $j$  – непрерывного (например, распылительная сушилка). В этом случае между стадиями обязательно вводится стадия  $i$ , оснащаемая буферными емкостями. Длительность пребывания влажного материала в емкостях определяется по формуле (1.6);

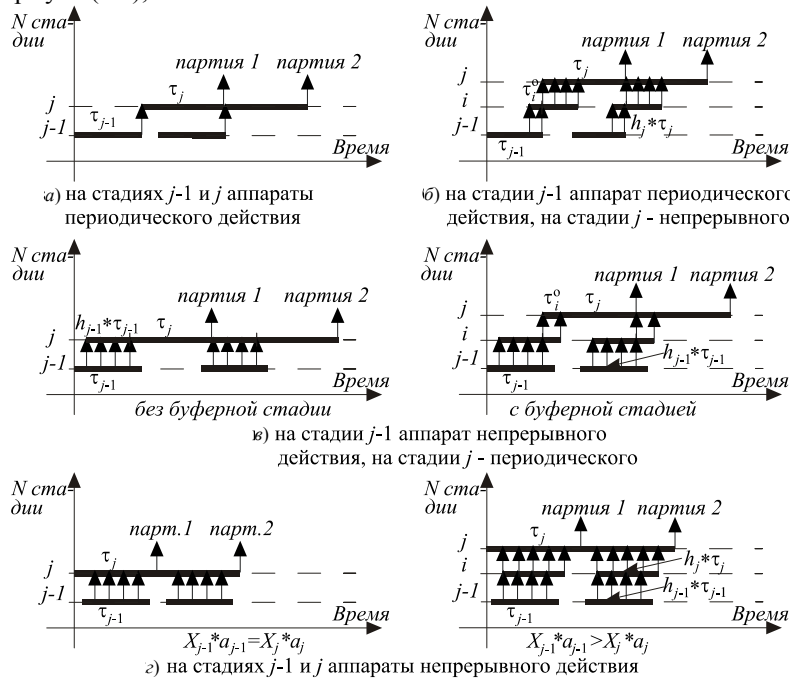


Рис. 1.3. Диаграммы совместной работы основных аппаратов стадий фильтрования и сушки

в) стадия  $j - 1$  оснащена аппаратами непрерывного действия (например, ленточными вакуум-фильтрами), а стадия  $j$  – периодического (например, сушилками вакуумными барабанными). Если основные аппараты стадий соединены непосредственно, то значение  $\tau_j$  увеличивается на продолжительность основных операций стадии  $j - 1$ :

$$\tau_j = \frac{g_j w}{X_j a_j} + h_{j-1} \tau_{j-1}, \quad (1.7)$$

а если между ними вводится буферная стадия  $i$ , то значения  $\tau_{j\pm 1}$  и  $\tau_i$  определяются по (1.3) – (1.6);

г) стадии  $j - 1$  и  $j$  оснащены аппаратами непрерывного действия. В этом случае значения  $\tau_{j-1}$  и  $\tau_j$  остаются неизменными. Если производительности аппаратов этих стадий (фильтра – по пасте, сушилки – по влажному материалу) равны, т.е.  $X_{j-1} a_{j-1} = X_j a_j$ , то аппараты обеих стадий работают синхронно (к такому режиму обычно стремятся технологи). В противном случае между стадиями  $j - 1$  и  $j$  вводится дополнительная стадия  $i$  с емкостными буферами:

$$\tau_i = \max \{ \tau_{j-1} h_{j-1}, \tau_j h_j \}. \quad (1.8)$$

Порядок определения значений  $\theta_j$  по известным значениям  $\tau_j$  и числа  $N_j$  основных аппаратов стадии  $j$  ХТС зависит от типа аппаратов и способа переработки партий продукта на стадии. Вначале проанализируем варианты режима переработки партий на стадиях, АО которых включает несколько основных аппаратов.

### 1.2.3. Организация переработки партий продукта на стадиях с несколькими основными аппаратами

Для идентификации вариантов будем использовать указатель  $p_j$ :

1)  $p_j = 0$  – каждый из аппаратов стадии  $j$  принимает партию сырья или полупродукта целиком, причем следующие друг за другом партии перерабатываются в разных аппаратах в порядке поступления, т.е. циклы работы разных аппаратов не совпадают по времени;

2)  $p_j = 1$  – партия материалов, поступающая на стадию, делится на  $N_j$  равных долей, т.е. при  $N_j = 2$  – на две, при  $N_j = 3$  – на три и т.д., которые синхронно перерабатываются в разных аппаратах.

На практике чаще применяется первый способ. Второй обычно используют на стадиях, не связанных с реализацией химических процессов (растворение, суспензирование, фильтрация, сушка), так как при периодическом режиме переработки долей партии в разных аппаратах чрезвычайно сложно обеспечить равные длительности химических превращений.

Если каждый аппарат перерабатывает партии продукта целиком, то минимальный период между их выходом со стадии  $\theta_j = \tau_j/N_j$  (см. рис. 1.4, а). В случае, когда равные доли партии продукта перерабатываются в разных аппаратах, значение  $\theta_j$  зависит от их типа.

На рис. 1.4, б представлена диаграмма переработки равных долей партии материалов на стадии, оснащенной емкостными аппаратами с перемешивающими устройствами, при  $N_j = 3$  в ситуации, когда к числу реализуемых операций относятся загрузка, физико-химические превращения и выгрузка. Длительность физико-химических превращений практически не зависит от количества массы, а длительность загрузки и выгрузки – прямо пропорциональна ему. Следовательно, продолжительность физико-химических превращений одинакова во всех аппаратах, а загрузки и выгрузки – уменьшается в  $N_j$  раз. Из рисунка видно, что в этом случае  $\theta_j = \tau_j - \tau_b(N_j - 1)/N_j$ , где  $\tau_b$  – общая продолжительность загрузки и выгрузки. Как правило, длительности операций загрузки и выгрузки емкостных аппаратов существенно меньше длительностей физико-химических превращений, поэтому в данном случае принимают  $\theta_j = \tau_j$ .

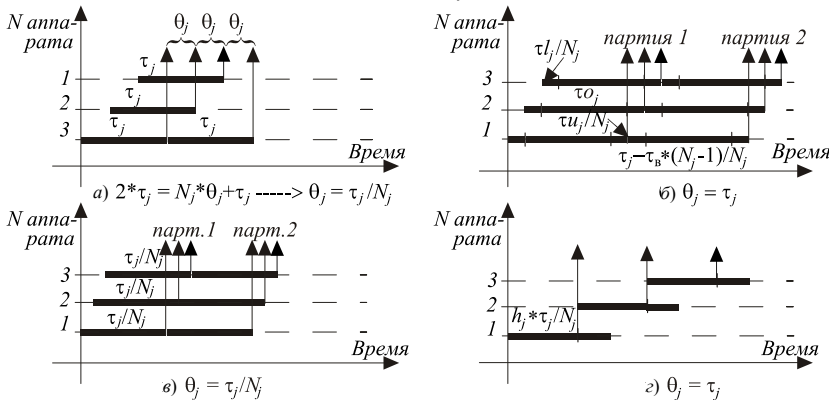


Рис. 1.4. Диаграммы работы основных аппаратов стадий при  $N_j = 3$

На стадиях фильтрования и сушки переработка равных долей партии в разных аппаратах возможна, если каждый аппарат оснащается буферными емкостями для подачи и приема массы или способен принять и передать сразу всю предназначенную долю партии (емкостной фильтр периодического действия, роторная вакуумная сушилка).

Поскольку длительность фильтрования и сушки прямо пропорциональна количеству обрабатываемой массы, в расчетах оборудования ХТС принимается  $\theta_j = \tau_j/N_j$  (см. рис. 1.4, в). Этот вывод не распространяется на стадии, оснащаемые фильтр-прессами, когда целью фильтрования является выделение твердой фазы суспензии. Переработка долей партии разными аппаратами этих стадий обычно организуется в случаях, когда рабочей поверхности одного фильтра оказывается недостаточно. Аппараты работают последовательно: после заполнения осадком одного суспензия подается в следующий (см. рис. 1.4, г). При таком режиме минимально возможный промежуток времени между моментами окончания переработки двух последовательно выпускаемых партий продукта  $\theta_j = \tau_j$ .

Теперь обратимся к ситуациям, когда в каждом основном аппарате стадии ХТС МХП объединяются и совместно перерабатываются несколько партий или партия разделяется на несколько одинаковых порций, которые перерабатываются в каждом аппарате последовательно.

### 1.2.4. Изменения размера партии продукта в ходе ее переработки на стадиях ХТС

Изменения размеров партий продуктов в ходе их переработки характерны для многопродуктовых систем и обычно вызваны стремлением обеспечить выпуск всех продуктов заданного ассортимента с использованием минимального количества аппаратных стадий. При решении задач организации выпуска новой продукции на оборудовании действующего МХП необходимость изменения размера партии продукта на стадиях, где размеры имеющихся аппаратов сильно отличаются от требуемых, может возникнуть и в однопродуктовых системах. На стадиях, связанных с химическими превращениями, таких ситуаций стараться избегать, так как это отрицательно сказывается на качестве продукции.

Для определения характера изменения размера партии на стадии  $j$  будем использовать указатель  $r_j$ : значение  $r_j = 1$  показывает, что размер партии не меняется;  $r_j = \gamma$ ,  $\gamma > 1$  означает, что партия дробится на  $\gamma$  равных порций, которые перерабатываются последовательно;  $r_j = 1/\gamma$ ,  $\gamma > 1$  указывает на объединение и совместную переработку  $\gamma$  целых партий.

На рис. 1.5 показаны простейшие варианты рассматриваемой ситуации, когда каждая стадия ХТС оснащена единственным емкостным аппаратом. Рис. 1.5, б иллюстрирует функционирование оборудования системы при дроблении партии продукта на стадии  $j$  на две равные порции и их последовательной переработке, а рис. 1.5, в – при объединении на этой стадии двух партий продукта и их одновременной переработке.

При дроблении партии аппарат предыдущей стадии  $j - 1$  освобождается только после окончания переработки на стадии  $j$  ее первой порции, продолжительность переработки партии на стадии  $j$  удваивается, а аппарат стадии  $j + 1$  начинает переработку партии только после сбора

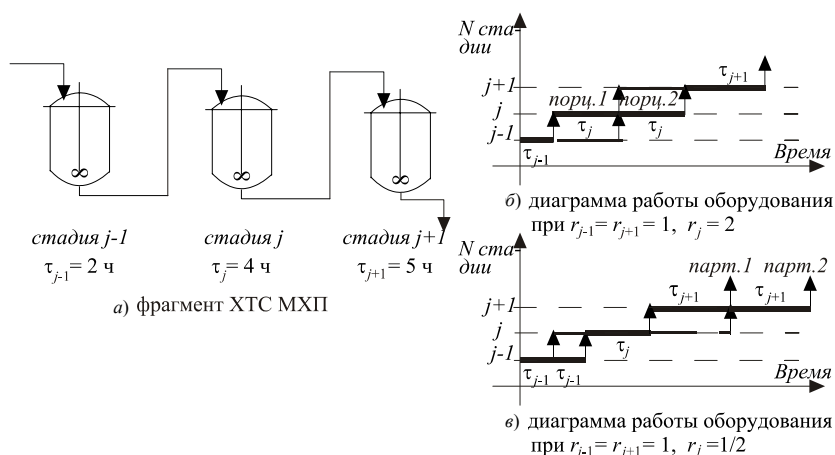


Рис. 1.5. Функционирование стадий с емкостными аппаратами при изменении размера партии продуктом обеих ее порций. Для емкостных аппаратов с механическими мешалками продолжительность переработки доли партии или нескольких партий может быть принята равной продолжительности переработки одной партии, поэтому  $\theta_{j-1} = \tau_{j-1} + \tau_j$ ,  $\theta_j = 2\tau_j$ ,  $\theta_{j+1} = \tau_j + \tau_{j+1}$ . Для обозначения состояния аппаратов стадий  $j - 1$  и  $j + 1$  в течение времени  $\tau_j$  введем термин "заполненный простой" – аппараты не заняты переработкой партий продукта, но и не пустуют (первый недогружен, второй недогружен).

При объединении партий аппарат стадии  $j$  не сможет начать переработку объединенной партии до окончания переработки второй партии на стадии  $j - 1$  и не освободится до окончания переработки первой партии на стадии  $j + 1$ . Он находится в состоянии "заполненного простоя" дважды: в течение времени  $\tau_{j-1}$  недогружен, а в течение времени  $\tau_{j+1}$  – недогружен. В этом случае  $\theta_{j-1} = \tau_{j-1}$ ,  $\theta_j = (\tau_{j-1} + \tau_j + \tau_{j+1})/2$ ,  $\theta_{j+1} = \tau_{j+1}$ .

Таким образом, в число элементарных операций переработки партии продукта при реализации некоторых стадий  $j \in (1, \dots, J)$  его выпуска могут входить операции "заполненного простоя": при загрузке основных аппаратов стадии  $t\theta_j$  и при их разгрузке  $t\tau_j$ . Обобщая случаи, представленные на рис. 1.5, б и в, запишем, что при

$$r_j < r_{j\pm 1} \quad \theta_j = r_j \left[ \tau_j + \left( \frac{1}{r_j} - \frac{1}{r_{j\pm 1}} \right) \theta_{j\pm 1} \right], \text{ а для стадии, которой соответствует максимальное значение } r_j, \quad -\theta_j = r_j \tau_j.$$

При  $r_j \neq 1$  в случае  $N_j > 1$  значения  $\theta_j$  для стадий, оснащенных емкостными аппаратами, зависят также от выбранного режима переработки партий или их долей, т.е. от значения  $p_j$ : при  $p_j = 1$  значения  $\theta_j$  остаются неизменными, а при  $p_j = 0$  – уменьшаются в  $N_j$  раз.

Для стадий ХТС, оснащаемых фильтрами и сушилками, возможны следующие разновидности рассматриваемой ситуации:

1) для большинства типов этих аппаратов продолжительность реализации стадии обработки партии продукта определяется размером партии, поэтому  $\theta_j = \tau_j / r_j / N_j$  (деление на  $N_j$  производится как в случае асинхронной обработки каждым аппаратом  $1/r_j$  партий, так и в случае синхронной обработки их равных долей);

2) исключением из предыдущего правила являются стадии, оснащаемые рамными и камерными фильтр-прессами в случаях, когда целью фильтрования является выделение твердой фазы суспензии и продолжительность переработки партии продукта не зависит от ее размера  $\theta_j = \tau_j r_j / N_j$ , если  $p_j = 0$ , и  $\theta_j = \tau_j r_j$  при  $p_j = 1$ ;

3) аппараты непрерывного действия, как правило, перерабатывают всю массу, содержащуюся в аппаратах предыдущей стадии, и для стадий, оснащаемых такими аппаратами, обычно соблюдается равенство  $r_j = r_{j+1}$ ; в случаях  $r_j \neq r_{j+1}$  перед и после стадии  $j$  вводятся стадии с буферными емкостями.

Для определения значений  $\theta_j, j = \overline{1, J}$  с учетом возможности возникновения ситуаций  $r_j \neq 1, p_j \neq 0, j \in (1, \dots, J)$  предлагается использовать соотношение

$$\theta_j = \frac{r_j}{c_j} \left[ \frac{\tau_j}{b_j} + \max_{k < j, r_k > r_j} \left\{ \left( \frac{1}{r_j} - \frac{1}{r_{j-1}} \right) \theta_k \right\} + \max_{k > j, r_k > r_j} \left\{ \left( \frac{1}{r_j} - \frac{1}{r_{j+1}} \right) \theta_k \right\} \right], \quad (1.9)$$

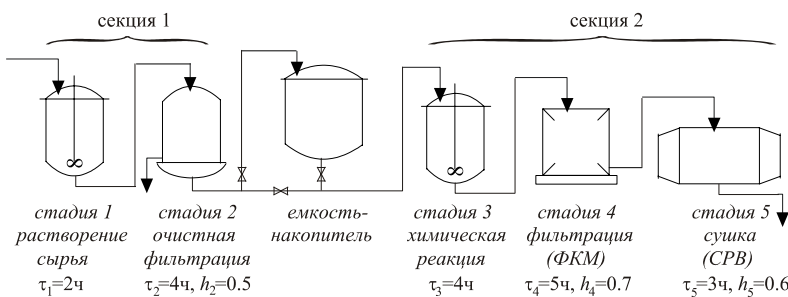
причем начинать расчеты следует со стадии, которой соответствует наибольшее значение  $r_j$  и продолжать в порядке их убывания. Здесь  $b_j = 1$ , если на стадии  $j$  установлен емкостной аппарат или фильтр-пресс, выделяющий твердую фазу суспензии, иначе  $b_j = r_j$ . Переменная  $c_j = N_j$ , если  $p_j = 0$  или  $p_j = 1$  и на стадии  $j$  установлены фильтры или сушилки, причем целью работы фильтр-прессов является получение фильтрата, иначе  $c_j = 1$ .

Как видно, расчет значения  $T_{ц}$  по формуле (1.2) требует предварительного определения значений  $\tau_j$  для стадий фильтрации и сушки по формулам (1.3) – (1.5), выбора одного из возможных способов совместной работы оборудования различных стадий ХТС и коррекции значений  $\tau_j, j \in (1, \dots, J)$  по формулам (1.6) – (1.8), а затем – определения значений  $\theta_j, j = \overline{1, J}$  по формуле (1.9) в соответствии с выбранными значениями  $N_j, p_j, r_j, j = \overline{1, J}$ . Присутствие в правой части формулы (1.3) величины  $w$ , для определения значения которой согласно (1.1) требуются значения  $T_{ц}$  и  $\tau_j, j = \overline{1, J}$  (значение  $T$  для однопродуктовой ХТС известно заранее), приводит к необходимости итерационного уточнения значений  $\tau_j$  на стадиях фильтрации, сушки и связанных с ними стадиях с емкостным оборудованием.

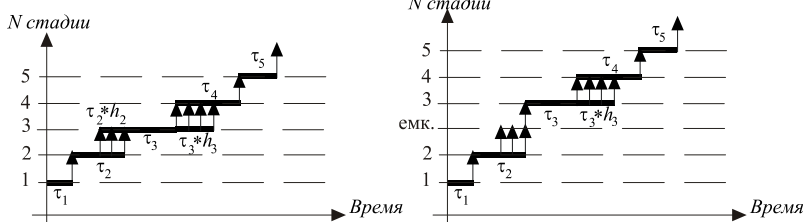
Размеры партий продуктов могут изменяться и в случае, когда между какими-либо стадиями их переработки допускается длительное хранение и смешение различных партий (например, после окончания подготовки растворимого сырья или непосредственно перед выделением готового продукта). В таких местах в ХТС могут быть введены емкости-накопители, которые разделяют ее на независимые секции (см. рис. 1.6). Количество секций ХТС при выпуске разных продуктов может быть неодинаковым, а значения характеристик режима ее работы при выпуске одного и того же продукта для разных секций могут быть различными.

Рабочие объемы и режим функционирования емкостей-накопителей определяются из условий наличия в них в любой момент времени количества промежуточного продукта, достаточного для подачи на следующую аппаратную стадию, и возможности приема в любой момент времени партии промежуточного продукта с предыдущей аппаратной стадией [2, 40 – 43]. При введении емкостей-накопителей между стадиями с основными аппаратами различных типов (емкость и фильтр, фильтр и сушилка) они также выполняют функцию буферных емкостей (см. рис. 1.6).

Решение о возможности секционирования ХТС при выпуске того или иного продукта принимается в ходе определения числа ее аппаратных стадий и структуры материальных потоков при выпуске каждого продукта. Вопрос о целесообразности секционирования может быть решен только путем сравнения результатов определения АО ХТС и режима его функционирования при разделении системы на секции и без деления. При определении АО ХТС каждую ее секцию, в принципе, можно рассматривать как отдельную систему.



а) пример секционирования ХТС МХП



б) график обработки партии продукта без емкости-накопителя ( $T_{ц} = 9.5$  ч)

в) график обработки партии продукта с емкостью-накопителем ( $T_{ц1} = 4$  ч,  $T_{ц2} = 7.5$  ч)

Рис. 1.6. Влияние секционирования ХТС на режим переработки партий продукта

Отметим, что из нашего опыта работы в области автоматизированного проектирования МХП можно сделать вывод, что в производствах красителей и полупродуктов, кино-фотоматериалов, химических реактивов секционирование ХТС практически не применяется.



В заключение отметим, что технология синтеза продуктов МХП нередко предусматривает параллельную реализацию некоторых стадий, например, подготовку исходных компонентов для реализации стадий азосочетания (см. рис. 1.7), т.е. структура материальных потоков ХТС МХП редко бывает линейной (и часто неоднородна при выпуске различных продуктов). Поэтому применение соотношений (1.6) – (1.9) невозможно без информации о маршрутах следования партий продуктов по аппаратурным стадиям ХТС (последовательностях номеров аппаратурных стадий, где реализуются стадии синтеза продукта). При этом следует учитывать, что в случаях параллельной реализации некоторых стадий или их совокупностей этих последовательностей может быть несколько (на рис. 1.7 – три последовательности: [1, 2, 5, 8, 9], [3, 4, 5, 8, 9] и [6, 7, 9]).

Рассмотренные в этом разделе особенности функционирования оборудования ХТС МХП должны учитываться при постановке и решении задач определения характеристик режима функционирования системы и АО ее стадий (задачи АО<sub>s</sub> и задач АО<sub>sj</sub>, см. п. 1.1.2).

Перейдем к обзору предложенных в литературе математических постановок и методов решения задач определения АО стадий ХТС МХП и характеристик режима его функционирования.

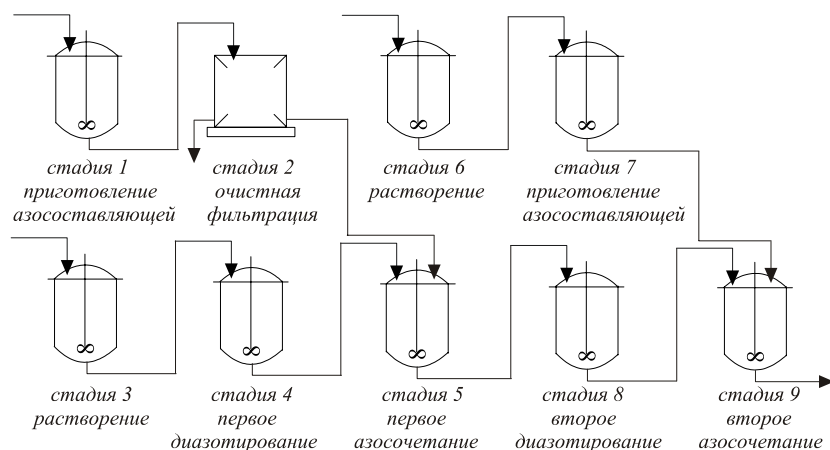


Рис. 1.7. Фрагмент процесса синтеза прямого азокрасителя

### 1.3. ПОСТАНОВКИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АО ХТС МХП

Первые публикации по проблеме определения АО ХТС периодического действия и характеристик режима их функционирования относятся к началу 1970-х гг. До настоящего времени предложены три основных методологических подхода к формализации и решению этой проблемы на стадии проектирования нового производства:

(I) – формулировка и решение задачи определения АО ХТС при упрощенном представлении о режиме его функционирования (примерно, до середины 1980-х гг.);

(II) – формулировка и решение задачи определения АО ХТС в условиях неопределенности некоторых ее параметров (примерно, с середины 1980-х до конца 1990-х гг.);

(III) – формулировка задач оптимизации режима функционирования ХТС периодического действия, разработка методов их решения как самостоятельных задач и совместно с выбором размеров и числа основных аппаратов (с середины 1980-х гг. до настоящего времени).

Рассмотрим эти подходы подробнее в контексте учета отмеченных особенностей функционирования оборудования ХТС МХП. Заметим, что подход (III), в основном, относится к многоцелевым ХТС.

#### 1.3.1. Постановки задачи определения АО ХТС при упрощенном представлении режима его работы

Рассмотрение выбора АО стадий ХТС и определения характеристик режима его функционирования в рамках одной задачи (см. [2, 4, 10, 13, 19 – 21, 30 – 33, 44 – 55]), является логичным следствием допущений о характере функционирования основной аппаратуры стадий ХТС МХП при переработке партий продуктов, которые принимались практически всеми авторами:

(i) – размеры партий продуктов неизменны, в ситуации  $N_j > 1$  каждый основной аппарат каждой стадии принимает и перерабатывает партии продуктов целиком;

(ii) – основной характеристикой режима функционирования оборудования стадии  $j$  ХТС при выпуске  $i$ -го продукта является продолжительность переработки партии сырья или полупродукта  $\tau_{ij}$  (без разделения на операции);

(iii) – ХТС выпускает каждый продукт сразу в планируемом объеме  $Q_i$ , т.е. один раз;

(iv) – маршрут следования партий каждого продукта по аппаратурным стадиям ХТС (последовательность их переработки) фиксирован и не предусматривает параллельной реализации некоторых стадий или их совокупностей.

При этих допущениях для определения режима функционирования АО ХТС достаточно зафиксировать длительность цикла обработки партий каждого продукта  $T_{ци}$ ,  $i = \overline{1, I}$  и размер партии каждого продукта  $w_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

Выбор вспомогательного оборудования в этих работах не рассматривается, в качестве критерия оптимальности АО ХТС во всех них предлагается использовать стоимость основной аппаратуры. Различия в предложенных математических постановках общей задачи обусловлены дополнительными допущениями:

а) рассматривается индивидуальная [19, 46, 50], многопродуктовая [4, 10, 20, 21, 30 – 33, 45, 48, 49, 51, 53, 55] или многоцелевая [2, 13, 44, 47, 52, 54] ХТС (в последнем случае допускается одновременный выпуск нескольких продуктов, если маршруты переработки их партий не включают одни и те же аппаратурные стадии);

б) ХТС функционирует в режиме без перекрытия циклов выпуска партий продуктов [19, 20] (переработка следующей партии не начинается до окончания переработки предыдущей) или с перекрытием циклов [2, 4, 10, 13, 21, 30 – 33, 44 – 55];

в) значения  $\tau_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$  зависят от размеров партий продуктов  $w_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  [2, 10, 13, 21, 31 – 33, 44, 46] или не зависят [4, 19, 20, 30, 45, 47 – 55];

г) возможность оснащения стадий ХТС основными аппаратами непрерывного действия, работающими в полунепрерывном режиме, учитывается [2, 10, 13, 21, 31 – 33, 44, 46] или не учитывается [4, 19, 20, 30, 45, 47 – 55], причем в первом случае продолжительность подачи перерабатываемой массы и ее приема из этих аппаратов аппаратами соседних стадий также может учитываться [10, 31 – 33] или не учитываться [2, 13, 21, 44, 46];

д) переменные  $N_j$  и  $X_j$  изменяются непрерывно [2, 13, 19 – 21, 44, 46, 47, 49 – 54], либо дискретно [4, 10, 30 – 33, 45, 48, 55] (предполагается оснащение стадий ХТС стандартными основными аппаратами и учитывается, что их число должно быть целым);

е) при определении размеров емкостных аппаратов учитываются [2, 10, 13, 30 – 33, 45, 48], либо не учитываются [4, 19 – 21, 44, 46, 47, 49 – 53] ограничения на степень их заполнения;

ж) смещение и промежуточное хранение партий промежуточных продуктов не допускается [10, 19 – 21, 30, 31, 44 – 53, 55], либо допускается [2, 4, 13, 32, 33, 54] (рассматривается возможность введения в ХТС емкостей-накопителей, разделяющих систему на секции, характеристики режима функционирования которых могут быть различными).

Наиболее полная постановка задачи определения АО многопродуктовой ХТС в рамках допущений (i) – (iv), учитывающая особенности проектирования и функционирования отечественных МХП, в частности, – возможность синхронной переработки равных долей партии несколькими основными аппаратами стадий ХТС, предложена нами в [10, 32, 33]. Задача сводится к определению размеров и числа основных аппаратов стадий ХТС  $X_j, N_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , количества  $U$  и местоположения групп емкостей-накопителей, размеров и числа емкостей каждой группы  $X_u, N_u$ ,  $u = \overline{1, U}$ , а также значений  $\tau_{ij}$ ,  $i = \overline{1, J}$ ,  $j \in J_i$ , размеров партий продуктов и длительностей циклов их обработки в каждой секции ХТС, при которых капитальные затраты на оборудование и необходимый для его размещения производственный объем

$$Z = \sum_{j=1}^J N_j [c_A(ta_j, X_j) + c_V(ta_j, X_j)] + \sum_{u=1}^U N_u [c_A(ta_u, X_u) + c_V(X_u)] \quad (1.10)$$

достигают минимума и выполняются ограничения:

1. Условия выбора допустимых значений  $X_j, N_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ :

$$\frac{v_{ij} w_{ij}}{\varphi_j^*} \leq X_j \leq \frac{v_{ij} w_{ij}}{\varphi_j^*}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j \in Jb_i; \quad (1.11)$$

$$X_j \geq \frac{g_{ij} w_{ij}}{a_{ij} \tau_{ij}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j \in Js_i; \quad (1.12)$$

$$X_j \in XS_j \cap [X_{j^*}; X_j^*], \quad j = \overline{1, J}; \quad (1.13)$$

$$N_j \in [N_{j^*}; N_j^*], \quad N_j - \text{целые}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (1.14)$$

2. Условие обеспечения требуемой производительности ХТС по продуктам

$$\sum_{i=1}^I T_i \leq T_p, \quad (1.15)$$

где 
$$T_i = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} + \max_{s \in S_i} \left\{ \left( \frac{Q_i}{w_i^s} - 1 \right) T_{ци}^s \right\}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (1.16)$$

$S_i$  – число секций, на которые разделяется ХТС при выпуске  $i$ -го продукта;  $w_i^s, T_{ци}^s$  – размер партии  $i$ -го продукта и длительность цикла его выпуска для  $s$ -й секции ХТС:

$$T_{wi}^s = \max_{j \in J_i^s} \left\{ \frac{\tau_{ij}}{N_j - p_{ij}(N_j - 1)} \right\}, \quad i = \overline{1, I}, \quad s = \overline{1, S_i}, \quad (1.17)$$

$J_i^s$  – множество номеров аппаратурных стадий, входящих в s-ю секцию ХТС при выпуске i-го продукта;

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \tau_{ij}^0 + \begin{cases} 0, \text{ если } j \notin (js', js'') \forall js \in Js_i; \\ \sum_{js \in Js_i: j \in (js', js'')} z_{ij} \tau_{i, js} h_{i, js}, \text{ иначе } i = \overline{1, I}, j \in Jb_i; \end{cases} \\ \frac{g_{ij} w_{ij}}{a_{ij} X_j}, \quad i = \overline{1, I}, j \in Js_i; \end{cases} \quad (1.18)$$

$js', js''$  – номера стадий ХТС, аппараты которых соответственно осуществляют подачу партий i-го продукта в аппараты стадии  $js \in Js_i$ , и их прием

$$w_{ij} = \frac{w_i^s}{p_{ij}(N_j - 1) + 1}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j \in J_i^s, \quad s = \overline{1, S_i}. \quad (1.19)$$

3. Условия определения значения U и выбора допустимых значений  $X_u, N_u, u = \overline{1, U}$

$$U = \sum_{j=1}^J b_j, \quad (1.20)$$

где 
$$b_j = \begin{cases} 0, \text{ если } \forall i \in (1, \dots, I), \quad s \in (1, \dots, S_i): j \neq \omega_i^s; \\ 1, \text{ если } \exists i \in (1, \dots, I), \quad s \in (1, \dots, S_i): j = \omega_i^s; \end{cases}$$

$\omega_i^s$  – последняя стадия s-й секции ХТС при выпуске i-го продукта

$$\frac{v_{iu}}{\Phi_u} \leq X_u N_u \leq \frac{v_{iu}}{\Phi_u^*}, \quad i \in (1, \dots, I), \quad u = \overline{1, U}, \quad (1.21)$$

где  $v_{iu} = v_{i\omega_i^s} (w_i^s + w_i^{s+1}) - 2GCM(v_{i\omega_i^s} w_i^s, v_{i\omega_i^s} w_i^{s+1})$ ,  $s \in (1, \dots, S_i)$  – максимальный объем полуфабриката i-го продукта, который может находиться в u-й группе емкостей-накопителей (при допущении, что длительности подачи в емкости и отбора из них партий полуфабрикатов пренебрежимо малы по сравнению со значениями  $T_{wi}^s, T_{wi}^{s+1}$ ,  $\forall i \in (1, \dots, I), \quad s \in (1, \dots, S_i)$ , см. [40, 41, 43]),  $GCM(x_1, x_2)$  – наибольший общий делитель чисел  $x_1$  и  $x_2$ ;

$$X_u \in XS_u \cap [X_u^*, X_u^*], \quad u = \overline{1, U}, \quad (1.22)$$

где  $XS_u$  – множество значений рабочих объемов доступных емкостей-накопителей, исполнение которых должно соответствовать исполнению аппаратов стадий  $\omega_i^s, i \in (1, \dots, I), \quad s \in (1, \dots, S_i)$ ;

$$N_u \in [N_u^*, N_u^*], \quad N_u \text{ – целые, } u = \overline{1, U}. \quad (1.23)$$

В выражении (1.10) для критерия оптимальности АО ХТС  $c_A(ta_j, X_j)$ ,  $c_V(ta_j, X_j)$  – это зависимости стоимости основного аппарата стадии j и стоимости занимаемого им производственного объема (стандартных строительных клеток), от его типа и определяющего геометрического размера.

Работы, в которых предлагались аналогичные постановки задачи определения АО ХТС проектируемого МХП, появлялись и позже, например [13], где постановка задачи, названной задачей параметрического синтеза ХТС, предусматривает

$$\min_{N, V, U} \left\{ \sum_{k=1}^{J_i} [N_k C_k(V_k) + C_k'(V_k, N_k) + C_k''(U_k)] \right\} \quad (1.24)$$

при

$$\sum_{j \in A_i} G_j \tau_j^{\lim} / g_j \leq T_i, \quad (1.25)$$

где 
$$\tau_j^{\lim} = \begin{cases} \sup_{k=\overline{1, S_i}} \{ \tau_{jk} / N_k \} \text{ – для систем без емкостей;} \\ \tau_{j, J_i} / N_{J_i} \text{ – для систем с емкостями;} \end{cases}$$

$$\kappa_{jk} \frac{S_{jk} g_j}{\Phi_{jk}^{\max}} \leq V_k \leq \kappa_{jk} \frac{S_{jk} g_j}{\Phi_{jk}^{\min}}, \quad j \in A_j, \quad k = \overline{1, S_i}, \quad (1.26)$$

$$\text{где } \kappa_{jk} = \begin{cases} 1 - \text{ для систем без емкостей;} \\ \frac{\tau_{jk}}{N_k} \prod_{l=k+1}^{I_i} \frac{N_l}{\tau_{jl}} u_{jl}^{\text{in}} \prod_{l=k}^{I_i-1} \frac{N_l}{\tau_{jl}} \frac{1}{u_{jl}^{\text{out}}} - \text{ для систем с емкостями} \end{cases}$$

(см. [43]); для систем с емкостями

$$\frac{u_{jk}}{\Phi_{jk}^{\text{max}}} \leq U_k \leq \frac{u_{jk}}{\Phi_{jk}^{\text{min}}}, \quad (1.27)$$

$$\text{где } u_{jk} = \sup_{j \in A_i} \{ \inf_{\Delta\tau_{jk}} \{ \max_{t \in \theta_j} \{ 0, u_{jk}^{\text{in}}(t, \Delta\tau_{jk}) - u_{jk}^{\text{out}}(t, \Delta\tau_{jk}) \} \} \} \quad (\text{см. [43]}).$$

Постановка (1.24) – (1.27) учитывает возможности функционирования ХТС без емкостей-накопителей и с емкостью между каждой парой соседних стадий системы. Обозначения в соотношениях (1.24) – (1.27):  $i$  – номер ХТС производства;  $I_i$  – число стадий  $i$ -й ХТС;  $T_i$  – фонд ее рабочего времени;  $V_k, N_k$  – определяющий размер (рабочий объем) и число основных аппаратов  $k$ -й стадии;  $U_k$  – объем емкости-накопителя, в которую передается масса из аппаратов  $k$ -й стадии;  $C_k(V_k)$  – стоимость аппарата  $k$ -й стадии,  $C''_k(U_k)$  – стоимость емкости-накопителя,  $C'_k(V_k, N_k)$  – эксплуатационные затраты на оборудование  $k$ -й стадии;  $j$  – номер продукта;  $A_i$  – ассортимент продуктов  $i$ -й ХТС;  $G_j$  – объем выпуска  $j$ -го продукта;  $\tau_j^{\text{lim}}, g_j$  – длительность цикла выпуска партий  $j$ -го продукта и размер выпускаемых партий;  $s_{jk}$  – материальный индекс  $k$ -й стадии по  $j$ -му продукту;  $\Phi_{jk}^{\text{min}}, \Phi_{jk}^{\text{max}}$  – пределы изменения степени заполнения аппаратов  $k$ -й стадии (и следующей за ней емкости) при выпуске  $j$ -го продукта;  $u_{jk}$  – объем массы в  $k$ -й емкости при выпуске  $j$ -го продукта;  $u_{jk}^{\text{in}}, u_{jk}^{\text{out}}$  – объем порции массы, поступающей и отбираемой из емкости;  $\Delta\tau_{jk}$  – интервал времени между начальными моментами загрузки и разгрузки емкости;  $t$  – время;  $\theta_j$  – продолжительность цикла обработки партии  $j$ -го продукта аппаратами стадий ХТС.

Как видно, постановка (1.24) – (1.27) по сравнению с (1.10) – (1.23) не учитывает возможности оснащения стадий ХТС основными аппаратами непрерывного действия, возможности синхронной переработки аппаратами некоторых стадий ХТС равных долей партий продуктов. В этой постановке отсутствуют (по крайней мере, в явном виде) условия целочисленности значений  $N_k$  и дискретности значений  $V_k$ , хотя упоминается, что стадии ХТС оснащаются стандартными аппаратами. Заметим также отсутствие указаний на то, какие виды эксплуатационных затрат для стадий ХТС учитываются при расчетах значений  $C'_k(V_k, N_k)$ , и каков порядок их расчета.

Вопрос об оптимизации режима функционирования АО ХТС в рамках допущений (i) – (iv) возникает только для многоцелевых систем [2, 13, 44, 47, 52, 54]. Проблемы, связанные с применением многоцелевых ХТС для выпуска продуктов МХП, уже отмечались в начале этой главы, тем не менее, остановимся на постановках задач определения АО многоцелевых ХТС в части определения характеристик режима его функционирования. В этих постановках ограничения вида (1.15), (1.25) заменяются ограничениями вида

$$\sum_{i \in S_k} \frac{Q_i}{w_i} T_{wi} \leq T_p, \quad k = \overline{1, K}, \quad (1.28)$$

где  $T_{wi} = \max_{j=1, \dots, M_i} \left\{ \frac{\tau_{ij}}{N_j} \right\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $S_k$  – множество номеров продуктов, принадлежащих к одной из возможных последовательностей их выпуска,  $M_i$  – множество номеров стадий переработки партий  $i$ -го продукта. Последовательности  $S_k$ ,  $k = \overline{1, K}$  формируются на основе выделения групп продуктов, которые не могут выпускаться одновременно, так как маршруты переработки их партий включают одно и то же оборудование.

Оптимизация режима функционирования АО таких ХТС сводится к выбору из возможных последовательностей выпуска продуктов тех, которые обеспечивают выпуск продукции в плановых объемах за указанный срок и доставляют минимум критерию, т.е. обеспечивают минимальную стоимость основной аппаратуры стадий ХТС.

Оценивая постановки задачи определения АО ХТС периодического действия, предложенные в [2, 4, 10, 13, 19 – 21, 30 – 33, 44 – 55], с точки зрения учета особенностей функционирования оборудования ХТС МХП (см. раздел 1.2), следует отметить:

- 1) не учитывается возможность дробления/укрупнения партий продуктов на некоторых стадиях ХТС (исключая [10, 32, 33], где рассмотрен случай синхронной переработки равных долей партий в параллельных аппаратах);
- 2) не рассматривается возможность параллельной реализации стадий подготовки компонентов для химических превращений;
- 3) допущение (ii) не позволяет учесть все возможные варианты одновременной переработки одной и той же партии продукта основными аппаратами соседних стадий ХТС, не разделенных емкостями-накопителями;
- 4) не учитываются особенности определения АО стадий, где основными аппаратами являются фильтры и сушилки периодического действия.
- 5) практически во всех зарубежных публикациях (см. [4, 19 – 21, 44, 46, 47, 49 – 55]), при определении размеров емкостных аппаратов не учитывается степень их заполнения.

### 1.3.2. Постановки задачи определения АО ХТС в условиях неопределенности значений некоторых параметров

В работах [56 – 61] предложен ряд модификаций постановки задачи определения АО ХТС периодического действия в условиях неопределенности некоторых ее параметров, причем наиболее часто учитывается неопределенность объемов выпуска продуктов, связанная с неопределенностью емкости рынка в течение планируемого периода функционирования ХТС. Каноническая формулировка задачи для этого случая в рамках допущений (i) – (iv) приведена в [60]:

$$\max_{V_j, B_i} E_\theta \left[ \max_{Q_i} \sum_{i=1}^N p_i Q_i \right] - \delta \sum_{j=1}^M \alpha_j V_j^{\beta_j} N_j \quad (1.29)$$

при условиях

$$V_j \geq S_{ij} B_i, \quad \forall i \in (1, \dots, N), \quad \forall j \in (1, \dots, M); \quad (1.30)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{B_i} T_{Li} \leq H; \quad (1.31)$$

$$T_{Li} = \max_{j=1, \dots, M} \left\{ \frac{t_{ij}}{N_j} \right\}, \quad \forall i \in (1, \dots, N); \quad (1.32)$$

$$Q_i = \theta_i, \quad \theta_i^L \leq \theta_i \leq \theta_i^U, \quad \forall i \in (1, \dots, N); \quad (1.33)$$

$$V_j^L \leq V_j \leq V_j^U, \quad \forall j \in (1, \dots, M). \quad (1.34)$$

В соотношениях (1.29) – (1.34)  $i, N$  – номер продукта и их число;  $j, M$  – номер стадии ХТС и их число;  $V_j$  – размер основного аппарата стадии  $j$  (непрерывная переменная);  $N_j$  – число идентичных аппаратов стадии  $j$  (фиксировано);  $B_i$  – размер партии  $i$ -го продукта;  $Q_i = \theta_i$  – объем выпуска  $i$ -го продукта (неопределенный параметр с нормальным законом распределения вероятности внутри диапазона  $[\theta_i^L; \theta_i^U]$ );  $p_i$  – предполагаемая рыночная цена единицы массы  $i$ -го продукта;  $\delta$  – нормативный коэффициент окупаемости капитальных затрат на основное оборудование;  $\alpha_j, \beta_j$  – коэффициенты зависимости стоимости аппарата стадии  $j$  от его основного размера;  $E_\theta$  – математическое ожидание по параметрам  $\theta$ ;  $S_{ij}$  – фактор размера аппарата стадии  $j$  при выпуске  $i$ -го продукта (размер аппарата, необходимый для выпуска единицы массы продукта;  $t_{ij}$  – период времени, необходимый для производства  $i$ -го продукта в единице оборудования стадии  $j$ ;  $T_{Li}$  – длительность цикла выпуска  $i$ -го продукта;  $H$  – время, отведенное на выпуск продукции.

Расчет ожидаемой прибыли от реализации продукции требует вычисления интеграла

$$E_\theta \left[ \max_{Q_i} \sum_{i=1}^N p_i Q_i \right] = \int_{\theta \in R(V_j, N_j)} \max_{Q_i} \left\{ \sum_{i=1}^N p_i Q_i \right\} J(\theta) d\theta, \quad (1.35)$$

где  $J(\theta)$  – функция распределения вероятности неопределенных параметров  $\theta$ .

Интеграл необходимо привести к диапазону производительности установки  $R(V_j, N_j)$ , верхняя граница которого лимитируется выбором АО ХТС а нижняя – плановым объемом выпуска продуктов.

В работе [60] дается постановка общей задачи и для случая, когда неопределенными параметрами также являются факторы размеров аппаратов  $S_{ij}$  и длительности переработки партий продуктов на стадиях  $t_{ij}$ . Предполагается, что эти параметры взаимно независимы, закон распределения вероятности для всех них является нормальным и они могут принимать различные дискретные значения из фиксированных интервалов неопределенности в соответствии с множеством возможных сценариев. Каждому сценарию  $p \in (1, \dots, P)$  соответствует весовой коэффициент  $\omega^p$ , сумма которых равна единице. Задача поиска оптимального варианта АО ХТС формулируется с учетом всех возможных сценариев, для каждого из которых определяются оптимальные объемы выпуска продуктов.

В работе [60] представлена также постановка задачи определения АО многоцелевых ХТС в условиях неопределенности значений параметров  $Q_i, S_{ij}, t_{ij}$ . В этой постановке ограничения (1.31), (1.32) заменяются соотношениями, подобными (1.28). Рассмотрен и вариант нескольких возможных маршрутов переработки партий каждого продукта, т.е. постановка задачи при отсутствии допущения (iv). Для этого варианта дополнительно формируются все возможные комбинации маршрутов выпуска разных продуктов и для каждой из них определяются последовательности  $S_k, k = \overline{1, K}$  и множества  $M_i$  (см. п. 1.3.1). Оптимизация режима функционирования АО многоцелевой ХТС в этой ситуации предусматривает также выбор наилучшей комбинации маршрутов выпуска продуктов.

Еще одна довольно популярная модификация постановки задачи определения АО ХТС периодического действия в условиях неопределенности объемов выпуска продуктов – задача увеличения производительности ХТС в течение планируемого периода выпуска фиксированного ассортимента продуктов (см. [61 – 63]). Одна из последних публикаций на эту тему – работа [61], где формулировка задачи в целом соответствует (1.29) –

(1.34), а целью ее решения является определение стратегии увеличения числа основных аппаратов на стадиях, лимитирующих значения  $T_{Li}$ ,  $i \in (1, \dots, N)$  (см. (1.34)), которая обеспечивает прогнозируемое увеличение производительности ХТС по продуктам в течение периода  $H$ . Дополнительными определяемыми параметрами в этой постановке являются номера стадий, где увеличивается число основных аппаратов (в рамках ограничения  $N_j^L \leq N_{jt} \leq N_j^U$ ,  $j = 1, M$ ,  $t = 1, T$ , где  $t$  – номер периода работы ХТС без изменения АО ее стадий), количество вновь вводимых аппаратов и сроки начала эксплуатации каждого из них. Отмечается, что учет возможности постепенного увеличения производительности ХТС приводит к более эффективным проектным решениям с точки зрения общей прибыли от работы ХТС, чем определение ее АО при максимальной прогнозируемой производительности.

Оценивая полноту учета в постановке задачи (1.29) – (1.34) особенностей АО ХТС МХП и режима их функционирования, рассмотренных в разделе 1.2, следует добавить к замечаниям 1 – 5 п. 1.3.1 игнорирование возможности оснащения стадий ХТС основными аппаратами непрерывного действия, отсутствие указаний на порядок выбора фиксированных значений  $N_j$ , рассмотрение параметров  $V_j$  как изменяющихся непрерывно. С другой стороны, вызывает сомнения допущение о нормальном законе распределения вероятностей неопределенных параметров и отсутствии их взаимного влияния, обоснованность выбора допустимых диапазонов их изменения. Заметим также, что анализ нашего собственного опыта постановки и решения задач определения АО ХТС МХП, оптимизации режима его функционирования в условиях неопределенности [64 – 66], примеров, приведенных в [56, 58, 60], в публикациях по оптимизации проектирования и управления химико-технологическими процессами в условиях неопределенности [67 – 73] (коэффициентов в математических моделях, параметров управления работой установок и др.) приводит к выводу: запас производительности, появляющийся в результате учета неопределенности тех или иных параметров, обычно имеет тот же порядок, что и выбранный интервал неопределенности.

Что же касается задачи увеличения производительности ХТС в течение планируемого периода ее работы, то предположение о непременном увеличении спроса на продукцию фиксированного ассортимента в течение пяти или даже десяти лет (см. [61]) не выглядит достаточно обоснованным. Спрос на продукцию МХП подвержен постоянным изменениям, в последние годы нам неоднократно приходилось сталкиваться с ситуациями уменьшения объемов производства некоторых продуктов, а в течение пяти (и, тем более, десяти) лет вполне возможна полная смена ассортимента продукции ХТС МХП.

### 1.3.3. Постановки задач оптимизации режима функционирования ХТС периодического действия

К числу первых публикаций, где кроме задачи определения АО ХТС сформулирована задача оптимизации режима его функционирования, относятся работы [2, 3, 24]. В них поставлена задача оптимизации расписания функционирования оборудования ХТС в целом и каждой ее аппаратурной стадии (минимизации общего времени простоев основного оборудования) с учетом возможности произвольного сдвига друг относительно друга циклов работы нескольких идентичных основных аппаратов стадий ХТС. Определяемыми параметрами этой задачи являются значения  $T_{ihj}^h, T_{ihj}^k$  моментов начала и окончания каждого цикла (l) работы каждого основного аппарата (h) каждой стадии ХТС (j) при выпуске каждого продукта (i), с использованием которых вычисляются продолжительности выпуска продуктов в плановых объемах. Предлагается уточнять АО ХТС и характеристики режима его функционирования в результате итерационного процесса последовательного решения задач определения АО стадий ХТС (в постановке, аналогичной (1.24) – (1.27)) и оптимизации расписания функционирования ее основной аппаратуры.

В работах [74 – 76] высказывается мнение, что допущение (iii) о выпуске каждого из продуктов ХТС сразу в плановом объеме  $Q_i$  может привести к завышенной оценке периода ее эксплуатации и, как следствие, к выбору размеров оборудования с большим запасом. При замене допущения (iii) допущением о возможности "смешанного выпуска продуктов", т.е. выпуска партий разных продуктов в произвольной последовательности с возможностью хранения партий полупродуктов между стадиями их переработки в течение любого необходимого периода вре-

мени, ограничение (1.31) принимает вид  $\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{B_i} t_{ij} \leq H$ ,  $\forall j \in (1, \dots, M)$ , а соотношение (1.32) становится излишним.

Оптимизация режима функционирования АО ХТС в случае "смешанного выпуска продуктов" предусматривает определение последовательности выпуска партий продуктов выбранного ассортимента, позволяющей максимально сократить простой оборудования стадий. В [4] отмечается, что в этом случае возникают проблемы учета стоимости промежуточного хранения и необходимости очистки аппаратов при смене продуктов. Заметим, что вторая проблема стоит в МХП настолько остро (отмывка аппаратов ХТС при переходе на выпуск другого продукта обычно продолжается несколько суток), что возможность "смешанного выпуска продуктов" выглядит малореальным теоретическим изыском.

В большинстве публикаций второй половины 1980-х и 1990-х гг. на тему оптимизации режима функционирования АО ХТС периодического действия (предварительно выбранного [2, 13, 25, 50, 74, 75, 77, 79 – 82, 84 – 88, 90] или определяемого совместно с характеристиками режима [4, 53, 55, 59, 76, 78, 83, 89]) рассматриваются многоцелевые ХТС, а допущения (iii), (iv) опускаются. Требование выпуска каждого продукта выбранного ассортимента в плановом объеме течение указанного периода эксплуатации ХТС сохраняется, но число "кампаний" [4] его выпуска и число партий, выпущенное в каждой "кампании", подлежат определению, причем

число одновременно выпускаемых продуктов и маршруты переработки их партий в разных "кампаниях" могут быть неодинаковыми. Другими словами, рассматриваемые в этих публикациях задачи оптимизации режима функционирования фактически являются задачами календарного планирования работы многоцелевых ХТС, причем большинство – на сравнительно короткий период (до десяти суток), см. [78, 80 – 83, 86 – 88, 90]. Заметим, что в этих публикациях допущения (i), (ii) обычно сохраняются, однако в некоторых из них основным структурным элементом ХТС считается не стадия (аппаратурная), а отдельный основной аппарат, пригодный для реализации некоторых процессов.

Одна из наиболее полных постановок задачи календарного планирования многоцелевой ХТС совместно с задачей определения АО ее стадий дана в [4]. При ее разработке приняты следующие допущения:

- 1) время переработки партий продуктов в аппаратах не зависит от размера партии, т.е. оборудование, работающее в полунепрерывном режиме, не рассматривается;
- 2) маршруты выпуска продуктов включают фиксированное число цепочек аппаратов, разделенных емкостями-накопителями, причем расположение емкостей фиксировано, а определение их размеров не рассматривается;
- 3) каждый маршрут выпуска конкретного продукта используется один раз – для выпуска оптимального числа партий (возможно, нулевого);
- 4) рассматриваются только емкостные аппараты стандартных размеров.

В качестве критерия оптимальности используется прибыль от функционирования ХТС

$$NPV = -Pc + (Ry - Oc)(1 - tx) prcoef + \frac{Pc}{Ny} tx prcoef, \quad (1.36)$$

где  $Pc = \sum_k \alpha_k V_k^{\beta_k}$  – капитальные затраты на оборудование;  $V_k$  – объем  $k$ -го аппарата;

$Oc = 0,5 \sum_p \mu_p Q_p P + \min tNr$  – производственные расходы;  $Q_p$  – рыночный спрос на  $p$ -й продукт;  $P$  – длительность производственного цикла;  $\mu_p$  – отношение стоимости единицы массы запаса  $p$ -го продукта к длительности цикла;  $Nr$  – число повторений производственного цикла;  $\min t$  – затраты на возобновление цикла;  $Ry$  – суммарный годовой доход от продажи продукции;  $Ny$  – предполагаемый срок работы установки (число лет);  $tx$  –

налоговый коэффициент;  $prcoef = \frac{(1 + in)^{Ny} - 1}{in(1 + in)^{Ny}}$  – коэффициент текущей стоимости;  $in$  – норма прибыли.

Необходимо найти максимум функции (1.36) при условиях, которые для случая фиксированных маршрутов выпуска продуктов с учетом возможности хранения промежуточных продуктов включают:

1. Условия отсутствия "столкновений" между "кампаниями" выпуска продукта с применением различных маршрутов

$$\bar{t}_h + (nb_h - 1)Tl_h + \sum_{k'=1}^k d_{hk'} \leq \bar{t}_{h'} + \sum_{k'=1}^{k-1} d_{h'k'} + W(1 - y_{hh'k}), \quad \forall (h, h', k) \in R; \quad (1.37)$$

$$\bar{t}_{h'} + (nb_{h'} - 1)Tl_{h'} + \sum_{k'=1}^k d_{h'k'} \leq \bar{t}_h + \sum_{k'=1}^{k-1} d_{hk'} + W(1 - y_{hh'k}), \quad \forall (h, h', k) \in R, \quad (1.38)$$

где  $\bar{t}_h$  – момент начала переработки первой партии по  $h$ -му маршрута;  $nb_h$  – число партий, произведенное на  $h$ -м маршруте в течение производственного цикла;  $Tl_h = \max_{k \in M} \{d_{hk}\}$  – длительность цикла  $h$ -го маршрута;  $d_{hk}$  – длительность процесса в  $k$ -м аппарате для  $h$ -го маршрута;  $M$  – множество аппаратов  $h$ -го маршрута;  $W$  – верхняя граница фонда рабочего времени ХТС;  $y_{hh'k}$  – двоичная переменная, принимающая единичное значение если партии  $h$ -го маршрута перерабатываются в  $k$ -м аппарате раньше, чем партии  $h'$ -го маршрута;  $R$  – множество вариантов работы аппаратов ХТС без простоев между реализацией последовательных маршрутов и без "столкновений" между ними.

2. Выражение для определения длительности производственного цикла

$$P \geq \bar{t}_h + (nb_h - 1)Tl_h + \sum_{k'=1}^k d_{hk'} - \left( \bar{t}_{h'} + \sum_{k'=1}^{k-1} d_{h'k'} \right), \quad \forall (h, h', k) \in R, \quad (1.39)$$

при условии, что число его повторений  $Nr = W/P$  является целым.

3. Условия работы емкостей-накопителей

$$\bar{t}_h + \sum_{k'=1}^{|K|} d_{hk'} \leq \bar{t}_{h'}, \quad \forall (h, h') \in F; \quad (1.40)$$

$$\frac{B_h}{Tl_h} = \frac{B_{h'}}{Tl_{h'}}, \quad \forall (h, h') \in F, \quad (1.41)$$

где  $K$  – множество аппаратов;  $F$  – множество пар маршрутов, разделенных одной и той же емкостью-накопителем;  $B_h$  – размер партии для  $h$ -го маршрута;

#### 4. Проектные ограничения

$$Nrn b_h = \frac{q_h}{B_h}, \quad \forall h; \quad (1.42)$$

$$V_k \geq S_{hk} B_h, \quad \forall (h, k) \in M; \quad (1.43)$$

$$Nr \sum_{h:(h,p) \in C, h \in H} q_h \geq Q_p, \quad \forall p; \quad (1.44)$$

$$V_k = \sum_{i=1}^{S_k} v_{ki} x_{ki}, \quad \sum_{i=1}^{S_k} x_{ki} = 1, \quad (1.45)$$

где  $q_h$  – объем выпуска  $p$ -го продукта по  $h$ -му маршруту в течение производственного цикла (соответствие продуктов маршрутам предварительно устанавливается множеством  $C = \{(h, p)\}$ );  $S_{hk}$  – фактор размера  $k$ -го аппарата при обработке партий  $h$ -го маршрута;  $H$  – множество производственных маршрутов;  $x_{ki}$  – двоичная переменная, значение которой равно 1, если  $k$ -й аппарат имеет размер  $v_{ki}$  из множества стандартных размеров  $V_k = \{v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kS_k}\}$ .

Определяемыми параметрами задачи (1.36) – (1.45) являются тройки  $(h, h', k)$ , принадлежащие множеству  $R$ , и пары  $(h, h')$ , принадлежащие множеству  $F$ , переменные  $x_{ki}$ , а также моменты начала переработки первой партии по каждому маршруту, число и размер партий, произведенных на нем в течение производственного цикла. Другими словами, задача заключается в определении возможных маршрутов следования партий продуктов через аппараты системы, минимизации продолжительности ее производственного цикла на множестве вариантов работы аппаратов ХТС без простоев между реализацией последовательных маршрутов и без "столкновений" между ними, определении числа и размеров партий продуктов для каждого маршрута, рабочих объемов основных аппаратов системы.

Очевидно, что система допущений, принятых при разработке математической формулировки задачи (1.36) – (1.45), не выдерживает критики с точки зрения учета особенностей функционирования оборудования ХТС МХП, рассмотренных в разделе 1.2. Кроме того, вызывает сомнения сама концепция формирования ХТС как совокупности отдельных аппаратов: авторы [4] не касаются вопросов определения их количества, типов и исполнения, а говорят о формировании множеств  $C = \{(h, p)\}$ ,  $R = \{(h, h', k)\}$ ,  $F = \{(h, h')\}$  и других на фиксированном множестве аппаратов. Другими словами, речь может идти об оптимизации функционирования имеющегося в распоряжении набора технологического оборудования при выпуске продукции определенного ассортимента, однако соотношения (1.43) для определения размеров аппаратов указывают на проектирование производства.

Начиная со второй половины 1990-х гг., весьма популярной при рассмотрении режима функционирования АО ХТС периодического действия стала концепция "событий" в реальном времени функционирования ХТС: операционное событие – операция (реализация какой-либо стадии выпуска какого-либо продукта) начинается в каком-либо аппарате, аппаратное событие – аппарат начинает осуществлять какую-либо операцию [86 – 88]. Наиболее полно эта концепция представлена в работе [89], где рассматривается задача определения структуры материальных потоков ХТС, определение АО ее стадий и расписания функционирования.

Задача формулируется следующим образом: при заданных регламентах выпуска продуктов (длительностях операций в подходящих аппаратах и материальных индексах), интервалах производительности аппаратов, подходящих для переработки и хранения материалов, способе хранения материалов, требованиях к объемам и сроку выпуска продукции определить тип, число, основные размеры единиц оборудования и расписание его функционирования (оптимальную последовательность операций для каждого аппарата, количество материалов, перерабатываемое в каждом аппарате в каждый момент времени, время выполнения каждой операции в каждом аппарате) так, чтобы минимизировать капитальные затраты, либо максимизировать общую прибыль.

С точки зрения особенностей функционирования оборудования ХТС МХП, рассмотренных в разделе 1.2, формулировка задачи в [89] отличается от (1.36) – (1.45) только учетом возможности использования основных аппаратов непрерывного действия. Также неясны вопросы определения типа и числа используемых аппаратов. Что же касается концепции "событий" в реальном времени функционирования ХТС, то она представляет интерес с точки зрения более детального (пооперационного) рассмотрения циклов работы основных аппаратов стадий ХТС.

Еще один, "операционный", подход к планированию и расписанию работы периодических химических установок предложен в работе [90], целью которой заявлена разработка общей методологии решения проблемы определения планов выпуска продукции и расписания функционирования периодического производства, максимизирующих прибыль. Процесс выпуска конкретного продукта (переработки его партии) разбивается на операции, каждая из которых ( $i$ -я) включает  $K_i$  операторов (оборудование, персонал). В моменты времени  $t_{ij}^1, t_{ij}^2$   $j$ -я партия поступает на  $i$ -ю операцию и выходит с нее (эти моменты могут не совпадать с моментами начала и окончания переработки партии – учитывается и ожидание освобождения необходимого оператора). Если один и тот же оператор может входить в разные операции, он моделируется как ресурс. Преимущества этого подхода:



1) возможность группирования операторов с подобными характеристиками и формирования блоков ограниченного вида – если регламент переработки партии продукта включает  $i$ -ю операцию, то она обязательно будет реализована одним из  $K_i$  пригодных для этого операторов; 2) возможность моделирования схем параллельной переработки (с использованием нескольких параллельных операторов) и учета различной производительности разных операторов (особенности оборудования и разная квалификация персонала может приводить к различной продолжительности выполнения одной и той же операции); 3) назначение партий операциям конструирует расписание, т.е. время процесса можно моделировать как непрерывный параметр (отпадает необходимость введения двоичных переменных, характеризующих выполнение операций операторами в пределах предварительно заданных интервалов времени).

Одно из допущений, принятых авторами [90] при постановке задачи оптимизации расписания функционирования фиксированного набора оборудования (операций и операторов), – целостность партии, однако отмечается, что в практике реализации ряда периодических процессов допускается их смешение и дробление. Кроме того, допущение об использовании конкретного оператора для реализации операций только одного вида также не является справедливым для всех типов оборудования: некоторые операторы (ресурсы, см. выше) могут осуществлять различные операции.

Предложенный в [90] подход перспективен с точки зрения особенностей функционирования оборудования ХТС МХП, рассмотренных в разделе 1.2. Однако отметим, что операции дробления партий рассматриваются как транспортные (ни одна из долей не переходит на следующую операцию, пока вся партия не переработана), а смешение партий допускается при их промежуточном хранении в емкостях-накопителях.

Автором работы [91] предпринята попытка дать обобщенную математическую постановку задачи определения АО и оптимизации режима функционирования ХТС периодического действия, в которой были бы учтены все основные особенности функционирования периодических производств, различные способы выпуска продуктов указанного ассортимента, а также неопределенность ряда параметров. В качестве критерия оптимизации используются приведенные затраты на выпуск продукции, а из анализа технологических ограничений можно сделать вывод, что автор придерживается допущений (i), (ii), (iv). Что касается способов выпуска продуктов, то рассмотрены варианты их последовательной (допущение (iii)), циклической наработки (выпуск продуктов повторяющимися циклами постоянного состава, аналогично [4]) и выпуск продуктов группами (одновременно, при фиксированных маршрутах переработки партий каждого продукта).

В работе [91] использовано понятие "гибкости производства", т.е. его способности реализовать весь комплекс процессов синтеза продуктов указанного ассортимента и достичь максимального уровня рентабельности в условиях неопределенности некоторых технологических (коэффициенты переноса, константы реакций, физико-химические свойства веществ) и экономических параметров (рыночные цены сырья и продуктов). Предложен способ оценки количественной меры "гибкости" аппаратурных модулей (стадий) и ХТС в целом, постановка задачи предусматривает достижение максимального уровня гибкости системы. Вопросы обоснования выбора границ допустимых интервалов изменения неопределенных параметров, закона распределения вероятности их значений внутри интервалов, их взаимного влияния не обсуждаются.

Что касается режима функционирования ХТС, то для каждой возможной последовательности выпуска продуктов (согласно выбранному способу их выпуска) определяются моменты начала переработки сырья для получения каждого продукта и завершения его выпуска с использованием значений  $\tau_{ij}$  и  $T_{\delta i}$  (см. (1.16)) в рамках периода составления расписания функционирования ХТС.

Отмечая, что в предложенной автором [91] постановке задачи учтена возможность применения основного оборудования непрерывного действия и его совместного функционирования с основным оборудованием соседних стадий, возможность секционирования ХТС с помощью емкостей-накопителей, возможность порционной загрузки и разгрузки аппаратов стадий ХТС, использования в одном и том же аппаратурном модуле параллельных основных аппаратов разных размеров, отметим и те особенности ХТС МХП, которые в ней не учтены:

- 1) применение основных аппаратов периодического действия, определяющим размером которых является рабочая поверхность (фильтры, сушилки);
- 2) ряд вариантов совместной работы основных аппаратов соседних стадий, не разделенных емкостями-накопителями;
- 3) возможность параллельной реализации стадий подготовки компонентов для основных химических реакций;
- 4) возможность переработки партий продуктов на стадиях равными порциями (последовательно или параллельно), объединения нескольких партий для совместной переработки.

Заметим также отсутствие в явном виде требований целочисленности значений  $N_j$  и дискретности  $X_j$ , хотя в тексте [91] указывается на оснащение аппаратурных модулей стандартными аппаратами.

Таким образом, ни одна из представленных в научных публикациях последних 35 лет постановок задач определения АО и режима функционирования ХТС периодического действия не учитывает всех особенностей функционирования оборудования ХТС МХП, рассмотренных в разделе 1.2, которые требуют детального (по-операционного) рассмотрения циклов работы основных аппаратов стадий ХТС при выборе их АО. Отметим также, что ни в одной из публикаций определение АО ХТС периодического действия и характеристик режима его функционирования не рассматривается как итерационный процесс последовательного решения задач разного уровня иерархии, см. раздел 1.1.2: определение характеристик режима функционирования ХТС (задача  $AO_s$  – верхний уровень), выбор АО каждой стадии ХТС и способов переработки партий продуктов ее основными аппаратами (задачи  $AO_{sj}$  – нижний уровень).

### 1.3.4. Методы решения задач определения АО и режима функционирования ХТС периодического действия

В постановках задач, ориентированных на оснащение стадий ХТС аппаратами стандартных размеров (дискретность параметров  $X_j, j = \overline{1, J}$ ) или (и) поиск (не предварительное фиксирование) числа основных аппаратов стадий (целочисленных значений  $N_j, j = \overline{1, J}$ ) [2, 4, 10, 21, 30 – 33, 45, 48, 55], задача определения АО ХТС периодического действия относится к классу задач смешанного дискретно-нелинейного программирования. В англоязычных публикациях используется аббревиатура MINLP – mixed integer-nonlinear programming [44]. Для решения этих задач предложены эвристические алгоритмы ("основной стадии" [30, 45], "гипотетического продукта" [21], декомпозиционный [92, 93]), методы геометрического программирования [2, 48], а также алгоритмы, основанные на стратегии ветвей и границ [21, 50] и локальной оптимизации [31 – 33] (с применением эвристики для выбора начальных приближений, способа ветвления, формирования окрестностей допустимых решений).

Применение эвристических методов позволяет быстро находить допустимые решения задачи (приемлемые для практики варианты АО ХТС), однако говорить об оптимальности этих решений нет оснований. Что касается методов геометрического программирования, то сохранение ограничений на целочисленность параметров  $N_j, j = \overline{1, J}$  и дискретность параметров  $X_j, j = \overline{1, J}$  (см. [48]) приводит к задаче геометрического программирования в сигномиальной форме [94], т.е. к многоэкстремальной задаче, причем поиск глобального экстремума целевой функции встречает серьезные трудности [95]. В [44, 46] исходная задача сводится к задаче геометрического программирования в позиномиальной форме [94], имеющей единственный экстремум [44], который может быть найден классическими методами нелинейного программирования (например, с помощью модификаций метода градиента [46, 96]). Однако для этого авторам [44, 46] пришлось отказаться от условий целочисленности  $N_j, j = \overline{1, J}$  и дискретности  $X_j, j = \overline{1, J}$ , а также ослабить ограничение вида (1.32), записав его в форме

$$T_{Li} \geq \frac{t_{ij}}{N_j}, \forall i \in (1, \dots, N), \forall j \in (1, \dots, M), \text{ т.е. переформулировать исходную задачу в виде задачи нелинейного}$$

программирования. Заметим, что для решения задачи в аналогичной постановке (с единственным исключением – применением режима выпуска партий продуктов без перекрытия, т.е. записи (1.32) в форме

$$T_{Li} = \sum_{j=1}^J t_{ij}, \forall i \in (1, \dots, N)), \text{ авторы [19, 20] использовали модификации методов прямого поиска Хука-Дживса и}$$

метода градиента [96, 97].

Предложенная в [21] стратегия ветвей и границ, использует упрощение  $N_j \leq 3, j = \overline{1, J}$ , позволяющее сформировать все возможные варианты АО стадий ХТС и определить связанные с ними затраты на основное оборудование. Ветвление осуществляется путем последовательного фиксирования пар значений  $N_j, X_j, j \in (1, \dots, J)$ , причем стадии рассматриваются в порядке уменьшения затрат на их АО, а варианты АО стадий – в порядке возрастания затрат. Для отсеивания методом "гипотетического продукта" решается исходная задача при фиксированных значениях  $N_j, X_j, j \in (1, \dots, J)$ , причем авторы [21] отмечают трудности, связанные с обеспечением выполнения ограничения (1.31).

Остановимся подробнее на методике решения задачи (1.10) – (1.23), предложенной нами в [31 – 33] для определения АО ХТС в рамках перебора всех возможных вариантов ее секционирования путем введения групп емкостей-накопителей. Основой для разработки методики послужила стратегия локальной оптимизации, применяемая для решения задач дискретного программирования [98, 99], которая предусматривает выбор начального допустимого решения, выбор метрики пространства допустимых решений и построение окрестности начального решения, поиск лучшего решения окрестности и его сравнение с начальным. Если лучшее решение окрестности предпочтительнее начального, формируется его окрестность и т.д. В противном случае оптимальным считается начальное решение. Могут быть предприняты попытки его улучшения путем изменения условий формирования окрестности.

Путем упрощения соотношения (1.16) до  $T_i = \max_{s \in S_i} \left\{ \frac{Q_i}{w_i^s} T_{wi}^s \right\}, i = \overline{1, I}$  и вычисления значений длительностей

выпуска продуктов с точностью до 1 сут. (достаточной для практики составления расписания функционирования ХТС МХП в 1970 – 80-х гг.) задача (1.10) – (1.23) была переформулирована в виде задачи дискретного программирования с параметрами  $N_j, X_j, j = \overline{1, J}; T_i, i = \overline{1, I}$ . С учетом практики проектирования АО ХТС МХП [5 – 7] и вида целевой функции (1.10) обосновано стремление к использованию на стадиях ХТС минимального числа основных аппаратов. Формализованы правила определения минимально допустимого числа основных аппаратов для стадий, оснащаемых емкостным оборудованием периодического действия, фильтрами и сушилками непрерывного действия. Сформулированы условия существования допустимого решения задачи при фиксированных значениях  $N_j, j = \overline{1, J}$ , названные Е.Н. Малыгиным "условиями проектируемости" АО ХТС [32]: необходимые (условие совместимости продуктов, т.е. принципиальной возможности одновре-

менного выполнения ограничений (1.11), (1.12) при выпуске каждого продукта, и условие существования размеров стандартных аппаратов  $X_j \in [X_j^{\min}, X_j^{\max}] \cap XS_j, j = \overline{1, J}$ , обеспечивающих выполнение этих ограничений), необходимое и достаточное (условие существования комбинации значений  $X_j \in [X_j^{\min}, X_j^{\max}] \cap XS_j, j = \overline{1, J}$ , обеспечивающей выполнение условия (1.15)). Определены направления изменения значений  $N_j, j \in (1, \dots, J)$  в случаях, когда какие-либо из "условий проектируемости" не выполняются.

Предложенная в [31 – 33] методика решения задачи (1.10) – (1.23) предусматривает:

1. Определение комбинации  $N_* = (N_{1*}, N_{2*}, \dots, N_{J*})$  минимально допустимых значений числа основных аппаратов стадий ХТС и проверка выполнения "условий проектируемости". При отрицательном результате проверки – использование рекомендаций по изменению (увеличению) значений  $N_{j*}, j \in (1, \dots, J)$ , способствующих выполнению соответствующих условий.

2. Поиск лучшего решения задачи при  $N_j = N_{j*}, j = \overline{1, J}$ . Разработанный нами алгоритм поиска предусматривает направленный перебор комбинаций значений  $X_j \in [X_j^{\min}, X_j^{\max}] \cap XS_j, j = \overline{1, J}$ , для которых выполняется условие (1.15).

3. Формирование окрестности начального решения – комбинаций значений числа аппаратов на стадиях ХТС, сумма элементов которых превышает сумму элементов комбинации  $N_* = (N_{1*}, N_{2*}, \dots, N_{J*})$  на предварительно зафиксированное целое число (называемое "радиусом окрестности"). Показано, что имеет смысл рассматривать только те комбинации, где увеличение значений  $N_{j*}, j \in (1, \dots, J)$  приводит к изменению значений  $T_{0i}, i \in (1, \dots, I)$ , см. (1.17).

4. Проверка выполнения "условий проектируемости" для всех вновь сформированных комбинаций значений  $N_j, j = \overline{1, J}$ , причем теперь их изменение с целью обеспечения выполнения "условий проектируемости" уже не допускается. При положительном результате проверки для соответствующей комбинации значений  $N_j, j = \overline{1, J}$  выполняется п. 2.

5. Если лучшее среди полученных таким образом решений задачи окажется предпочтительнее начального, формируется его окрестность и т.д. В противном случае оптимальным считается начальное решение.

В [33] приведены результаты многочисленных вычислительных экспериментов с использованием исходных данных для проектирования АО нескольких десятков реальных ХТС производств синтетических красителей и полупродуктов при значениях "радиуса окрестности", равных 1 и 2. На основании этих экспериментов сделан вывод, что в большинстве случаев (более 85 %) лучшим решением оказывается начальное, т.е. соответствующее минимально возможному числу основных аппаратов на стадиях ХТС.

В конце 1980-х, начале 1990-х гг. предлагались различные трансформации задачи в постановке, предусматривающей минимизацию второй составляющей критерия (1.29) при условиях (1.30) – (1.32), (1.34), с целью получения решения, которое соответствовало бы глобальному экстремуму целевой функции, см. [56, 58, 59, 100]. Одним из наиболее популярных способов обеспечения ее выпуклости является представление параметров задачи в экспоненциальной форме [101]:  $V_j = \exp(v_j), j = (1, \dots, M); B_i = \exp(b_i), T_{Li} = \exp(t_{Li}), i = (1, \dots, N)$ . В результате математическая постановка задачи примет вид [60]:

$$\min_{v_j, b_i} \delta \sum_{j=1}^M \alpha_j \exp(\beta_j v_j) N_j \quad (1.83)$$

при условиях

$$v_j \geq \ln(S_{ij}) + b_i, \forall i \in (1, \dots, N), \forall j \in (1, \dots, M); \quad (1.84)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_i \exp(t_{Li} - b_i) \leq H, \forall q \in (1, \dots, Q); \quad (1.85)$$

$$t_{Li} \geq \ln\left(\frac{t_{ij}}{N_j}\right), \forall i \in (1, \dots, N), \forall j \in (1, \dots, M); \quad (1.86)$$

$$\ln(V_j^L) \leq v_j \leq \ln(V_j^U), \forall j \in (1, \dots, M); \quad (1.87)$$

$$\max_j \left\{ \ln\left(\frac{V_j^L}{S_{ij}}\right) \right\} \leq b_i \leq \min_j \left\{ \ln\left(\frac{V_j^U}{S_{ij}}\right) \right\}, \forall i \in (1, \dots, N). \quad (1.88)$$

Задача (1.83) – (1.88) является задачей нелинейного программирования и может быть решена с помощью стандартных процедур. Однако в [60] отмечается, что несмотря на выпуклость целевой функции (1.83) задача в целом не является выпуклой из-за ограничения (1.85), и предлагаются способы его приведения к псевдовыпуклым формам, позволяющие получать решения, весьма близкие к глобальному оптимуму. Аналогичный подход

предложен авторами [60] к решению задачи (1.29) – (1.34) в условиях неопределенности объемов выпуска продуктов и технологических параметров  $S_{ij}, t_{ij}$ , причем для вычисления интеграла (1.35) предложено использовать квадратуру Гаусса [102].

Авторы [61] дополнительно осуществляют экспоненциальную трансформацию параметров  $N_j, j = \overline{1, J}$ :

$$N_j = \exp(n_j), n_j = \sum_{r=N_j^L}^{N_j^U} y_{ir} \ln(r), \quad \text{где } \sum_{r=N_j^L}^{N_j^U} y_{ir} = 1 \text{ и предлагают решать задачу увеличения производительности ХТС}$$

в два этапа: вначале оптимизировать план выпуска продукции при неизменном АО стадий (решить задачу, подобную (1.29) – (1.34), используя только первую составляющую критерия), а затем решить выпуклую задачу минимизации капитальных вложений, обеспечивающих планируемое увеличение производительности системы.

В работах [4, 55, 103] предлагается другой способ трансформации задачи определения АО ХТС периодического действия – линеаризация нелинейных ограничений и составляющих целевой функции (трансформация MINLP в MILP – задачу смешанного дискретно-линейного программирования). Например, авторы [4] предлагают следующую схему линеаризации ограничений (1.42), (1.43):

а) объединить эти ограничения в одно –  $Nrn b_h \geq \frac{S_{hk} q_h}{V_k}, \forall (h, k) \in M$ , а затем, с учетом эквивалентности

$$(1.45) \text{ и выражения } \frac{1}{V_k} = \sum_{i=1}^{S_k} \frac{x_{ki}}{v_{ki}}, \text{ переписать результат в виде } Nrn b_h \geq \sum_{i=1}^{S_k} \frac{S_{hk} q_h}{v_{ki}} x_{ki}, \forall (h, k) \in M;$$

б) произведение в левой части этого неравенства заменить на  $\sum_{s=1}^{\setminus SV} \text{ord}(s) \text{ar} n b_{hs}$ , где  $SV = \{s\}$  – множество,

элементы которого характеризуют число повторений элементарного расписания;  $\text{ord}(s)$  – порядковый номер элемента  $s$  в множестве  $SV$ ;  $\text{ar} n b_{hs}$  – элемент прямоугольной матрицы, значение которого должно удовлетворять ограничениям  $\sum_h \text{ar} n b_{hs} \leq U r_s, \forall s, \sum_s \text{ar} n b_{hs} = n b_h, \forall h$ ;  $r_s$  – двоичная переменная, значение которой равно 1,

если элементарное расписание повторяется  $s$  раз;  $U$  – верхняя граница числа партий, проходящих все маршруты в течение одного цикла работы системы (P);

в) произведение параметров  $q_{h \times k_i}$  в левой части неравенства заменить элементом  $\text{ar} q_{hi}$  прямоугольной матрицы, значение которого удовлетворяет ограничениям  $\sum_{h:(h,k) \in M, h \in H} \text{ar} q_{hi} \leq Y x_{ki}, \forall k, i, \sum_{i=1}^{S_k} \text{ar} q_{hi} = q_h, \forall (h, k) \in M$ , где

$Y$  – верхняя граница объема выпуска продукта ( $\mathbb{N}_p$ , см. (1.42)) по всем маршрутам.

Таким образом, предлагаемая в [4] схема линеаризации сводится к замене параметров матрицами их возможных значений, т.е. вместо определения значения параметра с помощью двоичных переменных определяется его положение в матрице. Аналогично линеаризуется ограничение (1.44) и слагаемое  $P_c$  (капитальные затраты на оборудование) в целевой функции (1.36). Для решения линеаризованной задачи (1.36) – (1.45) авторы [4] предлагают метод линейного программирования, основанный на стратегии ветвей и границ, который позволяет находить глобальный оптимум.

Предложенные авторами [86 – 90] подходы к решению задач оптимизации расписания функционирования оборудования ХТС периодического действия также базируются на трансформациях исходной задачи смешанного целочисленно-нелинейного программирования в псевдо-линейную форму. В [90] отмечаются трудности решения линеаризованных задач для ХТС реальных производств при длительных сроках их работы (высокая размерность, большое количество допустимых решений).

Заметим, что трансформации задачи определения АО ХТС периодического действия и оптимизации режима их функционирования, позволяющие использовать для их решения модификации классических методов нелинейного или линейного программирования, предусматривают существенные упрощения исходной задачи. Чаще всего не учитывается возможность применения основного оборудования непрерывного действия и связанные с этим проблемы организации его совместной работы с оборудованием периодического действия, ликвидируется требование дискретности значений  $X_j, j = \overline{1, J}$  и (или) целочисленности значений  $N_j, j = \overline{1, J}$ , иногда значения  $N_j, j = \overline{1, J}$  просто фиксируются.

В последние годы для решения моделей проектирования АО ХТС периодического действия и расписания их функционирования предложен ряд методов математического программирования и разработанных на их основе информационных систем [80]. В [90] отмечается свойственная таким системам ограниченность библиотек стандартных тестовых задач и умолчания об их особенностях, влияющих на время решения и требуемые ресурсы.

Таким образом, при достаточно полных постановках задач определения АО ХТС периодического действия и оптимизации режима их функционирования, предусматривающих оснащение их стадий аппаратами стандартных размеров, поиск целочисленных значений  $N_j, j = \overline{1, J}$ , а также учитывающих возможность использования на стадиях оборудования непрерывного действия, для их решения предложены только методы, сопря-

женные с использованием различных эвристик. Этот вывод подтверждает и автор работы [91], предложивший для решения обобщенной задачи формирования структуры, определения АО и расписания функционирования ХТС периодического действия итерационный алгоритм направленного поиска с использованием эвристических правил.

На основании материала данного раздела можно сделать следующие выводы:

1. Определение АО ХТС и характеристик режима его функционирования при выпуске продуктов фиксированного ассортимента – это один из основных этапов проектирования МХП, от результатов выполнения которого во многом зависит качество проекта в целом.

2. Системный подход к проблеме автоматизации выполнения этого этапа позволяет выделить три уровня ее рассмотрения:

1) оптимизация режима функционирования ХТС в целом и оборудования ее аппаратурных стадий (решение задачи  $AO_s$ );

2) определение АО каждой отдельной стадии ХТС, т.е. определяющих геометрических размеров и числа основных и вспомогательных аппаратов (решение задач  $AO_{sj}$ );

3) оптимизация параметров конструкции и режима функционирования каждого основного и вспомогательного аппарата каждой стадии (решение задач  $AS_{sjf}$  технологического и механического расчета аппаратов).

3. Функционирование ХТС МХП характеризуется следующими особенностями, которые необходимо учитывать при разработке математических постановок, методов решения задач определения АО ХТС и характеристик режима его работы:

1) структура материальных потоков ХТС МХП редко бывает линейной и часто неодинакова при выпуске различных продуктов, причем стадии подготовки компонентов для основных химических превращений часто реализуются параллельно;

2) продолжительность переработки партий продуктов основными аппаратами стадий ХТС, где основными аппаратами являются фильтры и сушилки непрерывного и периодического действия, зависит от размеров партий и не может быть зафиксирована предварительно;

3) при оснащении соседних стадий ХТС основными аппаратами, процесс загрузки и разгрузки которых нельзя считать единовременным (подача суспензии в фильтр или сушилку) необходимо выбрать один из возможных способов их совместного функционирования;

4) размеры партий продуктов в ходе их переработки аппаратами стадий ХТС могут изменяться: партия может быть разделена на несколько одинаковых порций для последовательной или синхронной обработки, несколько партий (или долей партии) могут быть объединены для совместной переработки;

5) ХТС может быть разделена группами емкостей-накопителей на ряд секций, функционирующих независимо друг от друга, причем число секций при выпуске разных продуктов может быть неодинаковым.

4. В научных публикациях по проблемам автоматизации определения АО ХТС периодического действия и оптимизации режима его функционирования до настоящего времени не предложены математические формулировки задач, учитывающие весь комплекс особенностей функционирования оборудования МХП. Из предложенных методов решения задач определения АО и оптимизации режима функционирования ХТС для практического применения пригодны лишь те, при разработке которых использованы различные эвристики.

5. Особо отметим, что возможность изменения размеров партий продуктов в процессе их переработки аппаратами стадий ХТС рассматривается в литературе только в контексте промежуточного сбора и хранения полупродуктов [90, 91], что в МХП возможно далеко не всегда. Дробление партий на равные доли для параллельной или последовательной обработки, их объединение для совместной обработки в литературе практически не рассматривается. Между тем, подобные ситуации типичны для ХТС МХП и вызваны стремлением минимизировать число аппаратурных стадий: осуществить одноименные стадии выпуска разных продуктов в одних и тех же аппаратах, в том числе и при значительном разбросе значений их материальных индексов.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНО- ГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

---

Как указано в п. 1.1.2, этап определения АО конкретной ХТС МХП предусматривает решение задачи определения характеристик режима функционирования ХТС и оборудования ее стадий (задачи  $AO_s$ ), задач определения АО стадий ХТС и способов переработки партий продуктов их аппаратами (задачи  $AO_{sj}$ ), а также задач оптимизации параметров конструкции и режима функционирования основных и вспомогательных аппаратов каждой стадии (задачи  $AS_{sjf}$ ). В этой главе рассматриваются предлагаемые нами математические постановки задачи  $AO_s$  и задач  $AO_{sj}$ .

### 2.1. ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОСТАНОВОК ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АО ХТС МХП

В этом разделе формулируются допущения, положенные в основу постановок задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ , определяется структура и состав информационных потоков между этими задачами.

### 2.1.1. Допущения, принятые при постановке задач определения АО ХТС МХП

Нижеследующие допущения сформулированы нами на основе анализа особенностей функционирования оборудования ХТС МХП, в частности, производств химических красителей и полупродуктов (см. п. 1.2):

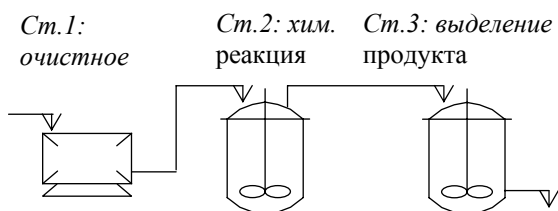
1. Моделируется режим функционирования многопродуктовой ХТС, которая в любой момент времени выпускает единственный продукт.
2. Структура материальных потоков ХТС при выпуске продуктов является параллельно-последовательной [2], т.е. некоторые аппаратные стадии и их совокупности могут одновременно осуществлять различные стадии синтеза продуктов.
3. Возможность разделения ХТС на независимые секции с помощью групп емкостей-накопителей не рассматривается.
4. Аппаратурные стадии ХТС могут быть оснащены основными аппаратами следующих типов: вертикальные емкостные аппараты с перемешивающими устройствами (реакторы, а также емкости для реализации процессов растворения, гомогенизации, суспензирования), аппараты непрерывного и периодического действия для фильтрации и сушки паст, суспензий, растворов.
5. Если аппаратная стадия ХТС включает несколько основных аппаратов, то они имеют одинаковые определяющие геометрические размеры (рабочий объем, рабочая поверхность).
6. Технологический цикл работы основного аппарата любой стадии ХТС состоит из следующих операций: загрузка, физико-химические превращения, выгрузка, очистка.
7. Операции загрузки и выгрузки основных аппаратов стадий ХТС могут быть разделены во времени с операцией "физико-химические превращения" (например, загрузка партии сырья и выгрузка партии полупродукта из емкостного аппарата), а могут и совмещаться с ней (например, подача суспензии в распылительную сушилку или выгрузка фильтрата из фильтр-пресса при очистном фильтровании).
8. Длительность любой операции является либо константой, либо известной функцией количества перерабатываемой массы.
9. Длительности одних и тех же операций одинаковы при выпуске различных партий продукта и реализации различных циклов работы аппаратов.
10. На некоторых стадиях ХТС партии сырья и промежуточных продуктов можно разделять на равные порции для последовательной или синхронной переработки.
11. На некоторых стадиях ХТС возможно объединение нескольких партий сырья и промежуточных продуктов для совместной переработки.

В качестве обоснований допущения 3 можно привести следующие соображения:

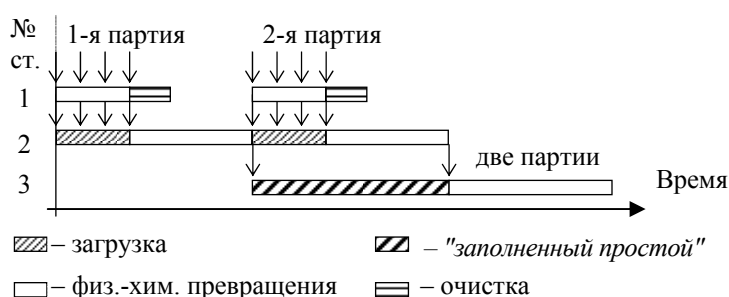
- длительное хранение промежуточных продуктов в МХП обычно не допускается, так как при периодической технологии нельзя исключать изменения их состава в результате побочных процессов;
- смешение различных партий промежуточных продуктов нежелательно, так как условия реализации процессов их переработки (состав сырья, температуры и давления, длительности операций) могут быть неодинаковыми и они, как правило, не идентичны по составу (это может отрицательно сказаться на качестве продукта);
- изменение размеров партий продуктов на некоторых стадиях их переработки является вынужденной мерой, т.е. не предписывается изначально, и может быть реализовано только по решению эксперта.

Заметим также, что задачу АО, для секционированной ХТС можно рассматривать как ряд независимых задач выбора характеристик режима функционирования оборудования разных секций (см. [33]).

Следствием допущений 6, 7, 10, 11 является возможность возникновения, а следовательно, необходимость математического описания следующих ситуаций (см. рис. 2.1):



а) фрагмент ХТС:  
на стадиях 1 и 2 перерабатывается одна партия продукта ( $\tau_{11} = \tau_{12} = 1$ ), на стадии 3 – две ( $\tau_{12} =$



б) цикл работы фрагмента ХТС:  
аппараты стадий 1 и 2 реализуют по два цикла работы,

– за один цикл работы ХТС может быть выпущена не одна, а несколько, конкретно  $bc_i = \frac{1}{\min_{j=1, \dots, J} \{r_{ij}\}}$  партий  $i$ -

го продукта (на рис. 2.1 – две партии);

– в течение одного цикла работы ХТС могут быть реализованы несколько циклов работы аппаратов некоторых ее стадий (аппараты ст. 1 и ст. 2 на рис. 2.1 – по два цикла);

– между несколькими операциями загрузки или выгрузки аппараты стадии ХТС могут находиться в недогруженном или недоувыгруженном состоянии, т.е. в состоянии "заполненного простоя" (на рис. 2.1 – аппарат ст. 3);

– совмещение во времени операций загрузки и (или) выгрузки с операциями "физико-химические превращения" приводит к перекрытию циклов работы оборудования соседних стадий, т.е. к одновременной занятости аппаратов нескольких стадий ХТС переработкой одной и той же партии материалов (на рис. 2.1 – аппараты ст. 1 и ст. 2).

Очевидно, что в этих условиях величина  $T_{ц}$  недостаточно полно характеризует режим работы ХТС при выпуске каждого продукта, необходимо ввести новые понятия и обозначения:

– длительностью цикла работы ХТС при выпуске  $i$ -го продукта  $Tw_i$  будем называть промежуток времени от момента начала первой операции первой стадии до момента завершения последней операции последней стадии переработки  $bc_i$  партий этого продукта;

– межцикловым периодом ХТС при выпуске  $i$ -го продукта  $Tc_i$  будем называть минимально возможный промежуток времени между началом (завершением) последовательных циклов работы системы при выпуске этого продукта;

– периодом обработки  $i$ -го продукта на стадии  $j$  ХТС (целой партии или нескольких партий)  $t_{ij}$  будем называть минимально возможный промежуток времени между моментами начала первой операции первого цикла и окончания последней операции последнего цикла работы аппаратов стадии:  $t_{ij} = \theta_{ij} r_{ij} bc_i$ .

Эти параметры режима функционирования для ХТС МХП с линейной структурой материальных потоков связаны соотношениями:  $Tw_i = \sum_{j=1}^J t_{ij}$ ,  $Tc_i = \max\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{iJ}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ . Тогда продолжительность выпуска

$i$ -го продукта  $T_i = Tw_i + (wc_i - 1)Tc_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ , где  $wc_i = \text{INT}\left(\frac{Q_i}{bc_i w_i}\right) + 1$  – число циклов работы ХТС, необходимое для выпуска  $i$ -го продукта в заданном объеме,  $\text{INT}(x)$  – целая часть числа  $x$ .

Согласно допущению 2, по результатам выполнения этапа разработки ХТС необходимо сформировать множества номеров  $J_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  стадий, оборудование которых используется при выпуске каждого продукта, и матрицы  $PP^i$ ,  $i = \overline{1, I}$  маршрутов обработки партий продуктов. Каждая строка матрицы  $PP^i$  представляет собой одну из совокупностей номеров аппаратурных стадий, реализующих последовательные стадии синтеза  $i$ -го продукта, а значение любого элемента матрицы  $pp_{ye}^i = j$ , если в аппаратах стадии  $j$  ХТС реализуется стадия №  $e$   $y$ -го маршрута обработки партий этого продукта ( $y = \overline{1, Y^i}$ ,  $e = \overline{1, E_y^i}$ , где  $Y^i$  – число маршрутов реализации стадий синтеза  $i$ -го продукта;  $E_y^i$  – число стадий  $y$ -го маршрута). Например, для фрагмента ХТС, представленного на рис. 1.7, матрица  $PP$  имеет вид  $PP = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 8 & 9 \\ 3 & 4 & 5 & 8 & 9 \\ 6 & 7 & 9 & & \end{pmatrix}$ . С учетом введенных обозначений:

$Tw_i = \max_{y=1, Y^i} \left\{ \sum_{e=1}^{E_y^i} t_{i, pp_{ye}^i} \right\}$ ,  $Tc_i = \max_{j \in J_i} \{t_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

Перейдем к рассмотрению связей задач определения АО ХТС МХП по исходным данным и результатам их решения.

### 2.1.2. Исходные данные и результаты решения задач определения АО ХТС МХП

Взаимосвязь задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$  по исходным данным и результатам решения, их информационные связи с другими этапами технологических расчетов процесса проектирования МХП иллюстрирует рис. 2.2. Основными

источниками исходных данных для их решения являются результаты выполнения этапа разработки ХТС и регламенты выпуска продуктов (см. п. 1.1.1).

В результате выполнения этапа разработки ХТС производства определяются следующие исходные данные для решения задачи АО<sub>s</sub>:

- число  $I$ , наименования продуктов, выпускаемых ХТС, и срок  $Tr$  их выпуска в планируемых объемах  $Q_i, i = \overline{1, I}$ , причем все эти данные могут быть скорректированы по итогам выполнения этапа составления расписания работы ХТС производства (см. п. 1.1.4);
- число  $J$  аппаратных стадий ХТС, структура связей между ними при выпуске каждого продукта (множества  $J_i, i = \overline{1, I}$  и матрицы  $PP^i, i = \overline{1, I}$ );
- множества  $Jb_i, Js_i, i = \overline{1, I}; Jf_i \subset Js_i, Jd_i \subset Js_i, i = \overline{1, I}$  номеров аппаратных стадий, основными аппаратами которых соответственно являются: емкости с перемешивающими устройствами и без них, фильтры и сушилки, рамные и камерные фильтр-прессы, выделяющие в качестве целевого продукта твердую фазу суспензий, сушилки периодического действия, а также значения указателей  $z_{ij}, z_{ij}^n, i = \overline{1, I}, j' = pp_{y, e-1}^i, j'' = pp_{y, e+1}^i, pp_{ye}^i = j \in Js_i, y \in Y^i$  способов взаимодействия основных аппаратов стадий фильтрования и сушки ( $j \in Js_i, i = \overline{1, I}$ ) с аппаратами соседних стадий (см. п. 1.2.2);
- материальные индексы стадий по продуктам  $g_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  – объемные  $v_{ij}$  или (и) массовые  $m_{ij}$ .

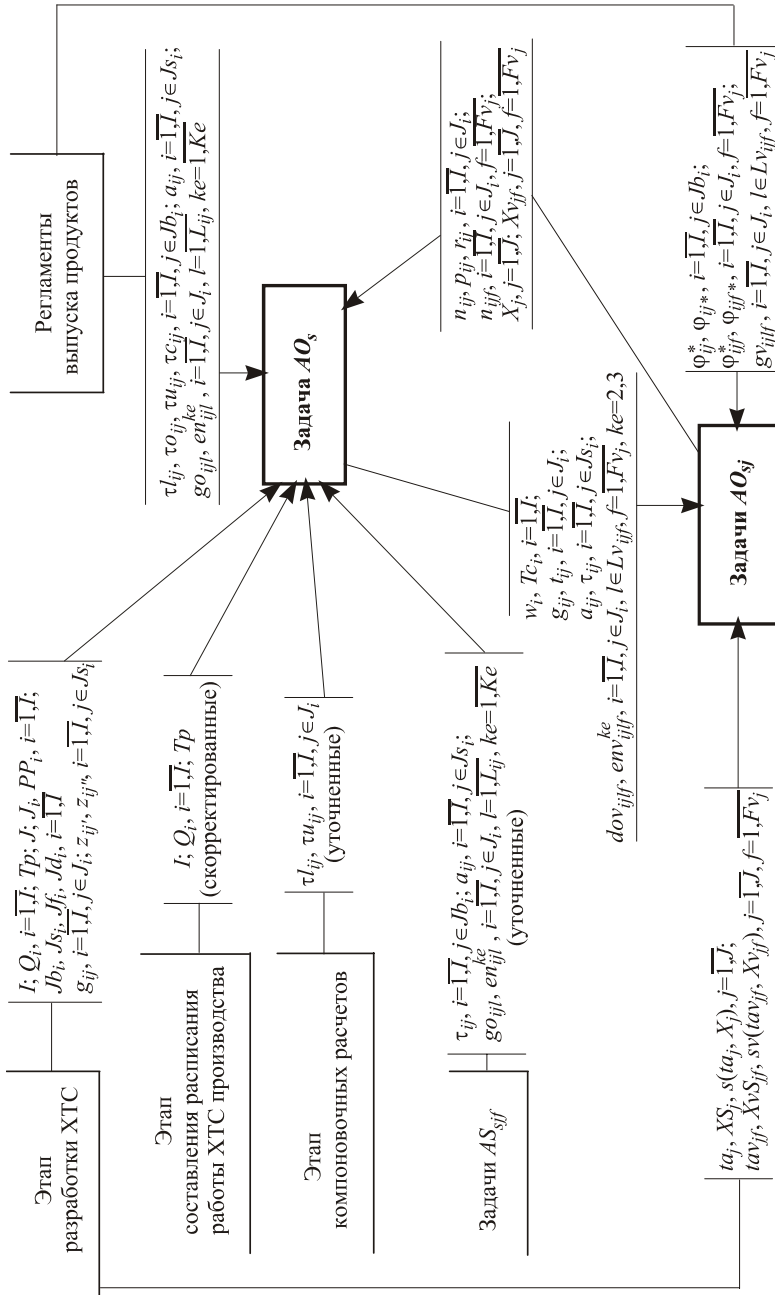


Рис. 2.2. Взаимосвязь задач определения АО ХТС МХП

Дополнительно, на основе данных регламентов выпуска продуктов (перечень и продолжительности технологических операций стадий синтеза каждого продукта), необходимо определить значения длительностей переработки партий продуктов  $\tau_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Jb_i$  на стадиях, где основными аппаратами являются емкости с пере-



мешивающими устройствами (с разбиением на операции, т.е. указанием значений  $\tau l_{ij}, \tau o_{ij}, \tau u_{ij}, \tau c_{ij}$ ), и удельных производительностей  $a_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Js_i$  основных аппаратов стадий фильтрования и сушки. Напомним (см. п. 1.1.2, 1.1.3), что значения  $\tau l_{ij}, \tau u_{ij}$  продолжительностей операций загрузки и разгрузки основных аппаратов стадий  $j \in J_i, i \in (1, \dots, I)$  ХТС могут быть скорректированы согласно результатам выполнения этапа компонентных расчетов, а значения  $\tau o_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Jb_i$  и  $a_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Js_i$  – по результатам решения задач  $AS_{sjf}$  оптимизации параметров конструкции и режима функционирования основных аппаратов стадий ХТС.

Для оценки эффективности выбранного режима функционирования ХТС и оборудования ее стадий необходимо (по данным регламентов выпуска продуктов и результатам решения задач  $AS_{sjf}$ ) определить удельные расходы основных видов энергоресурсов  $en_{ij}^{ke}$  (например,  $ke = 1$  – электроэнергия;  $ke = 2$  – тепло;  $ke = 3$  – холод), потребляемых оборудованием стадий при реализации отдельных операций стадий переработки партий сырья и промежуточных продуктов (в Вт/кг), а также материальные индексы операций ( $go_{ij}$  – совокупная масса веществ, которые необходимо переработать в ходе  $i$ -й операции на  $j$ -й стадии ХТС для получения одной тонны  $i$ -го продукта).

Кроме того, для определения характеристик режима функционирования ХТС и оборудования ее стадий необходимы некоторые результаты выбора АО стадий ХТС (решения задач  $AO_{sj}$ ):

- число  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  основных аппаратов стадий ХТС, используемых при выпуске каждого продукта;
  - указатели  $r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  способа обработки партий продуктов аппаратами стадий ХТС – целиком, равными долями синхронно или последовательно, нескольких партий одновременно;
  - определяющие геометрические размеры основных аппаратов некоторых стадий фильтрования и сушки
- $X_j, j \in Js_i/Jf_i, i = \overline{1, I}$ .

В результате решения задачи  $AO_s$  определяются значения размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , а также соответствующие им значения моментов начала ( $tos_{ijk}$ ) и окончания ( $tof_{ijk}$ ) каждой операции ( $l$ ) каждого цикла ( $k$ ) работы основных аппаратов каждой стадии ( $j$ ) выпуска каждого продукта ( $i$ ), т.е. пооперационное расписание циклов работы основных аппаратов всех стадий ХТС в течение одного цикла работы системы. Значения этих параметров режима функционирования АО ХТС должны обеспечивать переработку материальных потоков, необходимых для выпуска всех продуктов в объемах  $Q_i, i = \overline{1, I}$  за период времени  $Tr$ , при минимальных затратах энергоресурсов на выпуск продукции.

По известным значениям  $w_i, i = \overline{1, I}$  и  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$ , где  $K_{ij}$  – число циклов работы аппаратов стадии  $j$  при выпуске  $i$ -го продукта;  $L_{ijk}$  – число операций  $k$ -го цикла работы аппаратов стадии  $j$  при выпуске  $i$ -го продукта, определяются периоды обработки продуктов на стадиях ХТС  $t_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , длительности циклов работы ХТС  $Tw_i, i = \overline{1, I}$ , межцикловые периоды  $Tc_i, i = \overline{1, I}$  по каждому продукту и длительности их выпуска  $T_i, i = \overline{1, I}$  (см. п. 2.1.1).

Таким образом, задачу  $AO_s$  можно сформулировать в общем виде как

$$Ze(W^*) = \min_{W, TOS, TOF} \{Ze(W) | f_{\omega}(W, TOS, TOF) \geq 0, \omega \in \Omega_r\}, \quad (2.1)$$

где  $Ze$  – стоимость энергоресурсов, необходимых для выпуска всех продуктов в указанных объемах за период  $Tr$  (критерий оптимизации режима функционирования ХТС и оборудования ее стадий);  $W = (w_1, \dots, w_I)$  – совокупность значений размеров партий продуктов;  $TOS = \{tos_{ijkl} | i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}\}$ ,  $TOF = \{tof_{ijkl} | i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}\}$  – множества значений моментов начала и окончания операций циклов работы аппаратов стадий ХТС при выпуске всех продуктов.

Ограничения  $f_{\omega}(W, TOS, TOF) \geq 0, \omega \in \Omega_r$  математической модели функционирования АО ХТС МХП включают:

- 1) ограничение на сумму длительностей выпуска продуктов;
- 2) ограничение на изменение значений размеров партий продуктов;
- 3) условия синхронизации циклов работы аппаратов соседних стадий ХТС.

При решении задач  $AO_{sj}$  используются некоторые исходные данные и результаты решения задачи  $AO_s$  – значения  $w_i, i = \overline{1, I}$ ;  $g_{ij}, t_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ ;  $a_{ij}, \tau_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Js_i$ . Для выбора вспомогательной аппаратуры стадий ХТС на основе регламентов выпуска продуктов и результатов решения задачи  $AO_s$  необходимо:

- 1) определить для каждой стадии число  $Fv_j$  групп вспомогательных аппаратов одинакового назначения (мерники определенных видов жидкого сырья, сборники определенных продуктов и отходов, насосы для загрузки и разгрузки основных аппаратов, выносные и встроенные теплообменники);

2) сформировать множества  $Lv_{ijf}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}$  номеров операций рабочих циклов основных аппаратов стадий, в процессах реализации которых задействованы соответствующие вспомогательные аппараты;

3) определить значения материальных индексов  $gv_{ijfl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, l \in Lv_{ijf}$  (объемных  $vv_{ijfl}$  или массовых  $mv_{ijfl}$  в зависимости от типа конкретного вспомогательного аппарата) и длительностей этих операций в часах  $dov_{ijfl} = tof_{ijkl} - tos_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, l \in Lv_{ijf} \forall k \in (1, \dots, K_{ij})$ ;

4) определить значения удельных расходов энергии операций, связанных с применением соответствующих вспомогательных аппаратов для изменения температуры массы, перерабатываемой в основных аппаратах  $env_{ijfl}^{ke} = en_{ijl}^{ke}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, l \in Lv_{ijf}, ke = 2, 3$ .

Кроме того, необходимы:

– сведения о типах и исполнении основных  $ta_j, j = \overline{1, J}$  и вспомогательных  $tav_{jff}, j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$  аппаратов стадий;

– максимальные и минимальные допустимые значения степени заполнения емкостных аппаратов стадий: основных –  $\varphi_{ij}^*, \varphi_{ij}^*, i = \overline{1, I}, j \in Jb_i$  и вспомогательных –  $\varphi v_{ijf}^*, \varphi v_{ijf}^*, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}$ ;

– множества определяющих геометрических размеров основных  $Xs_j, j = \overline{1, J}$  и вспомогательных  $XvS_{jff}, j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$  аппаратов, пригодных для оснащения стадий ХТС (стандартных аппаратов, выпускаемых предприятиями химического машиностроения).

– зависимости стоимости основных  $s(ta_j, X_j), j = \overline{1, J}$  и вспомогательных  $sv(tav_{jff}, Xv_{jff}), j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$  аппаратов выбранных типов от их определяющих геометрических размеров (для оценки эффективности АО стадий).

Задача  $AO_{sj}$  сводится к выбору определяющих геометрических размеров ( $X_j$ ) и числа ( $N_j$ ) основных аппаратов стадии  $j$  ХТС, а также числа ( $Nv_{jff}, f = \overline{1, Fv_j}$ ) и размеров ( $Xv_{jff}, f = \overline{1, Fv_j}$ ) вспомогательных аппаратов этой стадии, обеспечивающих минимум капитальных затрат на ее технологическое оборудование. В общем виде задача  $AO_{sj}$  формулируется как

$$Zk_j(N_j^*, X_j^*, Nv_{jff}^*, Xv_{jff}^*) = \min_{N_j, X_j, Nv_{jff}, Xv_{jff}} \{Zk_j(N_j, X_j, Nv_{jff}, Xv_{jff}) | f_{\omega}(N_j, X_j, Nv_{jff}, Xv_{jff}) \geq 0, \omega \in \Omega_{\alpha_j}\}, \quad (2.2)$$

где  $Zk_j$  – амортизационные отчисления от стоимости основных и вспомогательных аппаратов стадии  $j$  ХТС за период  $Tr$  (критерий оптимизации АО стадии  $j$  ХТС);  $Nv_{jff} = \{Nv_{jff} | f = \overline{1, Fv_j}\}$ ,  $Xv_{jff} = \{Xv_{jff} | f = \overline{1, Fv_j}\}$  – комбинации значений числа и размеров вспомогательных аппаратов стадии  $j$  ХТС.

Ограничения  $f_{\omega}(N_j, X_j, Nv_{jff}, Xv_{jff}) \geq 0, \omega \in \Omega_{\alpha_j}$  математических моделей определения АО стадий ХТС представляют собой:

– условия выбора определяющих геометрических размеров основных и вспомогательных аппаратов различных типов;

– условия принадлежности выбираемых значений  $X_j$  и  $Xv_{jff}, f = \overline{1, Fv_j}$  множествам  $Xs_j$  и  $XvS_{jff}, f = \overline{1, Fv_j}$  соответственно;

– соотношения для определения значений  $N_j, Nv_{jff}, f = \overline{1, Fv_j}$  и условия их целочисленности.

Заметим, что в ходе решения задач  $AO_{sj}$  могут быть изменены значения указателей  $r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  способа переработки партий продуктов на стадиях ХТС и числа  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  основных аппаратов, используемых при выпуске каждого продукта (с целью обеспечения выполнения ограничений  $f_{\omega}(N_j, X_j, Nv_{jff}, Xv_{jff}) \geq 0$ ), а также уточнен выбор значений размеров основных аппаратов стадий фильтрация и сушки, при которых была решена задача  $AO_s$ . Следовательно, процесс совместного решения задачи  $AO_s$  и задач  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  является итерационным: вначале результаты решения задач  $AO_{sj}$ , являющиеся исходными данными для решения задачи  $AO_s$  ( $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i; X_j, j \in Js_i/Jf_i, i = \overline{1, I}$ ), прогнозируются, а затем уточняются.

Перейдем к подробному описанию разработанных нами математических постановок задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ .

## 2.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ХТС МХП

Вначале рассмотрим математическую модель функционирования АО ХТС МХП, разработанную нами в рамках допущений 1-11 (см. п. 2.1.1). Соотношения модели объединены в две группы:

- 1) соотношения для определения значений характеристик режима функционирования ХТС, обеспечивающих требуемую производительность (некоторые из этих соотношений приведены в п. 2.1.1);
- 2) условия синхронизации циклов работы аппаратов стадий ХТС.

### 2.2.1. Соотношения для определения характеристик режима функционирования ХТС

Основное ограничение, которому должны удовлетворять характеристики режима функционирования ХТС – это ограничение на сумму продолжительностей выпуска продуктов в планируемых объемах

$$\sum_{i=1}^I T_i \leq T_p, \quad (2.3)$$

где продолжительность выпуска  $i$ -го продукта (ч)

$$T_i = T w_i + (w c_i - 1) T c_i, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.4)$$

длительность цикла работы ХТС при выпуске  $i$ -го продукта (ч)

$$T w_i = \max_{y=1, \overline{Y^i}} \left\{ \sum_{e=1}^{E_y^i} t_{i, pp_{ye}^i} \right\}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.5)$$

$Y^i$  – число маршрутов переработки партий  $i$ -го продукта;  $pp_{ye}^i$  – элемент матрицы  $PP^i$  маршрутов переработки партий  $i$ -го продукта ( $pp_{ye}^i = j$ , если аппаратная стадия  $j$  ХТС имеет порядковый номер  $e$  в  $y$ -м маршруте переработки партий  $i$ -го продукта);  $E_y^i$  – число стадий  $y$ -го маршрута переработки партий  $i$ -го продукта; число циклов работы ХТС, необходимое для выпуска  $i$ -го продукта в объеме  $Q_i$

$$w c_i = \text{INT} \left( \frac{Q_i}{b c_i w_i} \right) + 1, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.6)$$

число партий  $i$ -го продукта, выпускаемых за один цикл работы ХТС,

$$b c_i = \frac{1}{\min_{j \in J_i} \{ r_{ij} \}}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.7)$$

продолжительность межциклового периода системы при выпуске  $i$ -го продукта (ч)

$$T c_i = \max_{j \in J_i} \{ t_{ij} \}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.8)$$

период обработки  $i$ -го продукта на стадии  $j$  ХТС (ч)

$$t_{ij} = \begin{cases} \frac{K_{ij}}{n_{ij}} (tof_{ij1L_{ij1}} - tos_{ij11}), & \text{если } n_{ij} > 1, p_{ij} = 0; \\ tof_{ij, K_{ij}, L_{ij}, K_{ij}} - tos_{ij11}, & \text{иначе } i = \overline{1, I}, j \in J_i; \end{cases} \quad (2.9)$$

число циклов работы основных аппаратов всех стадий выпуска каждого продукта за один цикл работы системы

$$K_{ij} = r_{ij} b c_i, \quad i = \overline{1, I}, j \in J_i; \quad (2.10)$$

моменты начала ( $tos_{ijkl}$ ) и окончания ( $tof_{ijkl}$ ) каждой операции ( $l$ ) каждого цикла ( $k$ ) работы аппаратов каждой стадии ( $j$ ) выпуска  $i$ -го продукта (ч), причем  $tos_{1111} = 0$

$$tos_{ijk, l+1} = tof_{ijkl} = tos_{ijkl} + do_{ijkl}, \quad i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}; \quad (2.11)$$

$L_{ijk}$  – число операций  $k$ -го цикла обработки партии  $i$ -го продукта на стадии  $j$ ; продолжительность  $l$ -й операции  $k$ -го цикла обработки партии  $i$ -го продукта на стадии  $j$  (ч);

$$do_{ijkl} = \begin{cases} \tau l_{ij} u_{ij} / Ll_{ij}, l \in Oa_{ijk}; \\ Alg_{be}, l \in Ob_{ijk}; \\ \tau o_{ij} u_{ij}, j \in Js_i / Jf_i; \\ \tau o_{ij}, j \in Jb_i \cup Jf_i, l \in Oc_{ijk}; \\ \tau u_{ij} u_{ij} / Lu_{ij}, l \in Od_{ijk}; \\ Alg_{be}, l \in Oe_{ijk}; \\ \tau o_{ij} u_{ij} (1 - h_{ij}) / h_{ij}, j \in Js_i; \\ \tau c_{ij}, j \in Jb_i, l \in Of_{ijk}; \end{cases} \quad (2.12)$$

$Oa_{ijk}, Ob_{ijk}, Oc_{ijk}, Od_{ijk}, Oe_{ijk}, Of_{ijk}$  – множества номеров технологических операций  $k$ -го цикла работы аппаратов  $j$ -й стадии синтеза  $i$ -го продукта, при реализации которых аппараты пребывают в состоянии "загрузка", "заполненный простой при загрузке", "физико-химические превращения", "выгрузка", "заполненный простой при выгрузке", "очистка" соответственно коэффициент изменения размера партии  $i$ -го продукта на стадии  $j$ ;

$$u_{ij} = \frac{p_{ij} + (1 - p_{ij}) n_{ij}}{n_{ij}} \frac{1}{r_{ij}}; \quad (2.13)$$

$Jb_i$  – множество номеров стадий синтеза  $i$ -го продукта, где основными аппаратами являются емкостные аппараты;  $Js_i$  – множество номеров стадий синтеза  $i$ -го продукта, где основными аппаратами являются фильтры и сушилки;  $Jf_i \subset Js_i$  – множество номеров стадий синтеза  $i$ -го продукта, где основными аппаратами являются камерные или рамные фильтр-прессы, выделяющие в качестве целевого продукта твердую фазу суспензии длительность физико-химических превращений на стадии  $j$  синтеза  $i$ -го продукта (ч) (см. п. 1.2.1);

$$\tau o_{ij} = \begin{cases} \tau o_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Jb_i; \\ h_{ij} \frac{m_{ij} \delta_{ij}}{v_{ij} a_{ij}}, i = \overline{1, I}, j \in Jf_i; \\ h_{ij} \frac{g_{ij} w_i}{X_j a_{ij}}, i = \overline{1, I}, j \in Js_i / Jf_i; \end{cases} \quad (2.14)$$

$h_{ij}$  – доля основных операций от общего времени занятости аппаратов стадии  $j \in Js_i$  переработкой партии  $i$ -го продукта (например, для стадий фильтрации – собственно фильтрации и промывки, если промывные воды идут в дальнейшую переработку);  $X_j$  – определяющий геометрический размер основных аппаратов стадий  $j \in Js_i / Jf_i$  ( $m^2, m^3$ ), причем для стадий  $j \in Jd_i$  это рабочая поверхность сушилки ( $X_j^2, m^2$ , см. п. 2.3.1);  $a_{ij}$  – удельная производительность аппарата стадии  $j \in Js_i$  при переработке партии  $i$ -го продукта ( $кг/(m^3 \cdot ч), m^3/(m^2 \cdot ч)$  или  $кг/(m^2 \cdot ч)$  согласно размерности основного материального индекса  $g_{ij}$  и определяющего размера  $X_j$ );  $\delta_{ij}$  – толщина слоя осадка при переработке партии  $i$ -го продукта на стадии  $j \in Jf_i$  (половина глубины рамы или камеры фильтр-пресса выбранного типа, м); длительность загрузки одной партии  $i$ -го продукта для аппаратов стадии  $j$  (ч) (см. п. 1.2.2)

$$\tau l_{ij} = \begin{cases} \tau l_{ij}^0, \text{ если } j \neq js'' \forall js \in Js_i; \\ \tau l_{ij}^0 (1 - z_{ij}) + z_{ij} \tau o_{i, js}, \text{ если } \exists js \in Js_i : j = js''; \end{cases} \quad (2.15)$$

длительность выгрузки одной партии  $i$ -го продукта для аппаратов стадии  $j$  (ч)

$$\tau u_{ij} = \begin{cases} \tau u_{ij}^0, \text{ если } j \neq js' \forall js \in Js_i; \\ \tau u_{ij}^0 (1 - z_{ij}) + z_{ij} \tau o_{i, js}, \text{ если } \exists js \in Js_i : j = js'; \end{cases} \quad (2.16)$$

$\tau l_{ij}^0, \tau u_{ij}^0$  – заданные (регламентные) длительности загрузки и выгрузки одной партии  $i$ -го продукта для аппаратов стадии  $j$  соответственно (ч);  $\tau c_{ij}$  – длительность очистки аппарата стадии  $j$  после выгрузки партии  $i$ -го продукта (ч); число загрузок в течение одного цикла работы аппаратов стадии  $j$  ХТС при выпуске  $i$ -го продукта

$$Ll_{ij} = \max \left\{ 1, \frac{r_{i, jp}}{r_{ij}} \right\}, j = pp_{ye}^i, jp = pp_{y, e-1}^i, y = \overline{1, Y^i}, e \in (2, \dots, E_y^i); \quad (2.17)$$

число выгрузок в течение одного цикла работы аппаратов этой стадии

$$Lu_{ij} = \max \left\{ 1, \frac{r_{i,ja}}{r_{ij}} \right\}, j = pp_{ye}^i, ja = pp_{y,e+1}^i, y = \overline{1, Y^i}, e \in (1, \dots, E_y^i - 1); \quad (2.18)$$

Alg<sub>be</sub> – алгоритм определения длительностей операций "заполненных простоев" при загрузке и выгрузке основных аппаратов стадий системы, минимизации длительностей циклов выпуска продуктов ХТС (подробное описание этого алгоритма см. в гл. 3).

Рис. 2.3 иллюстрирует соотношение между величинами  $\tau_{ij}$ ,  $t_{ij}$ ,  $Tc_i$ ,  $Tw_i$ ,  $tos_{ijkl}$ ,  $tof_{ijkl}$  на примере фрагмента ХТС, состоящего из двух стадий: первая включает два основных аппарата, каждый из которых принимает партии продукта целиком, на второй установлен один основной аппарат, в котором объединяются две партии продукта.

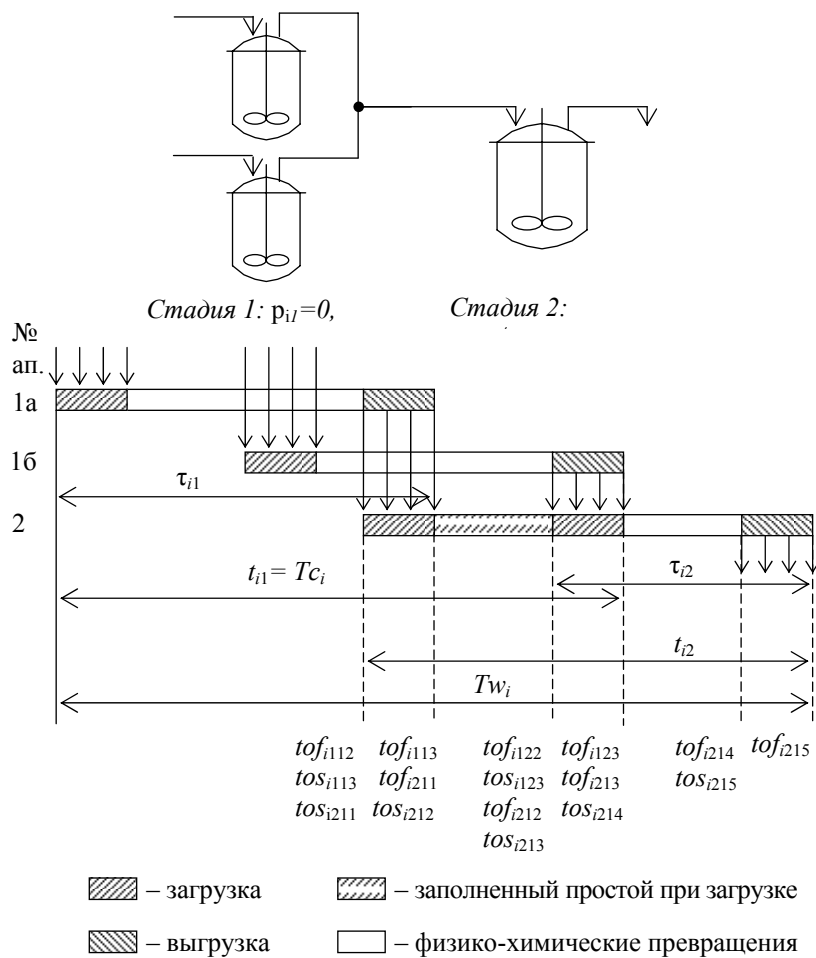


Рис. 2.3. Соотношения между характеристиками режима функционирования АО ХТС

### 2.2.2. Условия синхронизации циклов работы аппаратов стадий ХТС

Первые два из этих условий предназначены для проверки корректности задания значений  $r_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ , т.е. возможности практической реализации предложенных изменений размеров партий продуктов в процессе их переработки на стадиях ХТС. Очевидно, что число циклов работы основных аппаратов любой стадии системы за один цикл выпуска любого продукта может быть только целым, т.е., см. (2.7), (2.10)

$$\frac{r_{ij}}{\min_{j \in J_i} \{r_{ij}\}} - \text{целое, } \forall i \in (1, \dots, I), \forall j \in J_i. \quad (2.19)$$

Также очевидно, что не может быть дробным число загрузок и выгрузок в течение одного цикла работы аппаратов любой стадии ХТС при выпуске любого продукта, т.е. (см. (2.17), (2.18))

$$\frac{r_{i,jj}}{r_{ij}} - \text{целое, если } r_{i,jj} > r_{ij}, i = \overline{1, I}, j = pp_{ye}^i, jj = pp_{y,e\pm 1}^i; \quad (2.20)$$

$$y = \overline{1, Y^i}, e \in (2, \dots, E_y^i - 1).$$

Как указывалось выше (см. допущение 7) операции загрузки/выгрузки могут быть как разделены во времени с операцией "физико-химические превращения", так и совмещены с ней. Следовательно, прием порций сырья или промежуточных продуктов аппаратами стадий ХТС может быть осуществлен либо во время операции "загрузка" ( $l \in Oa_{ijk}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}$ ), либо во время операции "физико-химические превращения" ( $l \in Oc_{ijk}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}$ ). Для нормального совместного функционирования аппаратов соседних стадий необходимо, чтобы длительности операций, во время которых происходит прием материалов, были равны длительностям операций, во время которых происходит передача материалов с предыдущих стадий, т.е. моменты начала и окончания операций приема порций партии  $i$ -го продукта на стадии  $j$  должны совпадать с моментами начала и окончания операций их передачи с предыдущих стадий

$$tos_{ijkl} = tos_{i,jp,k,l'}, tof_{ijkl} = tof_{i,jp,k,l'}, i = \overline{1, I}, j = pp_{ye}^i, jp = pp_{y,e-1}^i; \quad (2.21)$$

$$y = \overline{1, Y^i}, e = \overline{2, E_y^i}, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Oa_{ijk} \cup Oc_{ijk}, k' = pk_{ijkl}, l' = pl_{ijkl},$$

где  $pk_{ijkl}$  – номер цикла работы аппарата стадии  $jp$ , во время которого происходит операция его выгрузки, соответствующая  $l$ -й операции загрузки  $k$ -го цикла работы аппаратов  $j$ -й стадии ХТС при выпуске  $i$ -го продукта;  $pl_{ijkl}$  – номер операции выгрузки  $pk_{ijkl}$ -го цикла работы аппарата стадии  $jp$ , соответствующей  $l$ -й операции загрузки  $k$ -го цикла работы аппаратов  $j$ -й стадии ХТС при выпуске  $i$ -го продукта.

Рис. 2.4 иллюстрирует условие (2.21) на примере одного цикла работы ХТС, состоящей из трех стадий: очистное фильтрование

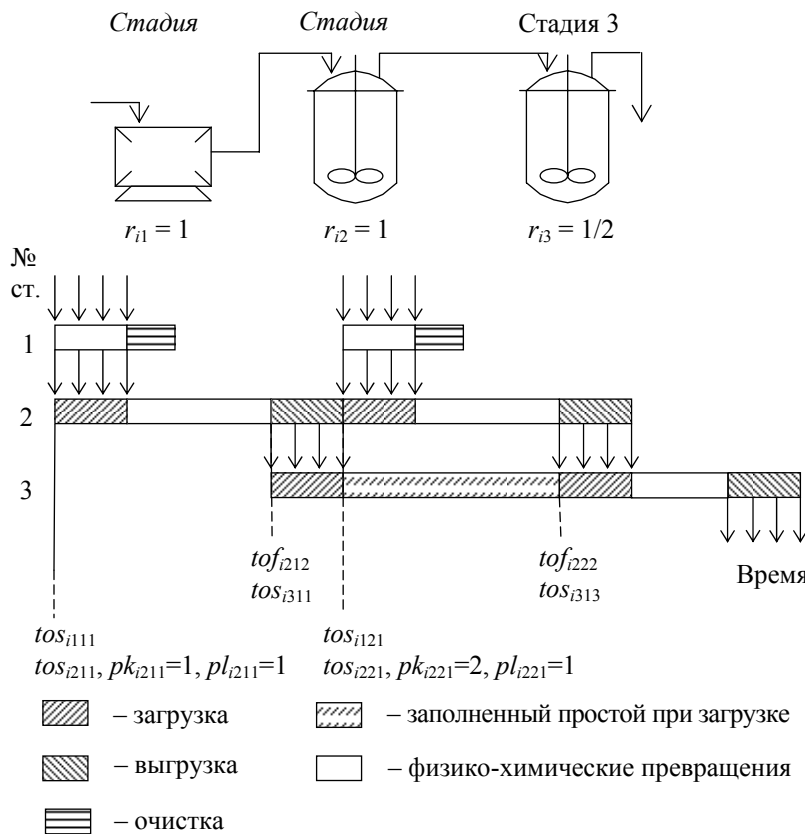


Рис. 2.4. Иллюстрация к условию совпадения моментов начала и окончания операций приема и передачи партий  $i$ -го продукта

промежуточного продукта на фильтр-прессе, осуществление химической реакции и выделение кристаллов конечного продукта в емкостном реакторе с механической мешалкой, причем аппараты первой и второй стадии перерабатывают по одной партии продукта, а в аппарате третьей стадии объединяются две партии.

При нормальном функционировании ХТС не должны происходить так называемые "столкновения" между последовательными циклами работы системы и отдельных аппаратов ее стадий (если

$K_{ij} > 1, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ ), т.е. следующий цикл должен начинаться не раньше, чем закончится предыдущий. Предотвращение "столкновений" между различными циклами работы системы обеспечивается перекрытием циклов через постоянный промежуток времени (межцикловый период  $T_{c_i}, i = \overline{1, I}$ ). Предотвращение "столкновений" циклов работы основных аппаратов стадий ХТС обеспечивается ограничением

$$tos_{ijkl} \geq tof_{ijk}^{n_{l_{ijk}}}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, k'' = \begin{cases} k - n_{ij}, n_{ij} > 1 \& p_{ij} = 0; \\ k - 1, \text{ иначе,} \end{cases} \quad (2.22)$$

которое показывает, что первая операция следующего цикла работы основных аппаратов любой стадии ХТС не может начаться до окончания последней операции предыдущего цикла, и учитывает возможность переработки поступающих на стадию партий продуктов в разных основных аппаратах.

Независимыми параметрами математической модели функционирования АО ХТС МХП являются размеры партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , значения которых могут изменяться в следующих пределах:

$$0 < w_i < Q_i, i = \overline{1, I}. \quad (2.23)$$

Моменты начала и окончания операций циклов работы основных аппаратов стадий ХТС при выпуске продуктов  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$ , однозначно определяются значениями  $w_i, i = \overline{1, I}$ , согласно (2.11) – (2.18), (2.21), (2.22).

Таким образом, математическая модель функционирования АО ХТС МХП включает соотношения (2.3) – (2.23).

### 2.2.3. Критерий оптимизации режима функционирования АО ХТС МХП

Единая общепринятая методика оценки эффективности функционирования технических систем предприятий химического профиля в настоящее время отсутствует [2, 4, 90]. Для оценки эффективности функционирования химических производств используются два вида критериев: натуральные и экономические [104]. Натуральные включают параметры, характеризующие режим работы технической системы и конструктивные особенности используемого оборудования – выходы целевых продуктов, расходы сырья и тепло-хладагентов, длительности технологических процессов, рабочие давление и температура при их реализации, технические характеристики механических перемешивающих устройств (мощность, крутящий момент, частота вращения вала), геометрические размеры аппаратов (диаметр, высота, объем, поверхность) и т.п. Использование натуральных критериев позволяет конкретизировать эффект, достигаемый в результате оптимизации, однако выбор тех параметров, которые в полной мере характеризуют эффективность функционирования конкретной технической системы, обычно не очевиден.

Экономические (стоимостные) критерии, в отличие от натуральных, обладают универсальностью, так как отражают не только результаты оптимизации, но и затраты на получение этих результатов. Основным экономическим показателем эффективности функционирования производства химической промышленности является прибыль от реализации продукции, произведенной за какой-либо конкретный период, т.е. разность между стоимостью готовой продукции и затратами на ее производство. Для большинства отраслей химической промышленности затраты на производство продукции включают следующие статьи [5 – 7, 23, 104 – 106]:

- 1) сырье и материалы;
- 2) полуфабрикаты собственного производства;
- 3) возвратные отходы (вычитаются);
- 4) вспомогательные материалы;
- 5) топливо и энергия на технологические нужды;
- 6) заработная плата штатного персонала;
- 7) отчисления на социальное страхование;
- 8) затраты на подготовку и освоение производства;
- 9) затраты на содержание и эксплуатацию оборудования и транспортных средств (амортизационные отчисления и затраты на эксплуатацию);
- 10) износ приспособлений целевого назначения и прочие специальные расходы;
- 11) цеховые расходы;
- 12) общезаводские расходы;
- 13) потери от брака;
- 14) прочие производственные расходы;
- 15) попутная продукция (исключается);
- 16) внепроизводственные расходы.

Очевидно, что спрогнозировать стоимость готовой продукции, рассчитать или хотя бы оценить все статьи затрат на этапе технологических расчетов проектируемого производства практически невозможно. Поэтому в качестве критерия эффективности режима функционирования АО ХТС МХП будем использовать минимум тех

статей затрат, значения которых можно определить по результатам решения задачи АО<sub>s</sub>. Заметим, что в МХП, в частности в производствах органических полупродуктов и красителей, наиболее значительными являются затраты на сырье, энергию, содержание и эксплуатацию оборудования, которые составляют ~80 % себестоимости продукции [5, 6, 105, 106] (см. табл. 2.1). Затраты на сырье, главным образом, зависят от технологии производства продуктов, т.е. определяются выбором регламентов их выпуска. Затраты на эксплуатацию оборудования определяются на этапе составления расписания функционирования ХТС производства (см. п. 1.1.4).

2.1. Структура себестоимости продукции в различных отраслях химической промышленности

Составляющие себестоимости	Химическая промышленность в целом	Основная химия	Азотная	Солодовая	Горнохимическая	Лакокрасочная	Пластических масс	Органических продуктов и красителей
Сырье, материалы и полуфабрикаты	54,0	55,0	31,2	26,0	15,5	88,2	71,5	61,4
Топливо и энергия на технологические цели	13,2	12,5	33,0	30,5	15,0	0,4	4,0	7,3
Заработная плата	5,0	3,8	3,7	6,8	9,0	1,3	4,3	4,4
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	11,7	13,0	16,0	15,5	25,5	3,2	6,5	9,5
Цеховые расходы	6,4	6,4	6,7	8,7	12,0	1,8	4,3	7,5
Общезаводские расходы	5,0	4,0	4,6	5,7	7,2	2,3	5,3	7,3
Прочие расходы	3,8	4,4	3,8	5,0	13,1	2,0	3,5	2,0
Внепроизводственные расходы	0,9	0,9	1,0	1,8	2,8	0,8	0,6	0,6
Полная себестоимость	100	100	100	100	100	100	100	100

По результатам решения задачи АО<sub>s</sub> можно оценить только затраты энергии различных видов (электричество, тепло, холод) на технологические цели в течение периода эксплуатации  $T_p$ , поэтому в качестве критерия оптимальности режима функционирования АО ХТС МХП предлагается использовать функцию

$$Ze = \sum_{i=1}^I wc_i \sum_{j \in J_i} (u_{ij} w_i) \sum_{k=1}^{K_{ij}} \sum_{l=1}^{L_{ijk}} \sum_{ke=1}^{K_e} C^{ke} enc_{ijkl}^{ke} goc_{ijkl} (tof_{ijkl} - tos_{ijkl}), \quad (2.24)$$

где  $C^{ke}$  – стоимость единицы (1 Дж) энергоресурса вида  $ke$ ;  $K_e$  – количество видов энергоресурсов, затраты которых учитываются при решении задачи АО<sub>s</sub>;  $goc_{ijkl}$  – материальный индекс  $l$ -й операции  $k$ -го цикла работы аппаратов стадии  $j$  ХТС при выпуске  $i$ -го продукта (в кг/т);  $enc_{ijkl}^{ke}$  – удельный расход (в Вт/кг) энергоресурса вида  $ke$  при реализации  $l$ -й операции  $k$ -го цикла работы аппаратов стадии  $j$  ХТС при выпуске  $i$ -го продукта. Значения  $goc_{ijkl}$  и  $enc_{ijkl}^{ke}$  определяются по заданным значениям  $go_{ijl}$  и  $en_{ijl}^{ke}$ , причем при  $K_{ij} = 1$  это те же самые значения, а при  $K_{ij} > 1$ ,  $i \in \{1, \dots, I\}$ ,  $j \in \{1, \dots, J_i\}$ , когда на некоторых стадиях ХТС появляются дополнительные операции загрузки, физико-химических превращений, выгрузки и "заполненного простоя", в течение которого нередко осуществляется перемешивание и поддержание температуры перерабатываемой массы, значения  $go_{ijl}$  необходимо пересчитать, т.е.

$$goc_{ijkl} = \begin{cases} \frac{go_{ijl}}{Ll_{ij}}, & i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Oa_{ij} \cup Ob_{ij}; \\ \frac{go_{ijl}}{Lu_{ij}}, & i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Od_{ij} \cup Oe_{ij}; \\ go_{ijl}, & i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Oc_{ij}; \end{cases} \quad (2.25)$$



$$enc_{ijkl}^{ke} = en_{ij}^{ke}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}, ke = \overline{1, Ke}. \quad (2.26)$$

Следовательно (см. (2.1)), задача АО<sub>s</sub> выбора режима функционирования ХТС МХП и оборудования ее стадий – это задача поиска минимума критерия (2.24) при условиях (2.3) – (2.23). Непосредственно для вычисления критерия оптимизации (2.23) используются параметры режима функционирования ХТС, изменяющиеся непрерывно: значения размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$  и соответствующие им значения моментов начала и окончания операций циклов работы аппаратов стадий ХТС при выпуске всех продуктов  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$ . Вместе с тем, для проверки выполнения ограничения (2.3) используются характеристики режима функционирования ХТС, изменяющиеся дискретно:  $wc_i, bc_i, i = \overline{1, I}$  – число циклов работы ХТС, необходимое для выпуска продуктов в требуемых количествах и число партий продуктов, выпускаемых за один цикл работы системы (см. (2.6), (2.7));  $Tw_i, Tc_i, i = \overline{1, I}$  – длительности циклов работы ХТС и межцикловые периоды выпуска продуктов, см. (2.5), (2.8). Учитывая нелинейность критерия (2.24) и ограничения (2.3), задачу АО<sub>s</sub> следует отнести к классу задач смешанного дискретно-нелинейного программирования.

Перейдем к рассмотрению предлагаемых нами математических постановок задач АО<sub>sj</sub> определения АО стадий ХТС и способов обработки партий продуктов их основными аппаратами.

### 2.3. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ СТАДИЙ ХТС МХП

Вначале рассмотрим соотношения для выбора определяющих геометрических размеров и числа основных аппаратов различных типов, которыми могут быть укомплектованы аппаратурные стадии ХТС МХП, т.е., см. (2.2), те ограничения  $f_\omega(N_j, X_j, NV_j, XV_j) \geq 0, \omega \in \Omega_j$  математических моделей выбора АО конкретных стадий ХТС, которые относятся к основному оборудованию.

#### 2.3.1. Соотношения для выбора основной аппаратуры стадий ХТС МХП

Согласно допущению 4 (см. п. 2.1.1) постановки задач АО<sub>sj</sub> должны учитывать возможность оснащения стадий ХТС МХП следующими типами основных аппаратов: вертикальные емкостные аппараты с перемешивающими устройствами (реакторы и емкости), фильтры и сушилки периодического и непрерывного действия.

Если стадия  $j$  ХТС оснащается емкостями с механическими перемешивающими устройствами ( $j \in Jb_i, i = \overline{1, I}$ ), то определяющим геометрическим размером  $X_j$  основного аппарата этой стадии является рабочий объем (с учетом наличия защитного покрытия и внутренних устройств). Объем массы, перерабатываемой в каждом из этих аппаратов при выпуске  $i$ -го продукта, равен произведению объемного материального индекса на размер партии продукта с учетом его изменений, определяемых выбором значений  $r_{ij}, n_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}$ , см. (2.13), т.е.  $v_{ij}w_iu_{ij}$ . Степень заполнения аппарата должна находиться в заданных пределах, т.е.  $\varphi_{ij} \in [\varphi_{ij}^*, \varphi_{ij}^*], i = \overline{1, I}$ , следовательно, соотношение для определения рабочего объема емкости с механическим перемешивающим устройством имеет вид

$$u_{ij} \frac{v_{ij}w_i}{\varphi_{ij}^*} \leq X_j \leq u_{ij} \frac{v_{ij}w_i}{\varphi_{ij}^*}, j \in Jb_i, i = \overline{1, I}. \quad (2.27)$$

Определяющим геометрическим размером основного аппарата любой стадии, оснащаемой фильтрами периодического либо непрерывного действия, является рабочая поверхность. При комплектовании стадии  $j$  ХТС рамными и камерными фильтр-прессами, предназначенными для выделения твердой фазы обрабатываемой суспензии ( $j \in Jf_i, i = \overline{1, I}$ ), необходимая рабочая поверхность определяется объемом получаемого осадка и глубиной рам или камер фильтра применяемой модификации (толщина слоя осадка  $\delta_{ij}$  соответствует половине глубины рамы или камеры):

$$X_j \geq u_{ij} \frac{v_{ij}w_i}{\delta_{ij}}, j \in Jf_i, i = \overline{1, I}. \quad (2.28)$$

Необходимые рабочие поверхности фильтров всех других типов, в том числе и фильтр-прессов в случае реализации очистного фильтрования, определяются количеством получаемого продукта (массой осадка или объемом фильтрата), удельной производительностью  $a_{ij}$  фильтра по продукту (в кг/(м<sup>2</sup>·ч) для осадка и м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) для фильтрата) и временем  $\tau_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{h_{ij}}$  занятости аппарата стадии  $j$  ХТС переработкой партии  $i$ -го продукта (см.

п. 1.2.1). Аналогично определяются значения размеров основных аппаратов стадий, оснащаемых сушилками

непрерывного действия – массой сухого продукта или испаряемой влаги, значениями  $a_{ij}$  и  $\tau_{ij}$ . Определяющим геометрическим размером сушилки может быть как рабочий объем (барабанные, СИН – с кипящим слоем инертного носителя, распылительные), так и рабочая поверхность (ленточные, вальцовые, вальцеленточные). Соответственно их удельные производительности могут быть заданы по сухому продукту, либо по испаряемой влаге в  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$  или  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Таким образом, определяющие геометрические размеры основных аппаратов стадий  $j \in Js_i / (Jf_i \cup Jd_i), i = \overline{1, I}$  должны удовлетворять ограничению

$$X_j \geq u_{ij} \frac{g_{ij} w_i}{a_{ij} \tau_{ij}}, \quad j \in Js_i / (Jf_i \cup Jd_i), \quad i = \overline{1, I}, \quad (2.29)$$

причем размерность удельной производительности  $a_{ij}$  должна соответствовать размерности  $X_j$  и основного материального индекса  $g_{ij}$ .

Довольно часто стадии сушки ХТС МХП оснащаются сушилками периодического действия – роторными вакуумными, вакуумными барабанными ( $j \in Jd_i, i = \overline{1, I}$ ). Сушилки этих типов являются кондуктивными и, в отличие от всех других, имеют два определяющих геометрических размера – рабочий объем и рабочую поверхность (поверхность теплообмена), причем объем ( $X_j^1$ ) определяется по соотношению, аналогичному (2.27), с учетом максимально допустимой степени его заполнения, а поверхность ( $X_j^2$ ) – по соотношению (2.29) с использованием массового материального индекса (массы испаряемой влаги), т.е.

$$\begin{cases} X_j^1 \geq u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*}; \\ X_j^2 \geq u_{ij} \frac{m_{ij} w_i}{a_{ij} \tau_{ij}}; \end{cases} \quad j \in Jd_i, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.30)$$

Таким образом, при постановке задачи АО<sub>sj</sub> для выбора определяющего геометрического размера каждого основного аппарата стадии  $j \in Jb_i, i = \overline{1, I}$  необходимо использовать ограничение (2.27), стадии  $j \in Jf_i, i = \overline{1, I}$  – ограничение (2.28), стадии  $j \in Js_i / (Jf_i \cup Jd_i), i = \overline{1, I}$  – ограничение (2.29), а в случае  $j \in Jd_i, i = \overline{1, I}$  – ограничение (2.30).

В заключение приведем соотношения, общие для всех стадий ХТС МХП. Во-первых, соотношение, аналогичное (2.13), определяющее зависимость значений  $u_{ij}$  от параметров  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ , характеризующих способ переработки партий продуктов на стадии  $j$  ХТС:

$$u_{ij} = \frac{p_{ij} + (1 - p_{ij}) n_{ij}}{n_{ij}} \frac{1}{r_{ij}}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.31)$$

Во-вторых, в подавляющем большинстве случаев стадии ХТС МХП оснащаются аппаратами, серийно выпускаемыми предприятиями химического машиностроения, см., например, [107, 108], поэтому в число соотношений для выбора основной аппаратуры нами включено условие принадлежности определяющих размеров основных аппаратов стадий множествам размеров стандартных аппаратов выбранного типа (предусмотренных каталогами продукции предприятий химического машиностроения):

$$X_j \in XS_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2.32)$$

причем для стадий, основными аппаратами которых являются сушилки периодического действия,

$$X_j = \begin{pmatrix} X_j^1 \\ X_j^2 \end{pmatrix}, \quad j \in Jd_i, \quad i \in (1, \dots, I).$$

В третьих, необходимое число основных аппаратов стадий ХТС МХП определяется выбором значений  $n_{ij}, j \in J_i, i = \overline{1, I}$ :

$$n_{ij} - \text{целые}, \quad j \in J_i, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.33)$$

$$N_j = \max_{i=\overline{1, I}} \{n_{ij}\}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (2.34)$$

В четвертых, параметры способа переработки партий продуктов основными аппаратами стадий ХТС могут принимать только определенные значения:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } n_{ij} = 1; \\ 0 \text{ или } 1, & \text{если } n_{ij} > 1; \end{cases} \quad i = \overline{1, I}, \quad j \in J_i; \quad (2.35)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если размер партии не меняется;} \\ \gamma, \gamma > 0 - \text{целое, при дроблении партии;} & i = \overline{1, I}, j \in J_i. \\ 1/\gamma, \gamma > 0 - \text{целое, при объединении партий;} \end{cases} \quad (2.36)$$

Теперь обратимся к соотношениям для выбора определяющих геометрических размеров и числа вспомогательных аппаратов различных типов для стадий ХТС МХП

### 2.3.2. Выбор вспомогательной аппаратуры стадий ХТС МХП

К числу наиболее распространенных типов вспомогательного оборудования аппаратурных стадий ХТС МХП относятся мерники жидкого сырья, сборники промежуточных продуктов и отходов, насосы и теплообменники, как выносные, так и встроенные в основные аппараты (рубашки, змеевики). Для выбора определяющих геометрических размеров (производительностей)  $Xv_{jf}, j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$  и числа  $Nv_{jf}, j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$  каждой группы вспомогательных аппаратов одинакового назначения каждой стадии ХТС необходимы следующие исходные данные, являющиеся результатами решения задачи АО<sub>s</sub>:

– размеры партий продуктов ХТС  $w_i, i = \overline{1, I}$  и коэффициенты их изменения по стадиям  $u_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , см. (2.13);

– значения периодов обработки продуктов на стадиях ХТС  $t_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , число циклов работы основных аппаратов стадий ХТС за один цикл работы системы  $K_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , длительности операций этих циклов, при выполнении которых задействованы вспомогательные аппараты  $dov_{ijf}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, l \in Lv_{ijf}$ , и удельные расходы энергии при реализации операций, связанных с изменением температуры перерабатываемой массы  $env_{ijf}^{ke}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, l \in Lv_{ijf}, ke \in (2, 3)$  (см. п. 2.1.2).

Кроме того, необходимы сведения о типах вспомогательных аппаратов, включаемых в состав АО всех аппаратурных стадий ХТС  $tav_{jf}, j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$  (например,  $tav_{jf} = 1$  – мерник,  $tav_{jf} = 2$  – сборник,  $tav_{jf} = 3$  – насос,  $tav_{jf} = 4$  – встроенный теплообменник,  $tav_{jf} = 5$  – выносной теплообменник), данные регламентов процессов выпуска продуктов о материальных индексах вспомогательных аппаратов  $gv_{ijf}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, l \in Lv_{ijf}$  (объемных  $vv_{ijf}$  или массовых  $mv_{ijf}$ ), допускаемых пределах изменения степени заполнения мерников и сборников  $\varphi v_{ijf}^*, \varphi v_{ijf}^*, i = \overline{1, I}, j \in J_i, f = \overline{1, Fv_j}, tav_{jf} = 1, 2$ , а также множества определяющих геометрических размеров вспомогательных аппаратов, пригодных для оснащения стадий ХТС  $XvS_{jf}, j = \overline{1, J}, f = \overline{1, Fv_j}$ . Типы вспомогательных аппаратов конкретной стадии ХТС определяются характером операций, реализуемых в основных аппаратах при выпуске различных продуктов, способом подачи сырья, отвода целевых продуктов и отходов.

Вид ограничений на изменение значения  $Xv_{jf}$  определяющего геометрического размера (производительности) конкретного вспомогательного аппарата конкретной аппаратурной стадии  $j$  ХТС МХП зависит от его типа. Например, для рабочего объема мерника жидкого сырья, сборника промежуточного продукта или жидких отходов, участвующих в реализации  $l$ -й операции цикла работы основных аппаратов стадии  $j$  ХТС при выпуске  $i$ -го продукта

$$u_{ij} \frac{vv_{ijf} w_i}{\varphi v_{ijf}^*} \leq Xv_{jf} \leq u_{ij} \frac{mv_{ijf} w_i}{\varphi v_{ijf}^*}, i = \overline{1, I}, l \in Lv_{ijf}; \quad (2.37)$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (1, 2).$$

В некоторых случаях можно уточнить выбор этих вспомогательных аппаратов с помощью других параметров конструкции. Так, используя приведенные в [109] соотношения для определения продолжительности опорожнения (заполнения) емкости самотеком, и учитывая, что ее значение не должно превышать длительности соответствующей операции (в секундах), можно записать

$$\frac{1}{s_{jf} \mu_{jf}} \sqrt{\frac{2mv_{ijf} w_i \mu_{ij} S_{jf}}{g}} \leq dov_{ijf} 3600, i = \overline{1, I}, l \in Lv_{ijf}; \quad (2.38)$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (1, 2),$$

где  $S_{jf}, s_{jf}$  – площади сечения аппаратов  $f$ -й группы и штуцеров, используемых для их заполнения или опорожнения;  $\mu_{jf}$  – коэффициент расхода;  $g$  – ускорение свободного падения.

Следовательно, в случаях, когда опорожнение мерника или заполнение сборника осуществляется самотеком, соотношение (2.38) может быть использовано для выбора из аппаратов, удовлетворяющих ограничению (2.37), тех, которые имеют и необходимое соотношение размеров  $S_{jf}$  и  $s_{jf}$ .

Основными характеристиками насосов являются подача (объемная производительность) и напор (давление нагнетания). Необходимый напор на этапе определения АО ХТС рассчитать невозможно, так как его значение зависит от взаимного расположения источника и приемника перекачиваемой массы, конфигурации и сечения соединительного трубопровода. Поэтому в качестве параметра  $Xv_{jf}$  в данном случае используется подача насоса

(м<sup>3</sup>/ч). Поскольку продолжительность работы насоса не должна превышать длительности соответствующей операции загрузки/выгрузки основных аппаратов стадии  $j$  ХТС,

$$Xv_{jf} \geq u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{dov_{ijl}}, i = \overline{1, I}, f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} = 3, l \in Lv_{ij}. \quad (2.39)$$

Для теплообменников стадии  $j$  ХТС в качестве параметра  $Xv_{jf}$  используется поверхность теплообмена. Длительность теплообмена не должна превышать длительности соответствующих операций рабочего цикла основных аппаратов стадии  $j$  ХТС (в секундах), поэтому

$$Xv_{jf} \geq u_{ij} \frac{env_{ij}^{ke} m v_{ij} w_i}{3600 dov_{ijl} Kt_{ijl} \Delta t_{ijl}}, i = \overline{1, I}, ke \in (2, 3), l \in Lv_{ij}; \quad (2.40)$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (4, 5),$$

где  $Kt_{ijl}$ ,  $\Delta t_{ijl}$  – коэффициент теплопередачи и средняя разность температур теплоносителей при ее реализации. Первоначально принимаемые значения  $Kt_{ijl}$  (в соответствии с рекомендациями [109]) и  $\Delta t_{ijl}$  (согласно регламентам выпуска продуктов), уточняются в ходе технологических расчетов аппаратов стадий ХТС (при решении задач  $AS_{sjf}$ ).

Очевидно, что значения  $Xv_{jf}$ , определяемые по соотношениям (2.37), (2.39), (2.40), должны выбираться из множеств размеров (производительностей) доступных стандартных аппаратов, т.е.

$$Xv_{jf} \in XvS_{jf}, f = \overline{1, Fv_j}. \quad (2.41)$$

Необходимое число вспомогательных аппаратов  $f$ -й группы стадии  $j$  ХТС, не являющихся составными частями основных аппаратов, определяется отношением времени их занятости реализацией операций рабочего цикла обработки партий продуктов на стадии к продолжительности цикла, т.е.

$$nv_{ijf} = \text{INT} \left( \frac{K_{ij} \sum_{l \in Lv_{ijf}} dov_{ijl}}{t_{ij}} \right) + 1, i = \overline{1, I}, f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \neq 4, \quad (2.42)$$

а для встроенных теплообменников, очевидно,

$$nv_{ijf} = n_{ij}, i = \overline{1, I}, f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} = 4, \quad (2.43)$$

следовательно,

$$Nv_{jf} = \max_{i=1, I} \{nv_{ijf}\}, f = \overline{1, Fv_j}. \quad (2.44)$$

Таким образом, для выбора мерников и сборников используются соотношения (2.37), (2.38), (2.41), (2.42), (2.44); при выборе насосов – соотношения (2.39), (2.41), (2.42), (2.44); при выборе встроенных теплообменников – соотношения (2.40), (2.41), (2.43), (2.44); выносных теплообменников – соотношения (2.40), (2.41), (2.42), (2.44).

### 2.3.3. Критерий оптимальности аппаратурного оформления стадии ХТС

На этапе выполнения технологических расчетов процесса проектирования МХП из всех видов затрат, связанных с АО стадий ХТС, можно приблизительно оценить только суммарную стоимость выбранных основных и вспомогательных аппаратов. Аппаратурное оформление стадий ХТС МХП, как правило, включает только стандартные аппараты, стоимость которых можно определить по прейскурантам цен на оборудование, серийно выпускаемое предприятиями химического машиностроения, см., например, [107, 108, 110, 111]. Поскольку оптовые и розничные цены обычно существенно различаются, причем цены на аналогичное оборудование у разных производителей не одинаковы, для приблизительной оценки стоимости оборудования в проектных расчетах часто используют заранее сформированные функциональные зависимости в виде одно- или многофакторных регрессионных моделей. Факторами являются параметры конструкции и режима функционирования аппаратов, объективно влияющие на их цену. В большинстве публикаций [2, 4, 19, 51, 104, 106] предлагается рассматривать цену аппарата как функцию его типа и основного размера, а в качестве зависимостей  $s(ta_j, X_j)$  – использовать степенные функции вида  $s(ta_j, X_j) = \alpha_j X_j^{\beta_j}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , где  $\alpha_j = \alpha(ta_j)$ ,  $\beta_j = \beta(ta_j)$  – коэффициенты, определяемые методами регрессионного анализа [112] на основе имеющейся информации о ценах на аппараты различных типов. Например, по состоянию на середину III квартала 2005 г. в тысячах рублей (см. [107, 108, 110, 111]):

– для стальных эмалированных емкостных аппаратов с цилиндрическими рубашками, сальниковыми уплотнениями и механическими перемешивающими устройствами, включая мотор-редукторы,

$$s(ta_j, X_j) = 94,643 X_j^{0,368} (X_j \text{ в м}^3);$$

– для емкостных аппаратов из нержавеющей стали с цилиндрическими рубашками, торцовыми уплотнениями и механическими перемешивающими устройствами, включая мотор-редукторы,

$$s(ta_j, X_j) = 97,665 X_j^{0,796} (X_j \text{ в м}^3);$$

– для рамных фильтр-прессов из нержавеющей стали с закрытым отводом фильтрата и механизированным зажимом (РЗМ), выпускаемых Бердичевским заводом "Прогресс",

$$s(ta_j, X_j) = 55,099 X_j^{0,696} (X_j \text{ в м}^2);$$

– для вертикальных емкостей из нержавеющей стали (мерников и сборников)

$$sv(tav_{jf}, Xv_{jf}) = 22,648 Xv_{jf}^{0,752} (Xv_{jf} \text{ в м}^3);$$

– для насосов химических центробежных типа ХЦМ (герметичных, взрывозащищенных)

$$sv(tav_{jf}, Xv_{jf}) = 68,516 Xv_{jf}^{0,095} (Xv_{jf} - \text{подача в м}^3/\text{ч});$$

– для кожухотрубчатых теплообменников типа ТН, ТК (кожух из нержавеющей стали, трубы из стали 20, трубные решетки из стали 16ГС)

$$sv(tav_{jf}, Xv_{jf}) = 33,449 Xv_{jf}^{0,579} (Xv_{jf} \text{ в м}^2).$$

С применением подобных зависимостей капитальные затраты на основное и вспомогательное технологическое оборудование стадии  $j$  ХТС МХП, можно оценить по формуле

$$Z_j = N_j s(ta_j, X_j) + \sum_{f=1}^{Fv_j} Nv_{jf} sv(tav_{jf}, Xv_{jf}). \quad (2.45)$$

Для оценки капитальных затрат на оборудование стадии  $j$  за период  $Tr$  (аналогично затратам на энергоресурсы при решении задачи АО<sub>s</sub>) определим сумму амортизационных отчислений от стоимости ее оборудования:

$$Zk_j = Ek \frac{Tp}{Ty} \left( N_j s(ta_j, X_j) + \sum_{f=1}^{Fv_j} Nv_{jf} sv(tav_{jf}, Xv_{jf}) \right), \quad (2.46)$$

где  $Ek$  – нормативный коэффициент окупаемости для оборудования (0.15);  $Ty$  – годовой эффективный фонд рабочего времени ХТС (ч) с учетом сменности ее работы и продолжительностей переходов с выпуска одних продуктов на другие согласно календарному плану.

Здесь необходимо отметить два момента:

1. При формировании зависимостей  $s(ta_j, X_j)$  для сушилок периодического действия в качестве основного размера используется их рабочий объем ( $X_j^1$ ).

2. Встроенные теплообменники могут быть составными частями стандартного аппарата, но могут закупаться или изготавливаться отдельно и помещаться в аппараты при их монтаже. Очевидно, что в первом случае  $sv(tav_{jf}, Xv_{jf}) = 0$ .

Таким образом, общая постановка задачи АО<sub>sj</sub> определения АО стадии ХТС МХП и способа обработки партий продуктов ее основными аппаратами предусматривает поиск минимума критерия (2.46) при условиях (2.27) – (2.44). Постановки задач определения АО конкретных стадий, с основными и вспомогательными аппаратами указанных типов, включают лишь некоторые из соотношений (2.27) – (2.44). Например, если основными аппаратами стадии являются емкостные реакторы из нержавеющей стали, а к числу вспомогательных относятся две группы мерников жидкого сырья из нержавеющей стали ( $f=1$  и  $f=2$ ), насосы типа ХЦМ для передачи промежуточного продукта на следующую стадию ( $f=3$ ) и теплообменные рубашки, являющиеся составными частями стандартных реакторов ( $f=4$ ), то постановка задачи АО<sub>sj</sub> для этой стадии сводится к поиску минимума функции

$$Zk_j = Ek \frac{Tp}{Ty} \left( N_j 97,665 X_j^{0,796} + Nv_{j1} 22,648 Xv_{j1}^{0,752} + Nv_{j2} 22,648 Xv_{j2}^{0,752} + Nv_{j3} 68,516 Xv_{j3}^{0,095} \right), \quad (2.47)$$

при следующих ограничениях на изменение параметров  $N_j, X_j$  и  $N_{jf}, X_{jf}, f=1,4$ , а также  $p_{ij}, r_{ij}, i=1, I$ :

$$u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \leq X_j \leq u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*}, \quad i=1, I; \quad (2.48)$$

$$u_{ij} = \frac{p_{ij} + (1-p_{ij})n_{ij}}{n_{ij}} \frac{1}{r_{ij}}, \quad i=1, I; \quad (2.49)$$

$$X_j \in XS_j; \quad (2.50)$$

$$n_{ij} - \text{целые}, \quad i=1, I; \quad (2.51)$$

$$N_j = \max_{i=1, I} \{n_{ij}\}; \quad (2.52)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } n_{ij} = 1; \\ 0 \text{ или } 1, & \text{если } n_{ij} > 1; \end{cases} \quad i=1, I; \quad (2.53)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если размер партии не меняется;} \\ \gamma, \gamma > 0 - \text{целое, при дроблении партии;} & i = \overline{1, I}; \\ 1/\gamma, \gamma > 0 - \text{целое, при объединении партий;} \end{cases} \quad (2.54)$$

$$u_{ij} \frac{v_{ijf} w_i}{\varphi v_{ijf}^*} \leq Xv_{jf} \leq u_{ij} \frac{v_{ijf} w_i}{\varphi v_{ijf}^*}, \quad i = \overline{1, I}, f \in (1, 2), l \in Lv_{ijf}; \quad (2.55)$$

$$\frac{1}{s_{jf} \mu_{jf}} \sqrt{\frac{2mv_{ijf} w_i u_{ij} S_{jf}}{g}} \leq dov_{ijf} 3600, \quad i = \overline{1, I}, f \in (1, 2), l \in Lv_{ijf}; \quad (2.56)$$

$$Xv_{j3} \geq u_{ij} \frac{v_{ij3l} w_i}{dov_{ij3l}}, \quad i = \overline{1, I}, l \in Lv_{ij3}; \quad (2.57)$$

$$Xv_{j4} \geq u_{ij} \frac{emv_{ij4l}^{ke} m_{ij4l} w_i}{3600 dov_{ij4l} K_{ij4l} \Delta t_{ij4l}}, \quad i = \overline{1, I}, l \in Lv_{ij4}, ke \in (2, 3); \quad (2.58)$$

$$Xv_{jf} \in XvS_{jf}, \quad f = \overline{1, 4}; \quad (2.59)$$

$$nv_{ijf} = \text{INT} \left( \frac{K_{ij} \sum_{l \in Lv_{ijf}} dov_{ijl}}{t_{ij}} \right) + 1, \quad i = \overline{1, I}, f = \overline{1, 3}; \quad (2.60)$$

$$Nv_{jf} = \max_{i=1, I} \{nv_{ijf}\}, \quad f = \overline{1, 3}. \quad (2.61)$$

Поскольку все параметры задач вида (2.47) – (2.61), изменяются дискретно, задачи  $AO_{sj}$  являются задачами дискретной оптимизации.

Важно отметить, что предложенная нами постановка задач  $AO_{sj}$  дает дополнительные возможности обеспечения выполнения ограничений (2.27) – (2.30) и (2.37), (2.39), (2.40), связанные с изменениями значений  $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ . Использование этих возможностей потребует повторного решения задачи  $AO_s$ .

Таким образом, в данном разделе представлены следующие элементы методики определения АО ХТС МХП:

1. На основе анализа основных особенностей функционирования АО ХТС МХП сформирована система допущений, в рамках которой разработаны математические постановки задач определения АО ХТС и характеристик режима его функционирования. Впервые система допущений подобных задач предусматривает параллельно-последовательную структуру материальных потоков ХТС при выпуске продуктов, а также учитывает возможность дробления/укрупнения партий продуктов на некоторых стадиях их переработки.

2. Установлены информационные связи между задачами оптимизации режима функционирования ХТС и оборудования ее аппаратурных стадий (задачей  $AO_s$ ) и задачами определения АО каждой отдельной стадии ХТС (задачами  $AO_{sj}$ ). Определены множества исходных данных для их решения, указаны источники их получения.

3. Предложена оригинальная математическая постановка задачи оптимизации режима функционирования ХТС проектируемого МХП и оборудования ее стадий (задачи  $AO_s$ ): разработана математическая модель функционирования АО ХТС МХП, обоснован вид критерия оптимальности решения этой задачи.

4. Разработаны математические постановки задач определения АО стадий ХТС МХП (задач  $AO_{sj}$ ): обоснован вид целевой функции для различных ситуаций, определены ограничения для стадий с основными аппаратами различных типов и различными наборами вспомогательной аппаратуры.

### 3. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНО- ГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

В данной главе рассматриваются разработанные нами методы и алгоритмы решения задач определения характеристик режима функционирования ХТС проектируемого МХП и оборудования ее стадий (задачи  $AO_s$ ), выбора АО стадий ХТС и способов переработки партий продуктов их аппаратами (задач  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ). В разделах 1 и 2, см. пп. 1.1.2 и 2.1.2, отмечалось, что процесс совместного решения этих задач является итерационным, так как для решения задачи  $AO_s$  необходимы некоторые результаты решения задач  $AO_{sj}$  – значения числа основных аппаратов стадий ХТС, используемых при выпуске каждого продукта, и указателей способа переработки партий продуктов на стадиях ХТС ( $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ ), а также рабочих объемов или (и) поверхностей основных аппаратов некоторых стадий фильтрации и сушки.

Поэтому предлагается следующая общая схема процесса совместного решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$  :

1. Прогноз начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ , значений  $X_j$ ,  $j \in Js_i/Jf_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

2. Решение задачи  $AO_s$ , т.е. определение значений размеров партий продуктов  $w_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  и соответствующих значений моментов начала и окончания каждой операции каждого цикла работы основных аппаратов каждой стадии выпуска каждого продукта  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ ,  $k = \overline{1, K_{ij}}$ ,  $l = \overline{1, L_{ijk}}$ , удовлетворяющих условиям (2.3) – (2.23) и обеспечивающих минимальное значение критерия (2.24).

3. Решение задач  $AO_{sj}$  для всех аппаратурных стадий ХТС, т.е. выбор числа и определяющих геометрических размеров основных ( $N_j, X_j$ ) и вспомогательных ( $Xv_{jf}, Nv_{jf}, f = \overline{1, Fv_j}$ ) аппаратов стадий  $j = \overline{1, J}$ , а также значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ , обеспечивающих выполнение ограничений (2.27) – (2.44) и минимум критериев (2.46).

4. Возврат на п. 1, если полученные в п. 3 значения  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$  и  $X_j$ ,  $j \in Js_i/Jf_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  не совпадают с их прогнозом.

Определяющим для успешной реализации процесса совместного решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$  является выбор начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ : с одной стороны, они должны, по возможности, обеспечивать существование допустимых решений задач, с другой – соответствующие значения критериев оптимальности должны быть близки к минимальным. Нами разработаны необходимые условия существования решений задач определения АО ХТС МХП, проверка и обеспечение выполнения которых позволяет давать обоснованный прогноз этих значений. Подобные условия впервые сформулированы Е.Н. Малыгиным в работах [10, 32] и названы "условиями проектируемости" АО ХТС МХП.

### 3.1. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АО ХТС МХП

Существование допустимых решений задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$  обусловлено выполнением ограничений (2.3), (2.19) – (2.23) математической модели функционирования АО ХТС проектируемого МХП и комбинаций ограничений (2.27) – (2.30), (2.32) – (2.44), соответствующих типам основных и вспомогательных аппаратов конкретных стадий. При разработке необходимых условий существования решений этих задач использованы только ограничения (2.27) – (2.30), (2.32) на размеры основных аппаратов стадий ХТС, и ограничения (2.3), (2.23) на ее производительность при упрощенном представлении циклов переработки партий продуктов на стадиях ХТС, см. (1.3) – (1.7), (1.9), т.е. без определения продолжительностей отдельных операций, моментов начала и окончания их реализации. В качестве обоснований такого подхода можно привести следующие соображения:

– при успешном выборе определяющих геометрических размеров основных аппаратов стадий ХТС выбор вспомогательного оборудования, как правило, не вызывает затруднений и не приводит к необходимости изменения значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ ,  $X_j$ ,  $j \in Js_i/Jf_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ ;

– ограничения (2.19) – (2.20), (2.33) – (2.36), определяющие допустимые значения  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ , учитываются алгоритмически – при их прогнозе и изменении;

– упрощенное представление циклов переработки партий продуктов на стадиях ХТС и отказ от оптимизации их длительностей с использованием ограничений (2.21), (2.22) может привести к некоторому завышению значений продолжительностей выпуска продуктов  $T_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  по сравнению с минимально необходимыми, т.е. дает их верхние оценки.

К числу сформулированных нами необходимых условий существования решений задач определения АО ХТС проектируемого МХП относятся:

1) условие существования диапазонов допустимых значений  $w_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  размеров партий всех продуктов, т.е. принципиальной возможности их переработки с помощью аппаратов, размеры которых принадлежат множествам  $XS_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

2) условие существования допустимых вариантов АО стадий ХТС, т.е. наличия основных аппаратов подходящих размеров для каждой стадии;

3) условие обеспечения требуемой производительности ХТС, т.е. возможности выполнения ограничения (2.3) с помощью вариантов АО стадий системы, выявленных при проверке выполнения условия 2).

Перейдем к подробному рассмотрению этих условий, проверка выполнения которых осуществляется при фиксированных значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ .

#### 3.1.1. Условие существования диапазонов допустимых значений размеров партий продуктов ХТС

Это условие сформировано на базе ограничений (2.27) – (2.30), (2.32) и позволяет выявить принципиальную возможность или отсутствие возможности переработки партий каждого продукта с помощью аппаратов, размеры которых принадлежат множествам  $XS_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  :

$$w_i^{\min} \leq w_i^{\max}, i = \overline{1, I}; \quad (3.1)$$

$$\text{где } w_i^{\max} = \min \left\{ \begin{array}{l} \min_{j \in Jb_i} \left\{ \frac{X_j^{\max} \Phi_{ij}^*}{v_{ij} u_{ij}} \right\}; \\ \min_{j \in Jf_i} \left\{ \frac{X_j^{\max} \delta_{ij}}{v_{ij} u_{ij}} \right\}; \\ \min_{j \in Js_i \setminus (Jf_i \cup Jd_i)} \left\{ \frac{X_j^{\max} a_{ij} \tau_{ij}^*}{g_{ij} u_{ij}} \right\}; \\ \min_{j \in Jd_i} \left\{ \frac{X_j^{1\max} \Phi_{ij}^*}{v_{ij} u_{ij}}, \frac{X_j^{2\max} a_{ij} \tau_{ij}^*}{m_{ij} u_{ij}} \right\}; \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$w_i^{\min} = \max_{j \in Jb_i} \left\{ \frac{X_j^{\min} \Phi_{ij}^*}{v_{ij} u_{ij}} \right\}; \quad (3.3)$$

$X_j^1, X_j^2, j \in Jd_i$  – значения рабочего объема и рабочей поверхности сушилок периодического действия;  $X_j^{\min}, X_j^{\max}$  – нижняя и верхняя оценка определяющего размера основного аппарата стадии  $j$  ХТС, причем  $X_j^{\min} = \min\{X_j | X_j \in XS_j, X_j > X_{j^*}\}, j \in Jb_i$ , а  $X_j^{\max} = \max\{X_j | X_j \in XS_j\}$ , так как ограничения (2.28) – (2.30) односторонние, а получить верхнюю оценку значения  $X_j, j \in Jb_i$  на основе ограничения (2.27) затруднительно;

$$\tau_{ij}^* = \min \left\{ \frac{m_{ij} X_j^{1\max} \Phi_{ij}^*}{v_{ij} X_j^{2\max} a_{ij}}, j \in Jd_i; \max_{j \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{ij}\}; \right. \\ \left. \min_{k=j, j^n} \left\{ \frac{\max_{j \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{ij}\} - z_{ik} \tau_{ik}}{h_{ij}} [z_{ik} + (1 - z_{ik}) h_{ij}] [p_{ij} + (1 - p_{ij}) n_{ij}] \right\} \right. \quad (3.4)$$

верхняя оценка значения длительности переработки одной партии  $i$ -го продукта на стадии  $j \in Js_i / Jf_i$  ХТС, для определения которой согласно (1.2), (1.5), (1.6) используются только исходные данные задач АО<sub>s</sub> и АО<sub>sj</sub>,  $j = \overline{1, J}$ , а значения периодов обработки партий продуктов основными аппаратами стадий ХТС  $\theta_{ij}, j \in Jb_i \cup Jf_i, i = \overline{1, I}$  вычисляются по соотношению, аналогичному (1.9):

$$\theta_{ij} = \max_{\substack{l \in \{y | pp_{ye}^i = j, \\ e \in \{1, \dots, E_y^i\}, \\ y \in \{1, \dots, Y^i\}\}}} \left\{ \frac{r_{i, pp_{le}^i}}{c_{i, pp_{le}^i}} \left[ \tau_{i, pp_{le}^i} + \max_{\substack{k < e, \\ r_{i, pp_{lk}^i} > r_{i, pp_{le}^i}}} \left\{ \left( \frac{1}{r_{i, pp_{le}^i}} - \frac{1}{r_{i, pp_{l, e-1}^i}} \right) \theta_{i, pp_{lk}^i} \right\} \right] + \right. \\ \left. + \max_{\substack{k > e, \\ r_{i, pp_{lk}^i} > r_{i, pp_{le}^i}}} \left\{ \left( \frac{1}{r_{i, pp_{le}^i}} - \frac{1}{r_{i, pp_{l, e+1}^i}} \right) \theta_{i, pp_{lk}^i} \right\} \right\}, \quad (3.5)$$

$$\text{где } c_{ij} = \begin{cases} n_{ij}, & \text{если } p_{ij} = 0; \\ 1, & \text{если } p_{ij} = 1; \end{cases}$$

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \tau_{ij}^0, & \text{если } j \neq js' \vee js'' \forall js \in Jf_i; \\ \tau_{ij}^0 + \sum_{js \in Jf_i: j = js' \vee js''} z_{ij} \tau_{i, js}^0 h_{i, js}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\tau_{ij}^0 = \begin{cases} \tau_{ij}^0, & j \in Jb_i; \\ \frac{m_{ij} \delta_{ij}}{v_{ij} a_{ij}}, & j \in Jf_i. \end{cases} \quad (3.7)$$

Напомним (см. п. 1.2.4), что порядок применения соотношения (3.5) предусматривает предварительное ранжирование стадий каждого  $u$ -го маршрута обработки партий  $i$ -го продукта в порядке убывания значений  $r_{i, pp_{ye}^i}, e = \overline{1, E_y^i}$ .



Рис. 3.1 иллюстрирует условие (3.1) для ХТС, стадии которой оснащены основными аппаратами различных типов.

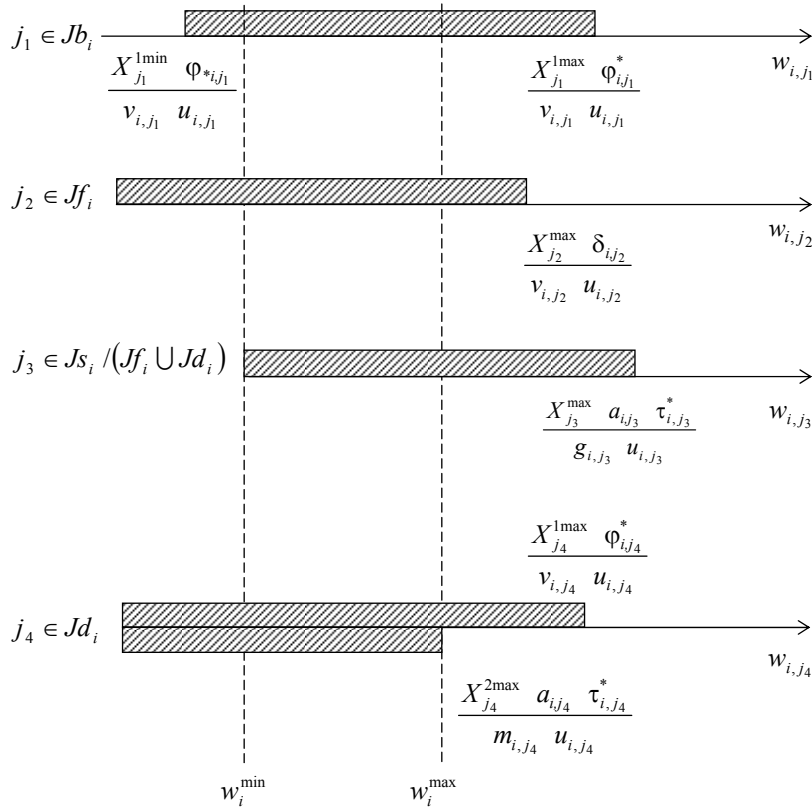


Рис. 3.1. Иллюстрация к условию (3.1) для  $i$ -го продукта  $\sigma$ -го определяющего геометрического размера основного аппарата стадии  $j \in Jb_i$ ,  $i \in (1, \dots, I)$  формируется из следующих соображений:

- а) согласно (2.4),  $T_i > Tc_i w c_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ , следовательно (см. (2.6), (2.7)),  $T_i > Tc_i \frac{Q_i}{bc_i w_i}$ , т.е.  $w_i > Tc_i \frac{Q_i}{T_i bc_i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in Jb_i$ ;
- б) согласно (2.8),  $Tc_i = \max_{j \in J_i} \{t_{ij}\}$ , где значения  $t_{ij}$  могут быть определены так, как показано в п. 2.1.1:  $t_{ij} = \theta_{ij} r_{ij} bc_i$ ;
- в) поскольку по исходным данным задач  $AO_s$  и  $AO_{s_j}$ ,  $j = \overline{1, J}$  можно рассчитать только значения  $\theta_{ij}$ ,  $j \in Jb_i \cup Jf_i$  (см. п. 1.2.1), получим:  $Tc_i \geq bc_i \max_{j \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{ij} r_{ij}\}$ , следовательно (см. (2.27)),

$$X_j \geq u_{ij} \frac{v_{ij} \max_{o \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{io} r_{io}\} Q_i}{\Phi_{ij}^* T_i}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j \in Jb_i;$$

г) согласно (2.3),  $Tr \geq \sum_{i=1}^I T_i$ ,

т.е.  $Tr > \frac{1}{X_j} \sum_{i=1}^I u_{ij} \frac{v_{ij} \max_{o \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{io} r_{io}\} Q_i}{\Phi_{ij}^*}$  и  $X_{j^*} = \frac{1}{Tr} \sum_{i=1}^I u_{ij} \frac{v_{ij} \max_{o \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{io} r_{io}\} Q_i}{\Phi_{ij}^*}$ ,  $j \in Jb_i$ . (3.8)

При определении значений  $X_j^{\min}$ ,  $j \in Jb_i$ ,  $i \in (1, \dots, I)$  следует учитывать возможность возникновения ситуации  $X_{ja^*} > X_{ja}^{\max}$ ,  $ja \in Jb_i$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ , следствием которой является очевидное невыполнение условия (3.1). В этой ситуации необходимо уменьшить значение  $X_{ja^*}$ , т.е. изменить зафиксированные значения  $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$  таким образом, чтобы значение  $X_{ja}^{\min}$  не превышало значения максимального элемента множества  $X_{S_{ja}}$ . Согласно (3.8), уменьшить значение  $X_{ja^*}$  можно в результате уменьшения значений  $\max_{o \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{io} r_{io}\}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$  или (и) уменьшения значений  $u_{i,ja}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ . Уменьшить значение

$\max_{o \in Jb_{ip} \cup Jf_{ip}} \{\theta_{ip,o} r_{ip,o}\}$  для какого-либо продукта  $ip$  можно в результате уменьшения значений  $\theta_{ip,os}$  или (и)  $r_{ip,os}$  по стадии  $os \in J_{ip}$ , лимитирующей значение межциклового периода ХТС при выпуске  $ip$ -го продукта (для нее справедливо  $\theta_{ip,os} r_{ip,os} = \max_{o \in Jb_{ip} \cup Jf_{ip}} \{\theta_{ip,o} r_{ip,o}\}$ ). К уменьшению значений  $\theta_{ip,os}$  может привести увеличение значений  $n_{ip,os}$  (при  $p_{ip,os} = 0$ ), см. (3.5). Уменьшить значение  $u_{ic,ja}$  можно путем разделения партий  $ic$ -го продукта на равные порции для последовательной или синхронной переработки в аппаратах стадии  $ja$  ХТС, т.е. увеличения значения  $r_{ic,ja}$ , либо значения  $n_{ic,ja}$ , если  $p_{ic,ja} = 1$ . Выбор конкретного варианта уменьшения значения  $X_{ja^*}$  в ситуации  $X_{ja^*} > X_{ja}^{\max}$ ,  $ja \in Jb_i$ ,  $i \in (1, \dots, I)$  необходимо согласовывать с экспертом (технологом), который может оценить степень их приемлемости с точки зрения технологии реализации соответствующих стадий переработки партий продуктов.

Невыполнение условия (3.1), т.е. ситуация  $w_{ik}^{\min} > w_{ik}^{\max}$ ,  $ik \in (1, \dots, I)$ , свидетельствует о том, что ограничения (2.27) – (2.30), (2.32) для продукта  $ik$  не могут быть выполнены при зафиксированных значениях  $n_{ik,j}$ ,  $r_{ik,j}$ ,  $p_{ik,j}$ ,  $j \in J_{ik}$ . Рекомендации по их изменениям, в результате которых условие (3.1) может быть выполнено, связаны с уменьшением значения  $w_{ik}^{\min}$ , или (и) увеличением  $w_{ik}^{\max}$ .

Согласно (3.3), для какой-либо стадии  $jk \in Jb_{ik}$  должно выполняться равенство  $w_{ik}^{\min} = \frac{X_{jk}^{\min} \Phi_{ik,jk^*}}{v_{ik,jk} u_{ik,jk}}$  (на

рис. 3.1 – для стадии  $j_1$ ). Следовательно, уменьшить  $w_{ik}^{\min}$  можно за счет увеличения

$u_{ik,jk} = \frac{p_{ik,jk} + (1 - p_{ik,jk}) n_{ik,jk}}{n_{ik,jk} r_{ik,jk}} \cdot 1$  (см. (2.13)) или (и) уменьшения  $X_{jk}^{\min}$ , т.е. (см. выше) уменьшения значе-

ния  $X_{jk^*}$  таким образом, чтобы  $X_{jk}^{\min}$  соответствовало меньшему размеру из множества  $X_{S_{jk}}$ . Увеличить значение  $u_{ik,jk}$  можно в результате уменьшения значения  $r_{ik,jk}$ , т.е. объединения в аппаратах стадии  $jk$  ХТС нескольких партий  $ik$ -го продукта для совместной переработки, либо, при  $n_{ik,jk} > 1$  и  $p_{ik,jk} = 1$ , – отказа от синхронной переработки равных долей партии  $ik$ -го продукта в аппаратах стадии  $jk$ , т.е. перехода от  $p_{ik,jk} = 1$  к  $p_{ik,jk} = 0$ .

Варианты изменения значений  $n_{ik,j}$ ,  $r_{ik,j}$ ,  $p_{ik,j}$ ,  $j \in J_{ik}$ , которые могут привести к увеличению значения  $w_{ik}^{\max}$ , связаны с уменьшением значения  $u_{ik,jl}$  для стадии  $jl \in J_{ik}$  (на рис. 3.1 – стадия  $j_4$ ), где достигается равенство (см. (3.2)):

- $w_{ik}^{\max} = \frac{X_{jl}^{\max} \Phi_{ik,jl}^*}{v_{ik,jl} u_{ik,jl}}$ , если  $jl \in Jb_{ik}$ ;
- $w_{ik}^{\max} = \frac{X_{jl}^{\max} \delta_{ik,jl}}{v_{ik,jl} u_{ik,jl}}$ , если  $jl \in Jf_{ik}$ ;
- $w_{ik}^{\max} = \frac{X_{jl}^{\max} a_{ik,jl} \tau_{ik,jl}^*}{g_{ik,jl} u_{ik,jl}}$ , если  $jl \in Js_{ik} \setminus (Jf_{ik} \cup Jd_{ik})$ ;
- $w_{ik}^{\max} = \frac{X_{jl}^{\max} \Phi_{ik,jl}^*}{v_{ik,jl} u_{ik,jl}}$  или  $w_{ik}^{\max} = \frac{X_{jl}^{\max} a_{ik,jl} \tau_{ik,jl}^*}{m_{ik,jl} u_{ik,jl}}$ , если  $jl \in Jd_{ik}$ .

Для уменьшения значения  $u_{ik,jl}$  следует (см. выше) увеличить значение  $r_{ik,jl}$  или зафиксировать:  $n_{ik,jl} > 1$ ,  $p_{ik,jl} = 1$ .

Как видно, число возможных вариантов изменений значений  $n_{ik,j}$ ,  $r_{ik,j}$ ,  $p_{ik,j}$ ,  $j \in J_{ik}$ , которые могут обеспечить выполнение условия (3.1) в ситуации  $w_{ik}^{\min} > w_{ik}^{\max}$ ,  $ik \in (1, \dots, I)$ , достаточно велико. Далеко не все эти варианты могут оказаться приемлемыми, например, из-за вероятного ухудшения качества реализации соответствующих стадий переработки партий продуктов. Поэтому при отборе допустимых вариантов в этой ситуации также необходимо учитывать мнение эксперта. Заметим, что решение об изменении значений  $r_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ ,  $j \in J_i$  обычно принимается в последнюю очередь.

### 3.1.2. Условие существования допустимых вариантов АО стадий ХТС

Это условие, сформированное на базе ограничений (2.27) – (2.30), (2.32) и условия (3.1), определяет возможность оснащения каждой стадии ХТС основными аппаратами, размеры которых являются элементами множеств  $X_{S_j}$ ,  $j = \overline{1, J}$ :

$$[X_j^L, X_j^U] \cap XS_j \neq \emptyset, j = \overline{1, J}, \quad (3.9)$$

где

$$X_j^U = \begin{cases} \min_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i^{\max}}{\Phi_{ij}^*} \right\}, & j \in Jb_i, i \in (1, \dots, I); \\ X_j^{\max}, & j \in Js_i; \end{cases} \quad (3.10)$$

$$X_j^L = \begin{cases} \max_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i^{\min}}{\Phi_{ij}^*} \right\}, & j \in Jb_i, i \in (1, \dots, I); \\ \max_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i^{\min}}{\delta_{ij}} \right\}, & j \in Jf_i, i \in (1, \dots, I); \\ \max_i \left\{ u_{ij} \frac{g_{ij} w_i^{\min}}{a_{ij} \tau_{ij}^*} \right\}, & j \in Js_i / (Jf_i \cup Jd_i), i \in (1, \dots, I); \\ \left( \begin{array}{l} X_j^{1L} = \max_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i^{\min}}{\Phi_{ij}^*} \right\}; \\ X_j^{2L} = \max_i \left\{ u_{ij} \frac{m_{ij} w_i^{\min}}{a_{ij} \tau_{ij}^*} \right\}; \end{array} \right) & j \in Jd_i, i \in (1, \dots, I). \end{cases} \quad (3.11)$$

Рис. 3.2 иллюстрирует проверку выполнения условия (3.9) для стадии  $j \in Jb_i, i = i_1, i_2, i_3$ .

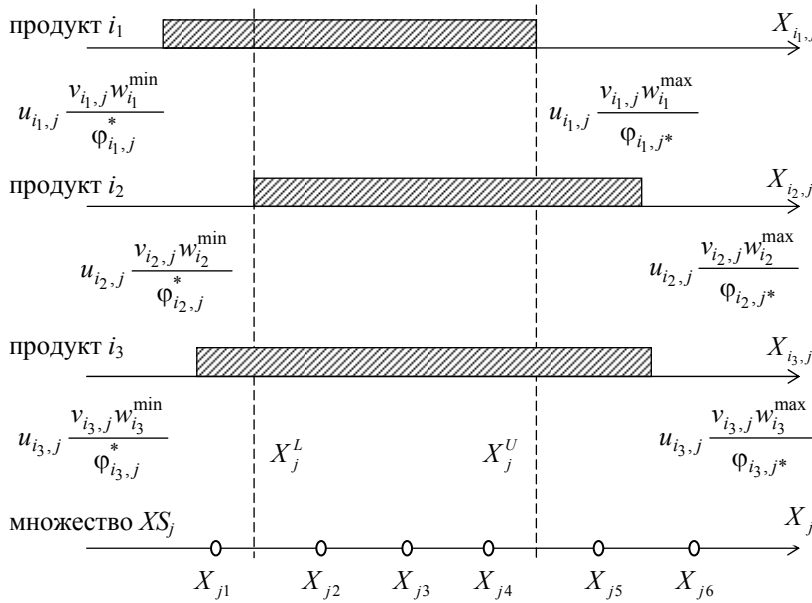


Рис. 3.2. Иллюстрация к условию (3.9) для стадии:

$$j \in Jb_i, i = i_1, i_2, i_3 : [X_j^L, X_j^U] \cap XS_j = \{X_{j2}, X_{j3}, X_{j4}\}$$

Несовпадение этого условия для какой-либо стадии  $jm \in (1, \dots, J)$ , т.е. возникновение ситуации  $[X_{jm}^L, X_{jm}^U] \cap XS_{jm} = \emptyset$ , может быть вызвано следующими обстоятельствами:

1)  $X_{jm}^U < \min\{X_{jm} | X_{jm} \in XS_{jm}\}, jm \in Jb_{il}$ , т.е. размеры аппаратов из множества  $XS_{jm}$  слишком велики для переработки партий продукта  $il \in (1, \dots, I)$ , которому соответствует равенство (см. (3.10)); на рис. 3.2 – продукт  $i_1$ )

$$X_{jm}^U = u_{il,jm} \frac{v_{il,jm} w_{il}^{\max}}{\Phi_{il,jm}^*}, \quad jm \in Jb_{il}.$$

2)  $X_{jm}^L > X_{jm}^{\max}, jm \in J_{im}$ , т.е. размеры аппаратов из множества  $XS_{jm}$  слишком малы для переработки партий продукта  $im \in (1, \dots, I)$  (на рис. 3.2 – продукт  $i_2$ ), которому соответствует (см. (3.11)) одно из равенств:

$$\text{– при } jm \in Jb_{im} - X_{jm}^L = u_{im,jm} \frac{v_{im,jm} w_{im}^{\min}}{\Phi_{im,jm}^*};$$

$$- \text{при } jm \in Jf_{im} - X_{jm}^L = u_{im,jm} \frac{v_{im,jm} w_{im}^{\min}}{\delta_{im,jm}};$$

$$- \text{при } jm \in Js_{im} / (Jf_{im} \cup Jd_{im}) - X_{jm}^L = u_{im,jm} \frac{g_{im,jm} w_{im}^{\min}}{a_{im,jm} \tau_{im,jm}^*};$$

$$- \text{при } jm \in Jd_{im} - X_{jm}^{AL} = u_{im,jm} \frac{v_{im,jm} w_{im}^{\min}}{\Phi_{im,jm}^*} \text{ или (и) } X_{jm}^{2L} = u_{im,jm} \frac{m_{im,jm} w_{im}^{\min}}{a_{im,jm} \tau_{im,jm}^*}.$$

В первом случае для выполнения условия (3.9) необходимо увеличить значение  $X_{jm}^U = u_{il,jm} \frac{v_{il,jm} w_{il}^{\max}}{\Phi_{il,jm}^*}$ ,  $jm \in Jb_{il}$ , т.е.:

а) увеличить значение  $u_{il,jm}$  путем уменьшения значения  $r_{il,jm}$ , или, при  $n_{il,jm} > 1$ , – заменить значение  $p_{il,jm} = 1$  на  $p_{il,jm} = 0$  (см. п. 3.1.1);

б) увеличить значение  $w_{il}^{\max}$  путем уменьшения значения  $u_{il,jn}$  для стадии  $jn \in J_{il}$ , которой при  $jm \in Jb_{il}$  соответствует ситуация  $w_{il}^{\max} = \frac{X_{jn}^{\max} \Phi_{il,jn}^*}{v_{il,jn} u_{il,jn}}$ , при  $jn \in Jf_{il}$  – ситуация  $w_{il}^{\max} = \frac{X_{jn}^{\max} \delta_{il,jn}}{v_{il,jn} u_{il,jn}}$ , при  $jn \in Js_{il} / (Jf_{il} \cup Jd_{il})$

$$- \text{ситуация } w_{il}^{\max} = \frac{X_{jn}^{\max} a_{il,jn} \tau_{il,jn}^*}{g_{il,jn} u_{il,jn}}, \text{ а при } jn \in Jd_{il} - \text{ситуация } w_{il}^{\max} = \frac{X_{jn}^{1\max} \Phi_{il,jn}^*}{v_{il,jn} u_{il,jn}} \text{ или } w_{il}^{\max} = \frac{X_{jn}^{2\max} a_{il,jn} \tau_{il,jn}^*}{m_{il,jn} u_{il,jn}},$$

т.е. увеличить значение  $r_{il,jn}$  или установить:  $n_{il,jn} > 1$ ,  $p_{il,jn} = 1$  (см. п. 3.1.1);

в) выполнить комбинации действий п. а) и п. б).

Заметим, что совпадение номеров стадий  $jm \in Jb_{il}$  и  $jn \in Jb_{il}$ , т.е. возникновение конфликта между действиями п. а) и п. б), невозможно даже теоретически, так как тогда, согласно (3.2), (3.10),

$$X_{jn}^U = u_{il,jn} \frac{v_{il,jn} X_{jn}^{\max} \Phi_{il,jn}^*}{\Phi_{il,jn}^*} > X_{jn}^{\max}, \text{ а поскольку } X_{jn}^{\max} = \max \{X_{jn} \mid X_{jn} \in XS_{jn}\}, \text{ то очевидно } X_{jn}^U \geq \min \{X_{jn} \mid X_{jn} \in XS_{jn}\}.$$

Во втором случае возможности обеспечения выполнения условия (3.9) связаны с уменьшением значения  $X_{jm}^L$ :

а) уменьшение значения  $u_{im,jm}$  путем увеличения значения  $r_{im,jm}$ , или увеличения значения  $n_{im,jm}$  и замены значения  $p_{im,jm} = 0$  на  $p_{im,jm} = 1$ ;

б) уменьшение значения  $w_{im}^{\min}$  в результате увеличения значения  $u_{im,jp}$  для стадии  $jp \in Jb_{im}$ , которой соответствует равенство  $w_{im}^{\min} = \frac{X_{jp}^{\min} \Phi_{im,jp}^*}{v_{im,jp} u_{im,jp}}$  (уменьшения значения  $r_{im,jp}$ , а при  $n_{im,jp} > 1$ , замены  $p_{im,jp} = 1$  на  $p_{im,jp} = 0$ ), либо уменьшения  $X_{jp}^{\min}$  до меньшего размера аппарата из множества  $XS_{jp}$  путем уменьшения значений

$$\max_{o \in Jb_i \cup Jf_i} \{\theta_{io} r_{io}\}, i \in (1, \dots, I) \text{ или (и) значений } u_{i,jp}, i \neq im \text{ (см. п. 3.1.1);}$$

в) различные комбинации действий п. а) и п. б).

Предположение о возможности совпадения номеров стадий  $jm \in Jb_{im}$ ,  $jp \in Jb_{im}$  и возникновения конфликта между действиями п. а) и п. б) в данном случае приведет к ситуации

$$X_{jm}^L = u_{im,jm} \frac{v_{im,jm} X_{jm}^{\min} \Phi_{im,jm}^*}{\Phi_{im,jm}^*} < X_{jm}^{\min}, \text{ из которой очевидно следует: } X_{jm}^L \leq X_{jm}^{\max}.$$

Заметим, что для обеспечения выполнения условия (3.9) более эффективны действия, предложенные в п. а) как в первом, так и во втором случае (увеличение значения  $u_{il,jm}$  или уменьшение значения  $u_{im,jm}$ ) поскольку они касаются только тех стадий, где условие (3.9) не выполняется. Решение о выборе допустимых способов обеспечения его выполнения в каждой конкретной ситуации (с точки зрения технологии переработки партий продуктов) должно приниматься с учетом мнения эксперта. Следует иметь в виду, что изменения значений  $u_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ ,  $j \in J_i$  могут привести к изменениям значений  $w_i^{\min}$ ,  $w_i^{\max}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$  и невыполнению условия (3.1).

### 3.1.3. Условие обеспечения требуемой производительности ХТС

Это условие сформировано на базе ограничения (2.3) и характеризует возможность выпуска продуктов указанного ассортимента в плановых объемах  $Q_i, i = \overline{1, I}$  за период  $Tr$ .

$$\sum_{i=1}^I T_i^L \leq Tr, \quad (3.12)$$

где нижние оценки значений продолжительностей выпуска продуктов  $T_i^L, i = \overline{1, I}$  вычисляются с использованием исходных данных задачи АО<sub>s</sub> и результатов проверки условий (3.1), (3.7) согласно соотношениям (2.4) – (2.8), и (3.5), записанному с учетом всех аппаратурных стадий ХТС:

$$T_i^L = Tw_i^L + (wc_i^L - 1)Tc_i^L, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.13)$$

$$Tw_i^L = \max_{y=1, Y^i} \left\{ \sum_{e=1}^{E_y^i} t_{i, pp^i y e}^L \right\}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.14)$$

$$wc_i^L = \text{INT} \left( \frac{Q_i \min_{j \in J_i} \{r_{ij}\}}{w_i^{\max}} \right) + 1, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.15)$$

$$Tc_i^L = \max_{j \in J_i} \{t_{ij}^L\}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.16)$$

$$t_{ij}^L = \frac{1}{\min_j \{r_{ij}\}} \theta_{ij} r_{ij}, \quad i = \overline{1, I}, j \in J_i; \quad (3.17)$$

$$\theta_{ij} = \max_{\substack{l \in \{y | pp^i y e = j, \\ e \in \{1, \dots, E_y^i\}, \\ y \in \{1, \dots, Y^i\}\}}} \left\{ \frac{r_{i, pp^i l e}}{c_{i, pp^i l e}} \left[ \frac{\tau_{i, pp^i l e}}{b_{i, pp^i l e}} + \max_{\substack{k < e, \\ r_{i, pp^i l k} > r_{i, pp^i l e}}} \left\{ \left( \frac{1}{r_{i, pp^i l e}} - \frac{1}{r_{i, pp^i l, e-1}} \right) \theta_{i, pp^i l k} \right\} \right] \right\} +$$

$$+ \max_{\substack{k > e, \\ r_{i, pp^i l k} > r_{i, pp^i l e}}} \left\{ \left( \frac{1}{r_{i, pp^i l e}} - \frac{1}{r_{i, pp^i l, e+1}} \right) \theta_{i, pp^i l k} \right\} \right\}, \quad i = \overline{1, I}, j \in J_i, \quad (3.18)$$

где  $c_{ij} = \begin{cases} n_{ij}, & \text{если } p_{ij} = 0 \vee p_{ij} = 1 \wedge j \in Js_i / Jf_i; \\ 1, & \text{если } p_{ij} = 1 \wedge j \in Jb_i \cup Jf_i; \end{cases}$   $b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \in Jb_i \cup Jf_i; \\ r_{ij}, & \text{если } j \in Js_i / Jf_i; \end{cases}$

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \tau_{ij}^0, & \text{если } j \neq js' \vee js'' \forall js \in Js_i; \\ \tau_{ij}^0 + \sum_{js \in Js_i: j = js' \vee js''} z_{ij} \tau_{i, js}^0 h_{i, js}, & \text{иначе, } i = \overline{1, I}, j \in J_i; \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\tau_{ij}^0 = \begin{cases} \tau_{ij}^0, & i = \overline{1, I}, j \in Jb_i; \\ \frac{m_{ij} \delta_{ij}}{v_{ij} a_{ij}}, & i = \overline{1, I}, j \in Jf_i; \\ \frac{g_{ij} w_i^{\max}}{X_j^U a_{ij}}, & i = \overline{1, I}, j \in Js_i / (Jf_i \cup Jd_i); \\ \frac{m_{ij} w_i^{\max}}{X_j^{2U} a_{ij}}, & i = \overline{1, I}, j \in Jd_i. \end{cases} \quad (3.20)$$

Невыполнение условия (3.12), т.е. ситуация  $\sum_{i=1}^I T_i^L > Tr$ , свидетельствует о том, что выполнить план выпуска продукции ХТС при зафиксированных на данный момент значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  невозможно. Обеспечение выполнения этого условия связано с уменьшением значений  $T_i^L, i \in \{1, \dots, I\}$ .

Из соотношения (3.13) очевидно, что уменьшить значение  $T_{ir}^L$  можно в результате уменьшения значения  $Tw_{ir}^L$ , значения  $Tc_{ir}^L$ , значения  $wc_{ir}^L$  или комбинации этих значений. Уменьшение значений  $Tw_{ir}^L$  и  $Tc_{ir}^L$  связано с уменьшением значений  $t_{i, j}^L, j \in J_{ir}$ , причем если первое из них уменьшится при уменьшении любого значения

$t_{ir,pp_{ir}}^L$ , принадлежащего наиболее длительному маршруту обработки партий  $ir$ -го продукта (см. (3.14)), то второе, согласно (3.16), – только при уменьшении  $\max_{j \in J_{ir}} \{t_{ir,j}^L\}$ .

Согласно (3.17), для уменьшения значения  $t_{ir,jq}^L$  (по какой-либо конкретной стадии  $jq \in J_{ir}$ ) можно попытаться уменьшить значение  $r_{ir,jq}$ , если оно превышает  $\min_{j \in J_{ir}} \{r_{ir,j}\}$ , либо значение  $\theta_{ir,jq}$ . Использовать возможность увеличения значения  $\min_{j \in J_{ir}} \{r_{ir,j}\}$  не рекомендуется, так как это может привести к невыполнению условий (3.1), (3.9), поскольку все предыдущие изменения значений  $r_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ ,  $j \in J_i$  были вынужденными и преследовали цель обеспечения выполнения этих условий. Заметим также, что, согласно (3.18), уменьшение значения  $r_{ir,jq}$  может привести к увеличению значения  $\theta_{ir,jq}$ . Для того, чтобы уменьшить значение  $\theta_{ir,jq}$ , в случаях  $p_{ir,jq} = 0 \vee p_{ir,jq} = 1 \wedge jq \in Js_{ir} / Jf_{ir}$  следует увеличить значение  $n_{ir,jq}$ , а в случаях  $p_{ir,jq} = 1 \wedge jq \in Jb_{ir} \cup Jf_{ir}$  можно изменить значение  $p_{ir,jq} = 1$  на  $p_{ir,jq} = 0$ .

Очевидной рекомендацией по уменьшению значения  $w_{ir}^L$  является увеличение  $w_{ir}^{\max}$  (см. (3.15)), т.е. уменьшение  $r_{ir,jt}$  для стадии  $jt \in J_{ir}$ , лимитирующей значение  $w_{ir}^{\max}$  согласно (3.2), или увеличение значения  $n_{ir,jt}$  и переход к  $p_{ir,jt} = 1$  (см. п. 3.1.1). Заметим, что увеличение значения  $w_{ir}^{\max}$  и возможное последующее увеличение значений  $X_j^U$ ,  $j \in Jb_{ir}$  (см. (3.10)), не может привести к невыполнению условий (3.1), (3.9). Как и в случаях обеспечения выполнения условий (3.1), (3.9), отбор допустимых вариантов обеспечения выполнения условия (3.12) должен осуществлять эксперт.

Что касается методики использования условий (3.1), (3.9), (3.12) в процессе совместного решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , то при ее разработке нами были учтены следующие обстоятельства:

1) для проверки выполнения условия (3.9) необходимы значения  $w_i^{\min}$ ,  $w_i^{\max}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , которые являются результатом проверки и обеспечения выполнения условия (3.1), а при проверке выполнения условия (3.12) используются значения  $w_i^{\max}$ ,  $i = \overline{1, I}$  и  $X_j^U$ ,  $j \in Js_i / Jf_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ , т.е. результаты проверки и обеспечения выполнения условий (3.1), (3.9);

2) задачей эксперта в каждом конкретном случае невыполнения какого-либо из условий является отбор вариантов изменения значений  $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ , допустимых с точки зрения технологии реализации соответствующих стадий синтеза продуктов ХТС, причем выбор эксперта в каждой конкретной ситуации может быть неоднозначным.

Следствием п. 1) является необходимость повторения проверки выполнения комплекса условий при любых изменениях значений  $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$  сначала, с условия (3.1), а следствием п. 2) – необходимость выявлять все возможные варианты обеспечения выполнения комплекса условий и выбирать наиболее перспективный. Для оценки перспективности этих вариантов предлагается использовать сумму первых слагаемых функций  $Z_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  (см. (2.45)), рассчитанных при  $X_j = X_j^L$ ,  $j = \overline{1, J}$ , т.е. оценивать минимально возможные затраты на основное оборудование стадий ХТС.

Таким образом, проверка и обеспечение выполнения условий существования допустимых решений задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$  сводится к решению вспомогательной задачи оптимизации: найти значения  $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ , при которых выполняются условия (3.1), (3.9), (3.12) и достигается минимум функции

$$Z_0 = \sum_{j=1}^J N_j s(ta_j, X_j^L), \quad (3.21)$$

где значения  $N_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  определяются по  $n_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$  согласно (2.34). При этом все изменения значений  $r_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$  должны сопровождаться проверкой их корректности согласно ограничениям (2.19) – (2.20).

В заключение еще раз отметим, что условия (3.1), (3.9), (3.12) необходимые, но не достаточные, т.е. успешное решение задачи поиска минимума функции (3.21) при условиях (3.1), (3.9), (3.12) не гарантирует существование допустимых решений задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$  при найденных таким образом значениях  $n_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j \in J_i$ .

## 3.2. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АО ХТС МХП

В этом разделе рассматриваются разработанные нами алгоритмы решения задачи  $AO_s$  и задач  $AO_{sj}$  для всевозможных комбинаций типов основных и вспомогательных аппаратов стадий ХТС. Вначале рассмотрим алгоритм решения задачи  $AO_s$ .

### 3.2.1. Алгоритм решения задачи определения характеристик режима функционирования ХТС

Задача АО<sub>s</sub> – это задача определения значений размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , соответствующих им значений моментов  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$  начала и окончания каждой операции каждого цикла работы основных аппаратов каждой стадии выпуска каждого продукта, удовлетворяющих условиям (2.3) – (2.23) и обеспечивающих минимальное значение критерия (2.24). Задача решается при фиксированных значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  числа основных аппаратов стадий ХТС, используемых при выпуске каждого продукта, и указателей способа обработки партий продуктов на стадиях ХТС, а также определяющих геометрических размеров основных аппаратов некоторых стадий фильтрации и сушки  $X_j, j \in J_{S_i}/J_{f_i}, i = \overline{1, I}$ .

При разработке алгоритма решения задачи АО<sub>s</sub> в систему ограничений на изменение ее параметров внесены некоторые коррективы. Поскольку ограничение на сумму продолжительностей выпуска продуктов в форме (2.3) может привести к появлению излишнего запаса производительности ХТС ( $\sum_{i=1}^I T_i$  существенно меньше  $Tr$ ), предложено модифицировать его следующим образом:

$$\lambda Tr \leq \sum_{i=1}^I T_i \leq Tr, \quad 0 < \lambda < 1. \quad (3.22)$$

Параметру  $\lambda$  предлагается первоначально присваивать значение 0,99 и постепенно уменьшать его, если попытки обеспечить выполнение ограничения (3.22) при конкретном фиксированном значении  $\lambda$  оказываются безуспешными.

Как указывалось в п. 2.2.3, рассматриваемая задача относится к классу задач смешанного дискретно-нелинейного программирования, причем ее независимые параметры (значения  $w_i, i = \overline{1, I}$ ) изменяются непрерывно в пределах, обусловленных ограничением (2.23). В то же время, некоторые характеристики режима функционирования ХТС, значения которых используются при проверке выполнения ограничения (3.22), являются дискретными переменными (см. (2.6) – (2.8)). Анализ соотношений (2.4) – (2.14) приводит к следующим выводам:

– в случае, когда  $um$ -й маршрут переработки партий  $it$ -го продукта, которому соответствует равенство  $T_{w_{it}} = \sum_{e=1}^{E_{ym}^{it}} t_{it, pp_{ym,e}^{it}}$  (см. (2.5)), включает хотя бы одну аппаратную стадию  $js \in J_{S_{it}}/J_{f_{it}}$ , любые изменения значения  $w_{it}$  приведут к изменениям значения  $t_{it, js}$  (см. (2.14), (2.12), (2.11), (2.9)), и, следовательно, значений  $T_{w_{it}}$  и  $T_{it}$ , т.е. непосредственно повлияют на продолжительность выпуска  $it$ -го продукта;

– в противном случае ( $pp_{ym,e}^{it} \notin J_{S_{it}}/J_{f_{it}} \forall e \in (1, \dots, E_{ym}^{it})$ ) при незначительных изменениях  $w_{it}$  значения  $w_{c_{it}}, T_{c_{it}}$  и  $T_{w_{it}}$  могут остаться неизменными, – следовательно, не изменится и значение  $T_{it}$ ;

– если использовать соотношение (2.6) в форме  $w_{c_{it}} = \frac{Q_{it}}{bc_{it} \cdot w_{it}}$ , т.е. не округлять значение числа циклов работы ХТС при выпуске  $it$ -го продукта до большего целого, то значение  $T_{it}$  изменится при любом изменении значения  $w_{it}$ .

На основании вышесказанного предлагается применить для решения задачи АО<sub>s</sub> один из классических методов условной оптимизации – метод прямого поиска с возвратом [113], общая схема алгоритма которого включает:

1) выбор начального допустимого решения задачи, т.е. формирование комбинации начальных значений  $w_i, i = \overline{1, I}$  и определение согласно (2.4) – (2.22), соответствующих значений  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}, t_{ij}, Tc_i, Tw_i, T_i, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$ , обеспечивающих выполнение ограничения (3.22) при максимально возможном значении параметра  $\lambda$ ;

2) выбор величины шага поиска  $hw$  и изменение значений  $w_i, i = \overline{1, I}$  в пределах, допускаемых ограничением (2.23), согласно алгоритму метода градиента с постоянным шагом [113], проверка выполнения ограничения (3.22) на каждом шаге поиска;

3) формирование функции  $G(w_1, \dots, w_I) = \begin{cases} \sum_{i=1}^I T_i - Tr, & \text{если } \sum_{i=1}^I T_i > Tr; \\ \lambda Tr - \sum_{i=1}^I T_i, & \text{если } \sum_{i=1}^I T_i < \lambda Tr, \end{cases}$  определение значений ее частных про-

изводных и осуществление изменений значений  $w_i, i = \overline{1, I}$ , соответствующих движению с шагом  $hw$  по направлению антиградиента  $G(w_1, \dots, w_I)$ , до выполнения ограничения (3.22);

4) уменьшение величины шага поиска  $hw$  при увеличении значения целевой функции (2.24), останов алгоритма при достижении заданной точности определения оптимальных значений  $w_i, i = \overline{1, I}$ .

Заметим, что решение задачи АО<sub>s</sub>, в принципе, существует при любых "разумных" значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , т.е. таких, при которых исключено возникновение ситуаций  $w_i > Q_i, i \in (1, \dots, I)$  или  $w_i < 0, i \in (1, \dots, I)$ . Поскольку параметры  $w_i, i = \overline{1, I}$  изменяются в пределах, обусловленных ограничением (2.23), непрерывно, при правильном выборе значения параметра  $\lambda$  всегда можно подобрать размеры партий продуктов, при которых справедливо ограничение (3.22).

Рассмотрим подробнее порядок реализации п.п. 1) – 4) с учетом особенностей задачи. Начальные значения размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , очевидно, следует выбирать из диапазонов  $[w_i^{\min}, w_i^{\max}]$ ,  $i = \overline{1, I}$  (см. (3.1)). Более предпочтительными являются значения  $w_i = w_i^{\min}, i = \overline{1, I}$ , так как им, при прочих равных условиях, соответствует меньшее значение критерия (2.24) а, в перспективе, – меньшие размеры основных и вспомогательных аппаратов стадий ХТС (см. (2.27) – (2.30), (2.37), (2.39), (2.40)) и, следовательно, меньшие амортизационные отчисления от их стоимости. Заметим, что в результате решения задачи АО<sub>s</sub> могут быть получены значения  $w_i \notin [w_i^{\min}, w_i^{\max}]$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ , так как условие (3.1) является необходимым, но не достаточным условием существования решений задач определения АО ХТС МХП.

Для определения значения целевой функции (2.24) при фиксированных значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  и  $w_i, i = \overline{1, I}$ , необходимо последовательно выполнить следующие действия:

а) определить значения длительностей операций переработки партий продуктов на стадиях ХТС – "физико-химических превращений", загрузки и выгрузки  $\tau_{ij}, \tau l_{ij}, \tau u_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  согласно (2.14) – (2.16);

б) рассчитать значения коэффициентов  $u_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  изменения размеров партий продуктов на стадиях ХТС согласно (2.13);

в) определить по (2.7) число партий продуктов  $bc_i, i = \overline{1, I}$ , выпускаемых за один цикл работы системы, по (2.10) – число циклов работы основных аппаратов всех стадий выпуска каждого продукта за один цикл работы системы  $K_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , по (2.17), (2.18) – число загрузок и выгрузок основных аппаратов стадий ХТС при выпуске каждого продукта  $Ll_{ij}, Lu_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ ;

г) рассчитать продолжительности всех операций всех циклов переработки партий всех продуктов на стадиях ХТС  $do_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$ , согласно (2.12), причем для определения длительностей операций "заполненного простоя", применяется специально разработанный алгоритм Alg<sub>bc</sub>, подробное описание которого приводится ниже;

д) определить по (2.11) моменты начала и окончания каждой операции каждого цикла работы аппаратов каждой стадии выпуска каждого продукта  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}$ , скорректировать согласно (2.21) моменты начала и окончания операций загрузки и выгрузки одной и той же порции материалов для аппаратов различных стадий (необходимо, если прием или передача порции осуществляются во время операции "физико-химические превращения", например, при приеме емкостным аппаратом фильтрата в ходе фильтрования);

е) пересчитать согласно (2.25), (2.26), если это необходимо, значения материальных индексов операций циклов работы аппаратов стадий ХТС при выпуске каждого продукта и удельных расходов энергоресурсов при реализации каждой операции  $goc_{ijkl}, enc_{ijkl}^{ke}, i = \overline{1, I}, j \in J_i, k = \overline{1, K_{ij}}, l = \overline{1, L_{ijk}}, ke = 1, 2, 3$ .

Значения частных производных функции  $Ze(w_1, \dots, w_I)$  при фиксированных значениях  $w_i, i = \overline{1, I}$  определяются численно:

$$\frac{\partial Ze(w_1, \dots, w_I)}{\partial w_i} \approx \frac{Ze(w_1, \dots, w_i + \Delta w, \dots, w_I) - Ze(w_1, \dots, w_i, \dots, w_I)}{\Delta w}, \quad (3.23)$$

причем приращение  $\Delta w = 0,0001$  (100 г готового продукта).

Для определения согласно (2.4) значений  $T_i, i = \overline{1, I}$  продолжительностей выпуска продуктов, соответствующих фиксированным значениям  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  и  $w_i, i = \overline{1, I}$ , проверки выполнения ограничения (3.22) необходимо реализовать п.п. а) – д), а затем определить по (2.9) продолжительности периодов обработки продуктов на стадиях ХТС (одной партии, либо нескольких в случае их объединения)  $t_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , по (2.8) – продолжительности межцикловых периодов ХТС при выпуске каждого продукта  $Tc_i, i = \overline{1, I}$ , по (2.5) – длительностей циклов работы ХТС при выпуске продуктов  $Tw_i, i = \overline{1, I}$  по (2.6) – число циклов работы ХТС  $wc_i, i = \overline{1, I}$ , необходимое для выпуска каждого продукта в плановом объеме.

Определение значений частных производных функции  $G(w_1, \dots, w_I)$  при невыполнении ограничения (3.22) осуществляется аналогично (3.23), причем при определении значений  $G(w_1, \dots, w_i + \Delta w, \dots, w_I)$  и  $G(w_1, \dots,$



$w_1, \dots, w_I$ ),  $i = \overline{1, I}$  соотношение (2.6) используется в форме  $wc_i = \frac{Q_i}{bc_i w_i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , которая позволяет избежать

ситуаций  $\frac{\partial G(w_1, \dots, w_I)}{\partial w_i} = 0$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ , вызванных дискретностью параметров  $wc_i, Tc_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  (см. выше), и

точно определять направление антиградиента функции  $G(w_1, \dots, w_I)$ .

Величина рабочего шага поиска  $hw$  выбирается в пределах 0,01 – 0,05 (от 10 до 50 кг готового продукта), точность определения оптимальных значений  $w_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  – 0.001 (1 кг готового продукта).

Алгоритм  $Alg_{bc}$  – это алгоритм поиска значений длительностей операций "заполненных простоев" основных аппаратов стадий ХТС (см. (2.12)), моментов их начала и окончания, минимизирующих длительность цикла работы ХТС при выпуске какого-либо продукта, т.е. для  $i$ -го продукта – алгоритм решения следующей задачи: найти значения  $do_{ijk}$ ,  $j \in J_i$ ,  $k = \overline{1, K_{ij}}$ ,  $l \in Ob_{ijk} \cup Oe_{ijk}$ , доставляющие минимум параметру  $Tw_i$ , см. (2.5), при условиях (2.8), (2.9), (2.11), (2.21), (2.22) и фиксированных значениях  $do_{ijkl}$ ,  $j \in J_i$ ,  $k = \overline{1, K_{ij}}$ ,  $l \notin Ob_{ijk} \cup Oe_{ijk}$ .

Необходимость решения этой задачи возникает только в случаях  $K_{ij} > 1$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ ,  $j \in J_i$ , т.е. когда в течение одного цикла работы ХТС при выпуске  $i$ -го продукта реализуются несколько циклов работы аппаратов некоторых стадий. При этом в циклы работы основных аппаратов ряда других стадий выпуска  $i$ -го продукта могут быть включены операции "заполненных простоев" (см. п. 1.2.4). Алгоритм  $Alg_{bc}$  предусматривает следующие действия:

1. Последовательный просмотр всех маршрутов переработки партий  $i$ -го продукта, зануление длительностей "заполненных простоев" при выгрузке

$$do_{ijkl} = 0, i = \overline{1, I}, j = pp_{iye}^i, y = \overline{1, Y^i}, e = \overline{1, E_y^i}, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Oe_{ijk}$$

и проверка выполнения условия (2.22) для всех циклов работы аппаратов каждой стадии каждого маршрута. Если для какого-либо цикла работы аппаратов стадии  $j = pp_{iye}^i$ ,  $y \in (1, \dots, Y^i)$ ,  $e \in (1, \dots, E_y^i)$  условие (2.22) не выполняется, вычисляется разность

$$\Delta = tof_{ijk}^{L_{ijk}''} - tos_{ijk1}, k'' = \begin{cases} k - n_{ij}, & \text{если } n_{ij} > 1, p_{ij} = 0; \\ k - 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

2. Если операция предыдущей стадии  $jp = pp_{y,e-1}^i$  рассматриваемого маршрута, по окончании которой произошла передача материалов на стадию  $j$ , является "заполненным простоем" при выгрузке, то значение  $\Delta$  добавляется к ее длительности ( $do_{i,jp,k',l'} = do_{i,jp,k',l'} + \Delta$ ,  $k' = pk_{ijk}$ ,  $l' = pl_{ijk} - 1$ ,  $l' \in Oe_{i,jp,k'}$  следовательно,  $tof_{i,jp,k',l'} = tos_{i,jp,k',l'} + do_{i,jp,k',l'}$ ,  $k' = pk_{ijk}$ ,  $l' = pl_{ijk} - 1$ ,  $l' \in Oe_{i,jp,k'}$ ) и выполняется п. 4.

3. В противном случае ( $l' \notin Oe_{i,jp,k'}$ ) производится переход на предыдущую стадию ( $j = jp$ ) и для первой операции цикла ее работы  $k = k'$  выполняется п. 2. Если  $j = pp_{y1}^i$ , т.е. когда рассматривается первая стадия  $y$ -го маршрута обработки партий  $i$ -го продукта (или когда осуществлен возврат к ней путем последовательного выполнения пп. 3 и 2), на величину  $\Delta$  увеличивается момент начала первой операции цикла работы  $k = k'$  этой стадии.

4. Последовательный просмотр всех циклов работы аппаратов всех стадий ХТС и определение моментов начала и окончания операций "заполненных простоев" при загрузке, длительностей этих операций. Момент начала совпадает с моментом завершения операции выгрузки с предыдущей стадии

$$tos_{ijkl} = tof_{i,jp,k',l'}, i = \overline{1, I}, j = pp_{iye}^i, y = \overline{1, Y^i}, e = \overline{1, E_y^i}, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Ob_{ijk};$$

$$jp = pp_{y,e-1}^i, k' = pk_{ijk,l-1}, l' = pl_{ijk,l-1}, l-1 \in Oa_{ijk},$$

момент окончания – с моментом начала следующей операции выгрузки

$$tof_{ijkl} = tos_{i,jp,k',l'}, i = \overline{1, I}, j = pp_{iye}^i, y = \overline{1, Y^i}, e = \overline{1, E_y^i}, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Ob_{ijk};$$

$$jp = pp_{y,e-1}^i, k' = pk_{ijk,l+1}, l' = pl_{ijk,l+1}, l+1 \in Oc_{ijk},$$

а длительность "заполненного простоя" при загрузке

$$do_{ijkl} = tof_{ijkl} - tos_{ijkl}, i = \overline{1, I}, j = pp_{iye}^i, y = \overline{1, Y^i}, e = \overline{1, E_y^i}, k = \overline{1, K_{ij}}, l \in Ob_{ijk}.$$

По окончании просмотра производится проверка и обеспечение выполнения ограничения (2.21), возврат на п. 1.

### 3.2.2. Алгоритм решения задач определения АО стадий ХТС

Задача  $AO_{sj}$  – это задача выбора определяющих размеров ( $X_j$ ;  $Xv_{jf}$ ,  $f = \overline{1, Fv_j}$ ) и числа ( $n_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ;  $nv_{if}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $f = \overline{1, Fv_j}$ ) основных и вспомогательных аппаратов стадии  $j$  ХТС, указателей способа переработки

партий продуктов ее основными аппаратами ( $r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}$ ), при которых достигается минимум критерия (2.46) и выполняется комбинация ограничений из числа соотношений (2.27) – (2.44), соответствующих типам основных и вспомогательных аппаратов этой стадии. При фиксированных значениях размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , периодов их обработки на стадии  $t_{ij}, i = \overline{1, I}$ , длительностей операций переработки партий продуктов, в реализации которых участвуют вспомогательные аппараты  $dov_{ijf}, i = \overline{1, I}, l \in Lv_{ijf}, f = \overline{1, Fv_j}$ , и удельных расходов энергии при выполнении операций, связанных с изменением температуры перерабатываемой массы  $env_{ijf}^{ke}, i = \overline{1, I}, l \in Lv_{ijf}, f = \overline{1, Fv_j}, ke = 2, 3$ , решение задачи АО<sub>sj</sub> сводится к последовательности следующих действий:

1. Выбор минимального элемента множества  $XS_j$ , см. (2.32), значение которого удовлетворяет ограничению:

а) если основными аппаратами стадии являются емкости с перемешивающими устройствами (см. (2.27)),

$$\max_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \right\} \leq X_j \leq \min_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \right\}, \quad j \in Jb_i, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.24)$$

б) если основными аппаратами стадии являются рамные или камерные фильтр-прессы, выделяющие в качестве продукта твердую фазу перерабатываемой суспензии (см. (2.28)),

$$X_j \geq \max_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\delta_{ij}} \right\}, \quad j \in Jf_i, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.25)$$

в) если основными аппаратами стадии являются сушилки периодического действия (роторные вакуумные) (см. (2.30)),

$$\begin{aligned} X_j^1 &\geq \max_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \right\}, \\ X_j^2 &\geq \max_i \left\{ u_{ij} \frac{m_{ij} w_i}{\tau_{ij} a_{ij}} \right\}, \end{aligned} \quad j \in Jd_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3.26)$$

где  $X_j^1$  – рабочий объем одной из подходящих для установки на стадии  $j$  стандартных сушилок;  $X_j^2$  – рабочая поверхность той же сушилки;  $\left( \begin{matrix} X_j^1 \\ X_j^2 \end{matrix} \right)$  – элемент множества  $XS_j, j \in Jd_i, i = \overline{1, I}$ ;

г) если основными аппаратами стадии являются фильтры или сушилки других типов (см. (2.29)),

$$X_j \geq \max_i \left\{ u_{ij} \frac{g_{ij} w_i}{\tau_{ij} a_{ij}} \right\}, \quad j \in Js_i / (Jf_i \cup Jd_i), \quad i = \overline{1, I}. \quad (3.27)$$

2. Выбор минимальных элементов множеств  $XvS_{jf}, f = \overline{1, Fv_j}$  (см. (2.41)), значения которых удовлетворяют ограничениям:

а) если среди вспомогательных аппаратов стадии  $j$  есть мерники жидкого сырья, сборники жидких продуктов и отходов (см. (2.37)),

$$\begin{aligned} \max_{i=1, I} \left\{ \max_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{v_{ijl} w_i}{\Phi_{ijl}^*} \right\} \right\} &\leq Xv_{jf} \leq \min_{i=1, I} \left\{ \min_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{v_{ijl} w_i}{\Phi_{ijl}^*} \right\} \right\}; \\ f &\in (1, \dots, Fv_j) \mid tav_{jf} \in (1, 2), \end{aligned} \quad (3.28)$$

причем в случаях, когда опорожнение мерников и заполнение сборников осуществляется самотеком, выбор значения  $Xv_{jf}$  можно уточнить в результате проверки допустимости соотношения площадей сечения  $S_{jf}$  аппаратов  $f$ -й группы и штуцеров, используемых для их заполнения или опорожнения  $S_{jf}$  (см. (2.38)),

$$\frac{\sqrt{S_{jf}}}{S_{jf}} \leq \min_{i=1, I} \left\{ \min_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ \frac{dov_{ijl} 3600 \mu_{jf} \sqrt{g}}{\sqrt{2m v_{ijl} w_i u_{ij}}} \right\} \right\}, \quad f \in (1, \dots, Fv_j) \mid tav_{jf} \in (1, 2); \quad (3.29)$$

б) если среди вспомогательных аппаратов стадии  $j$  есть насосы (см. (2.39)),

$$Xv_{jf} \geq \max_{i=1, I} \left\{ \max_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{v_{ijl} w_i}{dov_{ijl}} \right\} \right\}, \quad f \in (1, \dots, Fv_j) \mid tav_{jf} = 3; \quad (3.30)$$

в) если среди вспомогательных аппаратов стадии  $j$  есть теплообменники (см. (2.40)),

$$Xv_{jf} \geq \max_{i=1,I} \left\{ \max_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{env_{ijf}^{ke} m v_{ijf} w_i}{3600 dov_{ijf} K t_{ijf} \Delta t_{ijf}} \right\} \right\}; \quad (3.31)$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (4,5), ke \in (2,3).$$

3. Коррекция значений  $u_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$  коэффициентов изменения размеров партий продуктов, если ни один из размеров аппаратов  $X_j \in XS_j$  или (и)  $Xv_{jf} \in XvS_{jf}$ ,  $f \in (1, \dots, Fv_j)$  не обеспечивает выполнение необходимой комбинации ограничений из (3.24) – (3.28), (3.30), (3.31). Необходимо уменьшать значение  $u_{iv,j}$ , если для продукта  $iv$  возникают ситуации:

$$\bullet u_{iv,j} \frac{v_{iv,j} w_{iv}}{\Phi_{iv,j}^*} = \max_{i=1,I} \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \right\} > \max \{X_j | X_j \in XS_j\}, j \in Jb_{iv} \text{ (см. (3.24))};$$

$$\bullet u_{iv,j} \frac{v_{iv,j} w_{iv}}{\delta_{iv,j}} = \max_{i=1,I} \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\delta_{ij}} \right\} > \max \{X_j | X_j \in XS_j\}, j \in Jf_{iv} \text{ (см. (3.25))};$$

$$\bullet u_{iv,j} \frac{v_{iv,j} w_{iv}}{\Phi_{iv,j}^*} = \max_{i=1,I} \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \right\} > \max \{X_j^1 | X_j^1 \in XS_j\} \text{ или}$$

$$u_{iv,j} \frac{g_{iv,j} w_{iv}}{\tau_{iv,j} a_{iv,j}} = \max_{i=1,I} \left\{ u_{ij} \frac{g_{ij} w_i}{\tau_{ij} a_{ij}} \right\} > \max \{X_j^2 | X_j^2 \in XS_j\}, j \in Jd_{iv} \text{ (см. (3.26))};$$

$$\bullet u_{iv,j} \frac{g_{iv,j} w_{iv}}{\tau_{iv,j} a_{iv,j}} = \max_{i=1,I} \left\{ u_{ij} \frac{g_{ij} w_i}{\tau_{ij} a_{ij}} \right\} > \max \{X_j | X_j \in XS_j\}, j \in Js_{iv} / (Jf_{iv} \cup Jd_{iv})$$

(см. (3.27));

$$\bullet u_{iv,j} \frac{vv_{iv,j,ll,f} w_{iv}}{\Phi_{iv,jf}^*} = \max_{i=1,I} \left\{ \max_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{vv_{ijf} w_i}{\Phi_{ijf}^*} \right\} \right\} > \max \{Xv_{jf} | Xv_{jf} \in XvS_{jf}\},$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (1,2) \text{ (см. (3.28))};$$

$$\bullet u_{iv,j} \frac{vv_{iv,j,ll,f} w_{iv}}{dov_{iv,j,ll,f}} = \max_{i=1,I} \left\{ \max_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{vv_{ijf} w_i}{dov_{ijf}} \right\} \right\} > \max \{Xv_{jf} | Xv_{jf} \in XvS_{jf}\};$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} = 3 \text{ (см. (3.30))};$$

$$\bullet u_{iv,j} \frac{env_{iv,j,ll,f}^{ke} m v_{iv,j,ll,f} w_{iv}}{3600 dov_{iv,j,ll,f} K t_{iv,j,ll,f} \Delta t_{iv,j,ll,f}} = \max_{i=1,I} \left\{ \max_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{env_{ijf}^{ke} m v_{ijf} w_i}{3600 dov_{ijf} K t_{ijf} \Delta t_{ijf}} \right\} \right\} >$$

$$> \max \{Xv_{jf} | Xv_{jf} \in XvS_{jf}\}, f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (4,5), ke \in (2,3) \text{ (см. (3.31))}.$$

Соответственно, увеличение значения  $u_{iv,j}$  необходимо в случаях:

$$\bullet u_{iv,j} \frac{v_{iv,j} w_{iv}}{\Phi_{iv,j}^*} = \min_i \left\{ u_{ij} \frac{v_{ij} w_i}{\Phi_{ij}^*} \right\} < \min \{X_j | X_j \in XS_j\}, j \in Jb_i, i = \overline{1,I} \text{ (см. (3.24))};$$

$$\bullet u_{iv,j} \frac{vv_{iv,j,ll,f} w_{iv}}{\Phi_{iv,jf}^*} = \min_{i=1,I} \left\{ \min_{l \in Lv_{ijf}} \left\{ u_{ij} \frac{vv_{ijf} w_i}{\Phi_{ijf}^*} \right\} \right\} < \min \{Xv_{jf} | Xv_{jf} \in XvS_{jf}\},$$

$$f \in (1, \dots, Fv_j) | tav_{jf} \in (1,2), \text{ (см. (3.28))}.$$

Для уменьшения значения  $u_{iv,j} = \frac{p_{iv,j} + (1 - p_{iv,j}) n_{iv,j}}{n_{iv,j}} \frac{1}{r_{iv,j}}$  можно разделить партию  $iv$ -го продукта на

равные порции для последовательной переработки в одних и тех же, либо синхронной переработки в разных основных аппаратах, т.е. увеличить значение  $r_{iv,j}$  или зафиксировать  $r_{iv,j} = 1$  и увеличить значение  $n_{iv,j}$ .

Соответственно, для увеличения значения  $u_{iv,j}$  необходимо объединить в аппаратах стадии  $j$  несколько партий  $iv$ -го продукта для совместной переработки (уменьшить значение  $r_{iv,j}$ ), либо, при  $n_{iv,j} > 1$  и  $r_{iv,j} = 1$ , – отказаться от синхронной переработки равных долей его партий в аппаратах стадии  $j$ , т.е. установить  $r_{iv,j} = 0$ . Выбор конкретного варианта коррекции значения  $u_{iv,j}$  необходимо согласовать с экспертом.

4. Возврат на п. 1 при любых изменениях значений  $u_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, I)$ . Если при выполнении п. 3 эксперт сочтет допустимыми несколько вариантов коррекции значения  $u_{iv}$ , последовательно рассматривается каждый из них.

5. Определение по (2.34), (2.42) – (2.44) числа основных  $N_j$  и вспомогательных  $Nv_{jf}$  аппаратов, соответствующего каждой из рассмотренных комбинаций значений  $X_j$ ,  $Xv_{jf}, f = \overline{1, Fv_j}$  и  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}$ , которые обеспечивают выполнение всех необходимых ограничений. Расчет значения критерия (2.46) для каждой комбинации и выбор лучшего варианта АО стадии  $j$  ХТС.

Например, применение предложенного алгоритма для решения задачи (2.47) – (2.61), сформулированной в главе 2 для стадии, основными аппаратами которой являются емкостные реакторы, а вспомогательными – две группы мерников из нержавеющей стали, насосы типа ХЦМ и теплообменные рубашки реакторов, сведется к следующим операциям:

- а) выбор значения рабочего объема реакторов, удовлетворяющего условиям (3.24) и (2.50);
- б) выбор значений рабочих объемов мерников обеих групп, удовлетворяющих условиям (3.28), (3.29) и (2.59);
- в) выбор значения производительности насосов, удовлетворяющего условиям (3.30) и (2.59);
- г) выбор значения рабочей поверхности рубашек, удовлетворяющего условиям (3.31) и (2.59);
- д) выбор, с учетом мнения эксперта, допустимых вариантов коррекции значений  $u_{ij}, i \in (1, \dots, I)$  и повторение всех предыдущих действий для каждого из них, если начальные значения  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}$  не обеспечивают выполнение всех упомянутых ограничений;
- е) расчет согласно (2.52), (2.60), (2.61) значений  $N_j$  и  $Nv_{jf}, f = \overline{1, Fv_j}$ , соответствующих каждому варианту изменения начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}$ , для которого выполняются все ограничения, выбор лучшего варианта АО рассматриваемой стадии по критерию (2.47).

Далее рассматривается методика определения АО ХТС при проектировании нового производства, разработанная нами на базе предложенных алгоритмов решения задач АО<sub>s</sub> и АО<sub>sj</sub>,  $j = \overline{1, J}$ , общей схемы итерационного процесса их совместного решения.

### 3.3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АО ХТС ПРОЕКТИРУЕМОГО МХП

Возвращаясь к представленной в начале данного раздела общей схеме итерационного процесса совместного решения задач АО<sub>s</sub> и АО<sub>sj</sub>,  $j = \overline{1, J}$ , необходимо отметить следующее:

1. Применение этой схемы без предварительной проверки и обеспечения выполнения условий (3.1), (3.9), (3.12) может привести к порочному кругу постепенного увеличения значений размеров партий продуктов  $w_i, i \in (1, \dots, I)$ . Действительно, получить решение задачи АО<sub>s</sub> можно практически при любых значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , а решение задач АО<sub>sj</sub> для некоторых стадий системы может потребовать изменения значений  $r_{ij}, i \in (1, \dots, I), j \in (1, \dots, J)$ , что, в свою очередь, может привести к увеличению продолжительностей циклов переработки партий продуктов  $Tw_i, i \in (1, \dots, I)$  и межцикловых периодов  $Tc_i, i \in (1, \dots, I)$ , см. п. 1.2.4. В результате при повторном решении задачи АО<sub>s</sub> выполнение условия (3.22) потребует увеличения значений  $w_i, i \in (1, \dots, I)$  и т.д. Таким образом, использование условий (3.1), (3.9), (3.12) существования допустимых решений задач АО<sub>s</sub> и АО<sub>sj</sub>,  $j = \overline{1, J}$  позволяет:

- а) до начала решения задач сделать вывод о необходимости коррекции исходных данных, если все возможности обеспечения выполнения этих условий отвергаются экспертом;
- б) предварительно осуществить изменения начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , необходимые для получения допустимых вариантов АО ХТС;
- в) сократить затраты времени на реализацию итерационного процесса совместного решения задач и избежать попадания в порочный круг увеличения значений  $w_i, i \in (1, \dots, I)$ .

2. Выбор начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  осуществляется из следующих соображений:

а) с точки зрения критерия (2.46) наиболее предпочтительны значения  $n_{ij} = 1, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , и, как следствие,  $p_{ij} = 0, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , так как показатели степени  $\beta_j$  в зависимостях  $s(ta_j, X_j) = \alpha_j X_j^{\beta_j}$  меньше единицы для аппаратов любого типа (см. п. 2.3.3, при равных совокупных размерах один аппарат всегда дешевле нескольких);

б) дробление/объединение размеров партий продуктов на некоторых стадиях ХТС может привести к удлинению циклов их выпуска (см. п. 1.2.4), и отрицательно повлиять на качество продукции, поэтому первоначально следует принять  $r_{ij} = 1, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ .

3. В качестве значений  $X_j, j \in Js_i/Jf_i, i = \overline{1, I}$  для первоначального решения задачи АО<sub>s</sub>, в принципе, можно принять любые элементы множеств  $[X_j^L, X_j^U] \cap XS_j, j \in Js_i/Jf_i, i = \overline{1, I}$ , полученных при проверке выполнения условия (3.9). С точки зрения критерия (2.24), предпочтительнее значения  $X_j^U$ , так как им, согласно (2.14),

соответствуют минимальные значения  $\tau_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in Js_i/Jf_i$  длительностей операций "физико-химические превращения", минимальные значения  $Tw_i, Tc_i, i = \overline{1, I}$  (см. (2.5), (2.8), (2.9), (2.11), (2.12)), и, как следствие, минимальные значения  $w_i, i = \overline{1, I}$ . С точки же зрения последующего решения задач АО<sub>s</sub>, т.е. минимума критерия (2.46), очевидно, более предпочтительны значения  $X_j^L$ . Поскольку главным требованием к вариантам АО ХТС является обеспечение ее плановой производительности по всем продуктам выбранного ассортимента, при первоначальном решении задачи АО<sub>s</sub> предлагается принимать  $X_j = X_j^U, j \in Js_i/Jf_i, i = \overline{1, I}$ .

4. В отличие от задачи АО<sub>s</sub> задачи  $AO_{sj}, j \in (1, \dots, J)$  могут и не иметь решения, если при начальных значениях  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}$  некоторые условия из комбинации соотношений (3.24) – (3.28), (3.30), (3.31), соответствующей набору основной и вспомогательной аппаратуры конкретной стадии, не выполняются при любых значениях  $X_j \in XS_j$  или (и)  $Xv_{jf} \in XvS_{jf}, f = \overline{1, Fv_j}$ , а эксперт отвергает все предложенные в п. 3.2.2 варианты обеспечения их выполнения. В этих ситуациях процесс определения АО ХТС возобновляется после изменения исходных данных (ассортимента продуктов, числа аппаратурных стадий системы, типов основных и вспомогательных аппаратов некоторых из них, множеств  $XS_j, j \in (1, \dots, J)$  или (и)  $XvS_{jf}, j \in (1, \dots, J), f \in (1, \dots, Fv_j)$ ). Заметим, что подобные ситуации чаще всего складываются для основных аппаратов стадий  $j \in Jb_i, i \in (1, \dots, I)$ , в которых осуществляются основные химические реакции процессов синтеза продуктов МХП. Что касается вспомогательных аппаратов, то подобные ситуации характерны лишь для теплообменников, встроенных в емкостные аппараты с перемешивающими устройствами.

5. В результате применения предложенной схемы совместного решения задач АО<sub>s</sub> и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  будет получен оптимальный вариант АО ХТС, соответствующий минимально допустимым значениям  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  числа основных аппаратов каждой стадии ХТС, используемого при переработке партий каждого продукта, поскольку:

- а) в качестве начальной комбинации значений  $n_{ij}$  рекомендуется принимать  $n_{ij} = 1, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ ;
- б) для выбора наиболее предпочтительного варианта обеспечения выполнения условий (3.1), (3.9), (3.12) предложено использовать функцию (3.21), а характер зависимостей  $s(ta_j, X_j) = \alpha_j X_j^{\beta_j}$  для аппаратов любого типа таков, что даже при равных совокупных определяющих размерах меньшему числу аппаратов соответствует меньшее значение произведений  $N_j s(ta_j, X_j^L)$ ;
- в) при выборе оптимального варианта коррекции значений  $u_{ij}, i \in (1, \dots, I), j \in J_i$  в ходе решения задач АО<sub>s</sub> используются функции (2.46), которые также включают произведения  $N_j s(ta_j, X_j)$  и  $Nv_{jf} sv(tav_{jf}, Xv_{jf}), f = \overline{1, Fv_j}$ .

С учетом этих замечаний предлагаемая нами методика определения АО ХТС проектируемого МХП сводится к реализации итерационного процесса совместного решения задач АО<sub>s</sub> и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  для поиска их оптимальных решений, соответствующих минимально возможному значениям  $n_{ij}^0, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , а затем – попыткам улучшения полученного базового варианта АО ХТС путем увеличения значений  $n_{ij}^0, i \in (1, \dots, I), j \in (1, \dots, J)$  в соответствии с алгоритмической схемой локальной оптимизации [98, 99]. Рассмотрим особенности применения этой схемы в данном конкретном случае.

### 3.3.1. Схема улучшения базового варианта АО ХТС

Увеличение значений  $n_{ij}^0$  имеет смысл лишь в тех случаях, когда это может привести к существенному уменьшению размеров партий продуктов  $w_i, i \in (1, \dots, I)$ , так как в противном случае значение критерия (2.24) практически не изменится, а размеры аппаратов стадий ХТС останутся прежними и значения критериев (2.46) для соответствующих стадий могут только увеличиться. Согласно (3.22), (2.4), (2.6), к уменьшению значений  $w_i, i \in (1, \dots, I)$  может привести сокращение циклов работы ХТС при выпуске соответствующих продуктов  $Tw_i, i \in (1, \dots, I)$  и межцикловых периодов  $Tc_i, i \in (1, \dots, I)$ . Существенное уменьшение размера партии  $iz$ -го продукта  $w_{iz}$ , в результате которого могут уменьшиться размеры аппаратов некоторых стадий ХТС, скорее всего, приведет к увеличению числа циклов ее работы  $w_{c_{iz}}$ , необходимого для выпуска продукта в объеме  $Q_{iz}$  (см. (2.6)) и потребует уменьшения значения  $Tc_{iz}$ . Согласно (2.8), для уменьшения значения  $Tc_{iz}$  необходимо сокращение периода обработки  $iz$ -го продукта на стадии  $jv \in J_{iz}$ , для которой справедливо равенство  $t_{iz,jv} = \max_{j \in J_{iz}} \{t_{iz,j}\}$ . К уменьшению же значения  $t_{iz,jv}$ , может привести увеличение значения  $n_{iz,jv}^0$ , причем как при  $p_{iz,jv} = 0$ , так и при  $n_{iz,jv}^0 > 1, p_{iz,jv} = 1$  (см. (2.9), (2.11) – (2.13)), т.е. при любом способе переработки партий  $iz$ -го продукта на  $jv$ -й стадии.

Таким образом, возможности улучшения базового варианта АО ХТС связаны с увеличением минимально возможного числа  $n_{ij}^0$  основных аппаратов, задействованных при реализации стадий, лимитирующих продолжительности межцикловых периодов выпуска продуктов  $Tc_i, i = \overline{1, I}$  согласно соотношению (2.8). Заметим, что число этих стадий не превосходит числа  $I$  продуктов, выпускаемых ХТС, но может быть и меньше, если одна и та же стадия лимитирует значения  $Tc_i$  по двум и более продуктам. Комбинацию номеров этих стадий обозначим  $Jv^0 = \{jv^i \mid t_{i,jv^i} = \max_{j \in J_i} \{t_{ij}\}, i \in (1, \dots, I)\}$ , а комбинацию соответствующих значений  $n_{ij}^0$  обозначим  $N^0 = \{n_{ij}^0 \mid j \in Jv^0\}$ .

Окрестность  $N^1$  комбинации  $N^0$  определим как объединение комбинаций  $N_y^1, y = \overline{1, Y^1}$ , каждая из которых отличается от  $N^0$ , по крайней мере, одной компонентой, т.е.  $\exists jv^{iz} \in Jv^0 : n_{iz,jv^{iz}}^1 > n_{iz,jv^{iz}}^0, n_{i,jv^i}^1 \geq n_{i,jv^i}^0, i \neq iz$ . Правила вычисления норм конечномерного пространства, в некотором смысле, эквивалентны [114], поэтому выберем метрику пространства комбинаций  $N^1$  из соображений удобства: в качестве его нормы будем использовать величину  $\sum_{j \in N^0} n_{ij}$ , т.е. будем считать, что "расстояние" между комбинациями  $N^0$  и  $N_y^1$  равно сумме  $\sum_{j \in N^0} (n_{yij}^1 - n_{ij}^0)$ , значение которой равно радиусу  $\rho$  окрестности  $N^1$ . Очевидно, что при  $\rho = 1$ , когда значение одной компоненты каждой комбинации  $N_y^1$  превосходит значение соответствующей компоненты комбинации  $N^0$  на единицу, окрестность включает не более  $I$  различных комбинаций  $N_y^1$ , т.е.  $Y^1 \leq I$ . При  $\rho = 2$ , когда значения двух компонент комбинации  $N_y^1$  превосходят значения соответствующих компонент комбинации  $N^0$  на единицу, либо одной компоненты – на два,  $Y^1 \leq C_I^2 + I$ , при  $\rho = 3$ , соответственно,  $Y^1 \leq C_I^3 + 2C_I^2 + I$  и т.д.

В результате реализации итерационного процесса совместного решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  для каждой комбинации  $N_y^1, y = \overline{1, Y^1}$ , т.е. при фиксированных значениях  $n_{ij} = \begin{cases} n_{ij}^0, & j \notin Jv^0; \\ n_{yij}^1, & j \in Jv^0, \end{cases} i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , могут быть получены  $Y^1$  различных вариантов АО ХТС, лучшему из которых соответствует минимум суммы критериев  $Ze + \sum_{j=1}^J Zk_j$  (см. (2.24), (2.46)). Если этот вариант окажется более предпочтительным, чем базовый, то он станет базовым, для него будет сформирована комбинация номеров стадий  $Jv^0$ , лимитирующих значения  $Tc_i, i = \overline{1, I}$ , и комбинация  $N^0$  значений числа основных аппаратов на этих стадиях, окрестность  $N^1$  этой комбинации и т.д. Если же предпочтительнее окажется базовый вариант АО ХТС, то он будет зафиксирован в качестве оптимального. Заметим, что, в отличие от начального базового варианта, в процессе получения всех остальных соответствующие значения  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  остаются неизменными, т.е. те варианты обеспечения выполнения условий (3.1), (3.9), (3.12) и коррекции коэффициентов изменения размеров партий продуктов при решении задач  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$ , которые связаны с изменениями значений  $n_{ij}$ , исключаются. В результате некоторые комбинации  $N_y^1$  могут оказаться недопустимыми, т.е. для них не удастся найти допустимые варианты АО ХТС.

В работе [33] приведены результаты многочисленных экспериментов по исследованию методики решения задачи определения АО ХТС МХП и характеристик режима их функционирования в постановке (1.10) – (1.23), которая не предусматривала выбор вспомогательной аппаратуры, не учитывала возможности дробления/объединения партий продуктов в процессе их переработки на стадиях ХТС, а в качестве критерия оптимальности ее решений использовались капитальные затраты на основную аппаратуру и производственный объем, минимально необходимый для ее размещения. Эксперименты проводились с использованием исходных данных для выбора АО 23-х ХТС производств химических красителей и полупродуктов, функционировавших в середине 1980-х гг. на территории СССР (ПО "Пигмент", г. Тамбов; ПО "Химпром", г. Чебоксары; Заволжский ХЗ, Ивановская обл.; Сивашский АКЗ, г. Красноперекоск и др.). Заметим, что в 11 из этих ХТС было предусмотрено дробление или (и) объединение партий некоторых продуктов на одной-двух стадиях. Эти изменения в ходе экспериментов учитывались индивидуально для каждой конкретной ХТС.

Несмотря на различия в постановках задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$  с одной стороны, и задачи (1.10) – (1.23) – с другой, методика решения и тех и другой в части использования алгоритмической схемы локальной оптимизации практически идентична, поэтому некоторые выводы из экспериментов, сделанные в [58], сохраняют актуальность и для процесса совместного решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$ :

- 1) для трех ХТС из 23-х при поиске базового варианта АО экспертом из соображений технологии реализации некоторых стадий выпуска продуктов рекомендованы начальные значения  $n_{ij} > 1, i \in (1, \dots, I), j \in J_i$ ;
- 2) для 18-ти ХТС из 23-х при значениях радиуса окрестности  $N^1$ , равных 1, 2 и 3, лучшим вариантом АО оказался начальный базовый, т.е. соответствующий минимально возможному числу аппаратов на стадиях системы;

3) для одной ХТС из пяти оставшихся лучший вариант АО найден в окрестности базового при  $\rho = 1$ , причем он остался лучшим и при  $\rho = 2$ , и при  $\rho = 3$ ;

4) еще для двух ХТС лучшие варианты АО, найденные при  $\rho = 1$  и не изменились при  $\rho = 2$  и  $\rho = 3$ , однако для одной из них при  $\rho = 1$  пришлось последовательно сформировать две окрестности  $N^1$ , а для второй – четыре окрестности при  $\rho = 1$  и две окрестности при  $\rho = 2$ ;

5) для одной ХТС лучший вариант АО найден в третьей окрестности  $N^1$  при  $\rho = 1$  и еще для одной – во второй окрестности при  $\rho = 3$ .

Во всех пяти случаях, когда лучший вариант АО ХТС не являлся начальным базовым, значение критерия (1.10) уменьшалось по сравнению с базовым вариантом в пределах 2...5 %, продолжительность расчетов при  $\rho = 2$  увеличивалась по сравнению с  $\rho = 1$  в 3-4, а при  $\rho = 3$  – в 7 – 10 раз.

С учетом всего вышесказанного, предлагаемая нами методика выбора характеристик режима функционирования ХТС МХП, выбора АО ее стадий и способов переработки их аппаратами партий продуктов предусматривает:

1. Получение начального допустимого решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$ , соответствующего минимально возможному числу  $n_{ij}^0, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  основных аппаратов, участвующих в реализации стадий выпуска каждого продукта (начального базового варианта АО ХТС). Для этого необходимо:

а) с учетом мнения эксперта выбрать начальные значения  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  (чаще всего  $n_{ij} = 1, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ ), а также начальные значения указателей способов переработки партий продуктов на стадиях ХТС  $r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  (обычно  $r_{ij} = 1, p_{ij} = 0, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ );

б) осуществить последовательную проверку выполнения необходимых условий существования решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$ ;

в) в случаях невыполнения условий (3.1), (3.9), (3.12) определить, по согласованию с экспертом, все возможные варианты изменения начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , обеспечивающие выполнения комплекса этих условий и выбрать наиболее перспективный, соответствующий минимуму функции (3.21);

г) осуществить прогноз значений определяющих размеров некоторых стадий фильтрации и сушки  $X_j = X_j^U, j \in J_s/J_f, i = \overline{1, I}$  и реализовать предложенный в п. 3.2.1 алгоритм решения задачи  $AO_s$ ;

д) решить, согласно алгоритму, представленному в п. 3.2.2, задачи  $AO_{sj}$  для всех аппаратурных стадий ХТС, осуществив, при необходимости, согласованную с экспертом коррекцию значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ ;

е) вернуться на п. б), если полученные при выполнении п. д) значения  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$  и  $X_j, j \in J_s/J_f, i = \overline{1, I}$  не совпадают с их прогнозом.

2. Найти лучшее решение задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  в окрестности полученного при выполнении п. 1 начального допустимого решения. Для этого:

а) сформировать комбинацию  $Jv^0$  номеров стадий ХТС, лимитирующих продолжительности межцикловых периодов выпуска продуктов  $Tc_i, i = \overline{1, I}$  и комбинацию  $N^0$  соответствующих им значений  $n_{ij}^0$ ;

б) установить значение  $\rho$  радиуса окрестности  $N^1$  комбинации  $N^0$ , равное 1, и сформировать все комбинации  $N_y^1, y = \overline{1, Y^1}$ , соответствующие этому значению;

в) выполнить для каждой из комбинаций  $N_y^1$  действия п. 1, исключив какие-либо изменения фиксированных значений  $n_{ij} = \begin{cases} n_{ij}^0, j \notin Jv^0 \\ n_{yij}^1, j \in Jv^0, i = \overline{1, I}, j \in J_i \end{cases}$ , выбрать лучшее из полученных в результате решений задач

$AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  по минимуму суммы критериев  $Ze + \sum_{j=1}^J Zk_j$ ;

г) последовательно увеличивать радиус окрестности  $N^1$  до тех пор, пока он не станет максимально возможным (равным числу компонент комбинации  $N^0$ ) и повторять действия п.п. б), в), если позволяет время и возможности используемого компьютера.

3. Принять в качестве базового вариант АО ХТС и режима его функционирования, соответствующий лучшему решению окрестности, если оно предпочтительнее начального, и повторить для него действия п. 2. Если же более предпочтительным оказывается начальное решение, зафиксировать в качестве оптимального базовый вариант АО ХТС.

В заключение проиллюстрируем эффективность применения предложенной методики на примерах определения АО ХТС реальных МХП, проектирование которых осуществлялось Тамбовским филиалом МНПО "НИОПиК" (ныне ОАО "Экохимпроект").

### 3.3.2. Примеры определения АО ХТС реальных МХП

Расчеты, выполненные для реальных производств химических красителей, показали, что предлагаемая методика позволяет сократить в 2 – 4 раза продолжительность определения АО ХТС и на 5...10 % уменьшить капитальные затраты на оборудование по сравнению с методикой, предложенной в [31 – 33].

Одной из ХТС, выбранных для сравнительного анализа, была ХТС производства прямых красителей Чебоксарского АО "Химпром", проект которой предусматривал выпуск в течение календарного года (за 7392 ч):

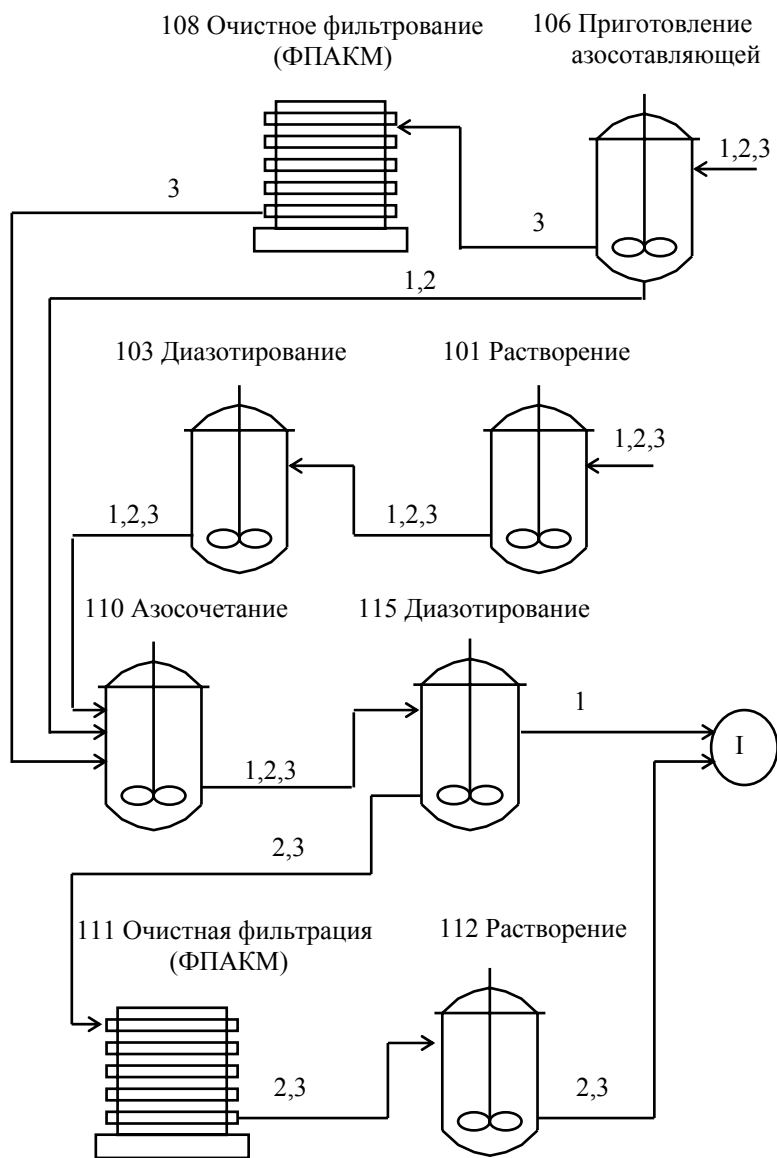
- 1) красителя прямого черного 2С – 2250 т;
- 2) красителя прямого оранжево-коричневого – 100 т;
- 3) красителя прямого коричневого "К" для кожи – 50 т.

Данная ХТС является типичной технологической системой по производству азокрасителей. Большинство ее аппаратурных стадий оснащены вертикальными емкостными аппаратами периодического действия с механическими перемешивающими устройствами. В них реализуются стадии подготовки реагентов (растворение, приготовление азосоставляющей), основные химические реакции (диазотирование, азосочетание), выделение красителей, приготовление их суспензий. Остальные стадии оснащены аппаратами полунепрерывного действия (фильтрование, сушка). Наименования стадий, типы основных аппаратов и схема материальных потоков рассматриваемой ХТС представлены на рис. 3.3.

Задачи  $AO_s$  и  $AO_{sj}, j = \overline{1, J}$  решались только для основного оборудования этой системы. Необходимость изменения размеров партий продуктов в процессе их переработки на стадиях системы не возникла. Это позволяет сравнить результаты определения ее АО согласно предлагаемой методике с результатами, полученными по методике, предложенной в работах [31 – 33]. Лучшим вариантом АО этой системы в обоих случаях оказался начальный базовый.

Результаты определения АО рассматриваемой ХТС приведены в табл. 3.1 и 3.2. Из табл. 3.1 видно, что применение предлагаемой методики позволило получить более эффективный вариант АО: на четырех стадиях удалось уменьшить размер основного аппарата. И хотя на одной стадии размер аппарата увеличился, капитальные затраты на оборудование (в ценах 1985 г.) снизились на 7,8 %. Затраты машинного времени составили 170 с против 545 с на ПК Pentium III-866. Полученный эффект объясняется более полным использованием заданного периода выпуска продукции ХТС: по прежней методике суммарная длительность выпуска продуктов оказалась равной 6493,12 ч., а по предлагаемой – 7391,99 ч (см. табл. 3.2). Аналогичные результаты получены и для других ХТС из числа 23-х, упомянутых выше.





**Рис. 3.3. Схема материальных потоков и наименование стадий ХТС производства прямых красителей (начало)**

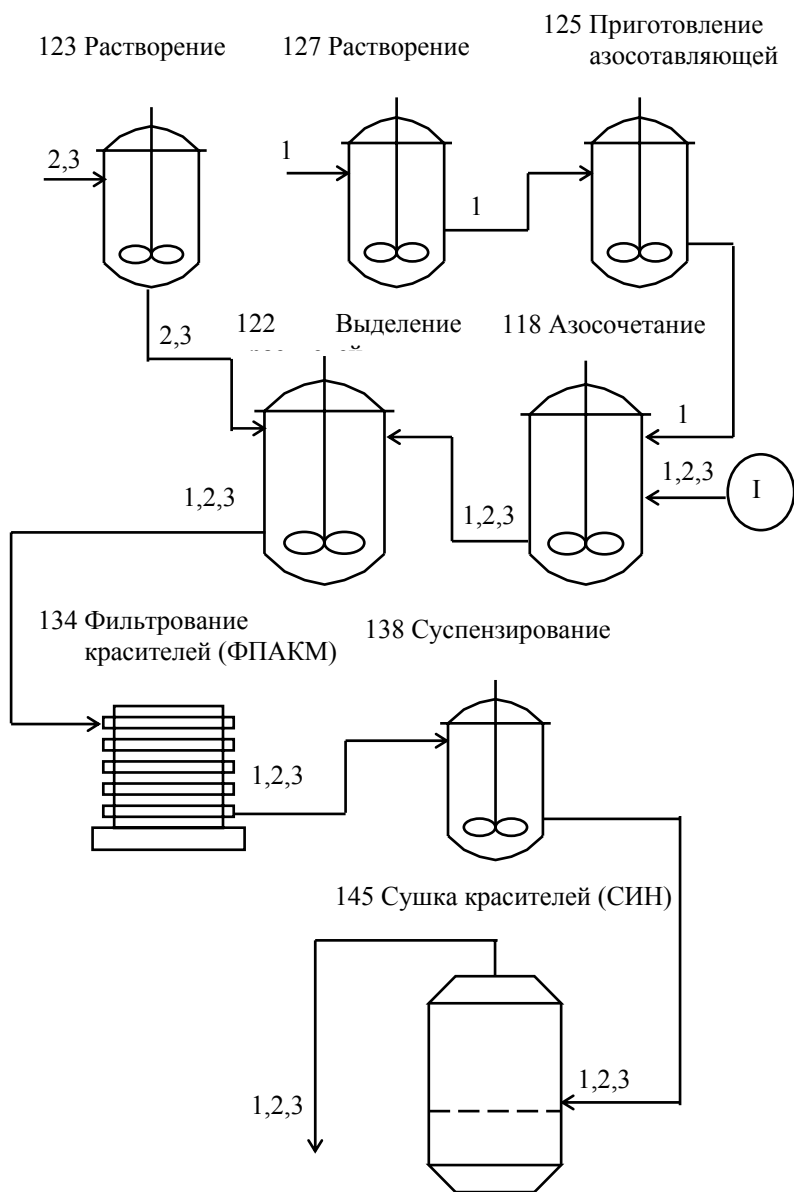


Рис. 3.3. Схема материальных потоков и наименование стадий ХТС производства прямых красителей (окончание)  
 3.1. Результаты выбора АО стадий ХТС производства прямых красителей

№ основных аппаратов-стадии	Наименование стадии(тип основного аппарата)	Число аппаратов	Основной размер аппарата м <sup>2</sup> , м <sup>3</sup>	
			прежний метод	предлагаемый метод
101	Растворение	1	6,3	6,3
103	Диазотирование	1	10	10
106	Приготовление азосотавляющей	1	4	3,2
108	Очистная фильтрация (ФПАКМ)	1	5	5
110	Азосочетание	1	16	16
112	Растворение	1	20	16
111	Фильтрация (ФПАКМ)	1	50	50
115	Диазотирование	1	20	16

127	Растворение	1	0,4	0,4
125	Приготовление азосоставляющей	1	2,5	2,5
118	Азосочетание	1	32	25
123	Растворение	1	2,5	3,2
122	Выделение красителей	1	32	32
134	Фильтрация красителей (ФПАКМ)	1	50	50
138	Суспензирование	2	10	10
145	Сушка красителей (СИН)	1	20	20

### 3.2. Результаты определения характеристик режима работы ХТС производства прямых красителей

№ продукта	Размерпартии, т		Межцикло- выйпериод, ч		Цикл выпуска- партии, ч		Продолжительно- стьвыпуска, ч	
	преж- нийме- тод	предла- гае- мыйме- тод	преж- ний- метод	предла- гае- мыйме- тод	преж- ний- метод	предла- гае- мыйме- тод	преж- нийме- тод	предла- гае- мыйме- тод
1	4,129	3,448	8,58	8,58	43,39	41,92	4710,28	5632,16
2	1,433	1,504	17,39	17,89	68,06	69,30	1264,53	1240,25
3	1,5	1,718	14,10	16,15	62,32	65,64	518,31	519,57

Вместе с тем, отметим, что с использованием методики, предложенной в [30 – 31], для некоторых ХТС (порядка 10), несмотря на предварительные указания специалистов-проектировщиков по изменению размеров партий продуктов, не удалось получить приемлемые варианты АО, в основном, по причине недостаточно корректного учета продолжительностей "заполненных простоев" и, как следствие, неверного определения значений межцикловых периодов  $T_{c_i}, i = \overline{1, I}$ . Одной из таких ХТС является ХТС № 5 производства азокрасителей Сивашского анилиноокрасочного завода, ассортимент и годовые объемы выпуска продуктов которой представлены в табл. 3.3, а ее аппаратурные стадии и схема материальных потоков – на рис. 3.4.

### 3.3. Продукты ХТС № 5 и объемы их выпуска

№ продукта	Наименование продукта	Объемвыпуска
1	Спирторастворимый желтый "З"	40 т
2	Желтый "З" для алюминия	10 т
3	Спирторастворимый оранжевый "2Ж"	21 т
4	Оранжевый "2Ж" для алюминия	40 т
5	Золотисто-желтый для алюминия	18,5 т
6	Золотисто-коричневый для алюминия	9,5 т
7	Спирторастворимый ярко-красный	18 т

### 3.4. Результаты выбора АО стадий ХТС № 5

№ основных аппара- тов	№ и наименование стадии	Числоаппаратов	Размер аппарата
501	1. Суспензирование	1	9 м <sup>3</sup>
512	2. Растворение	1	9 м <sup>3</sup>
503	3. Диазотирование	1	10 м <sup>3</sup>
520	4. Растворение ацетата хрома	1	3,2 м <sup>3</sup>
507	5. Азосочетание	1	16 м <sup>3</sup>

514	6. Получение красителей	1	25 м <sup>3</sup>
522	7. Приготовление смеси растворов	1	14,4 м <sup>3</sup>
518	8. Выделение красителей	1	25 м <sup>3</sup>
524	9. Подача суспензий на фильтр	2	25 м <sup>3</sup>
525	10. Фильтрование красителей	2	100 м <sup>2</sup>
528	11. Сушка красителей	3	10 м <sup>3</sup> ; 35,5 м <sup>2</sup>

В результате проверки и обеспечения выполнения условий (3.1), (3.9), (3.12) для этой ХТС выявлена необходимость изменения начальных значений  $n_{ij}, p_{ij}, r_{ij}$  для следующих стадий и продуктов:

- $r_{52} = 0,5$ , т.е. в аппарате стадии № 2 раствор готовится сразу на две партии продукта № 5 ( $u_{52} = 2$ );
- $r_{74} = 0,5$ , т.е. в аппарате стадии № 4 раствор готовится сразу на две партии продукта № 7 ( $u_{74} = 2$ );
- $n_{ij} = 2, p_{ij} = 0, i = \overline{1,6}, j = 9,10$ , т.е. аппараты стадий № 9, 10 принимают партии продуктов № 1 – 6 по очереди ( $u_{ij} = 1, i = \overline{1,6}, j = 9,10$ );

- $n_{i11} = 2, p_{i11} = 1, i = \overline{1,4}; n_{i11} = 3, p_{i11} = 1, i = \overline{5,7}$ , т.е. при выпуске продуктов № 1 – 4 на стадии № 11 используются две сушилки, а при выпуске продуктов № 5 – 7 – три, причем эти сушилки синхронно обрабатывают равные доли партии каждого продукта ( $u_{i11} = 1/2, i = \overline{1,4}; u_{i11} = 1/3, i = \overline{5,7}$ ).

Заметим, что при реализации процесса совместного решения задачи  $AO_5$  и задач  $AO_{5j}, j = \overline{1,11}$  по методике, представленной в п. 3.3, для выполнения ограничения (3.24) пришлось установить  $r_{52} = 1/3$ , т.е. раствор в аппарате стадии № 2 готовить не на две, а на три партии продукта № 5 ( $u_{52} = 3$ ).

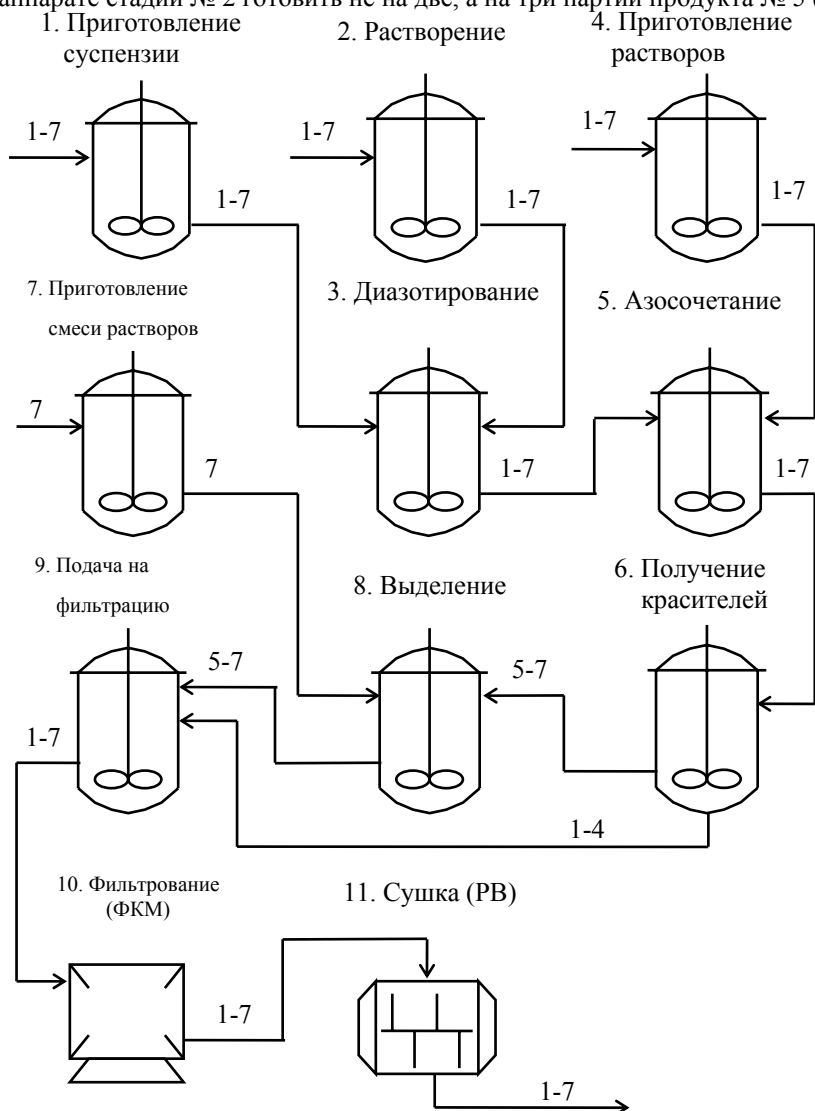


Рис. 3.4. Схема материальных потоков и наименования стадий ХТС № 5

Наиболее предпочтительные решения задач  $AO_{5j}, j = \overline{1,11}$  при этих условиях приведены в табл. 3.4 (только для основной аппаратуры), решение задачи  $AO_5$  – в табл. 3.5.

### 3.5. Режим функционирования ХТС № 5

№ продукта	Размер партии, т	Межцикловый период, ч	Цикл работы ХТС, ч	Число партий, выпускаемых за цикл	Продолжительность выпуска, ч
1	0,79	21,96	83	1	1173,24
2	1,077	21,96	82,93	1	264,94
3	0,712	18,5	76,26	1	603,05
4	0,792	18,51	76,07	1	992,86
5	0,968	87,4	162,46	3	631,92
6	1,345	17,7	74,65	1	182
7	0,605	27,34	72,5	2	452,18

Таким образом, в данном разделе представлены и обоснованы следующие элементы предлагаемой методики определения АО ХТС МХП:

1. Необходимые условия существования решений задач определения АО ХТС проектируемого МХП и характеристик режима его функционирования, методика обеспечения их выполнения, предусматривающая участие эксперта (опытного технолога).

2. Алгоритм решения задачи оптимизации режима функционирования ХТС и оборудования ее аппаратурных стадий (задачи  $AO_s$ ), основанный на классическом методе нелинейного программирования – методе прямого поиска с возвратом. Алгоритм оптимизации длительности циклов работы ХТС при выпуске каждого продукта в условиях изменений размеров их партий (алгоритм  $Alg_{bc}$ ).

3. Алгоритм решения задач определения АО каждой отдельной стадии ХТС (задачи  $AO_{sj}$ ), основанный на стратегии перебора. Способы обеспечения выполнения ограничений на определяющие геометрические размеры основных и вспомогательных аппаратов стадий.

4. Способ получения начального решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , предусматривающий итерационное уточнение числа основных аппаратов стадий ХТС, используемых при выпуске каждого продукта, и указателей способа переработки партий продуктов на стадиях. Стратегия поиска оптимального варианта АО ХТС и режима его функционирования, использующая схему локальной оптимизации.

Эффективность предложенной методики определения АО ХТС МХП и режима его функционирования подтверждена примерами решения задач  $AO_s$  и  $AO_{sj}$ ,  $j = \overline{1, J}$  для реальных проектируемых производств химических красителей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии предложена методика выбора аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментных производств, разработанная на основе принципов системного подхода, учета особенностей функционирования ХТС реальных МХП, математического моделирования процессов принятия проектных решений, формулировки и решения рассматриваемых задач как задач оптимизации, применения современных информационных технологий.

Процесс выбора АО ХТС проектируемого МХП представлен в виде иерархической структуры: на верхнем уровне предлагается определять характеристики режима работы ХТС в целом, минимизирующие энергозатраты на ее функционирование, а на нижнем – выбирать АО каждой стадии ХТС, оптимальное с точки зрения капитальных затрат.

Такой подход позволил сформулировать задачу верхнего уровня как задачу нелинейного программирования, а задачи нижнего уровня – как задачи дискретной оптимизации и избежать затруднения, многократно упоминаемого в научных публикациях по рассматриваемой проблеме, – необходимости решать задачу смешанного дискретно-нелинейного программирования, эффективные методы решения которой в настоящее время отсутствуют.

Предложена методика совместного решения задач, включающая итерационный процесс уточнения прогнозируемых значений некоторых независимых параметров, а также оригинальные алгоритмы решения задач верхнего и нижнего уровня. Приведены примеры решения задач выбора АО реальных проектируемых МХП, иллюстрирующие эффективность методики.

Особо отметим, что предлагаемые формулировки задач выбора АО ХТС учитывают возможность изменения размеров партий продуктов в ходе их переработки на стадиях ХТС. Эти операции широко применяются в МХП для обеспечения требуемых условий реализации стадий синтеза различных продуктов в одних и тех же аппаратах.

Использование методики автоматизированного выбора АО ХТС МХП, предложенной в работе, позволит проектировщикам, студентам и аспирантам при решении конкретных задач проектирования новых и модернизации действующих производств рассматривать результаты проектов как с технологических, так и технико-экономических позиций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rippin, D.W.T. Design and operation of multiproduct and multipurpose batch chemical plants: An analysis of problem structure / D.W.T. Rippin // *Computers & Chemical Engineering*. – 1983. – Vol. 7. – No. 4. – P. 463 – 491.
2. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности / В.В. Кафаров, В.В. Макаров. – М. : Химия, 1990. – 320 с.
3. Кафаров, В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М. : Химия, 1991. – 431 с.
4. Voudouris, V.T. MILP model for scheduling and design of a special class of multipurpose batch plants / V.T. Voudouris, I.E. Grossmann // *Computers & Chemical Engineering*. – 1996. – Vol. 20. – No. 11. – P. 1335 – 1360.
5. Беркман, Б.Е. Основы технологического проектирования производств органического синтеза / Б.Е. Беркман. – М. : Химия, 1970. – 368 с.
6. Гуревич, Д.А. Проектные исследования химических производств / Д.А. Гуревич. – М. : Химия, 1976. – 208 с.
7. Альперт, З.А. Основы проектирования химических установок : учебное пособие / З.А. Альперт. – М. : Высшая школа, 1989. – 304 с.
8. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
9. Михалевич, В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевич, В.С. Волкович. – Л. : Наука, 1982. – 286 с.
10. Малыгин, Е.Н. Проектирование гибких производственных систем в химической промышленности / Е.Н. Малыгин, С.В. Мищенко // *Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева*. – 1987. – Т. 32. – № 3. – С. 293 – 300.
11. Малыгин, Е.Н. Автоматизированное проектирование на основе системного подхода / Е.Н. Малыгин, В.А. Немтинов // *Экология и промышленность России*. – 2001. – № 5. – С. 36 – 40.
12. Espuna, A. An Efficient and Simplified Solution to the Predesign Problem of Multiproduct Plants / A. Espuna, M. Lazaro, J. Martiner // *Computers & Chemical Engineering*. – 1989. – Vol. 13. – No. 1/2. – P. 163 – 174.
13. Гордеев, Л.С. Интегрированная экспертная система для организации многоассортиментных химических производств / Л.С. Гордеев, М.А. Козлова, В.В. Макаров // *Теоретические основы химической технологии*. – 1998. – Т. 32. – № 3. – С. 322 – 332.
14. Малыгин, Е.Н. Нейросетевые и регрессионные модели для прогнозирования спроса на продукты ассортимента / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Т.А. Фролова, А.Б. Борисенко // *SCM'99 : Сб. докл. междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям*. – СПб., 1999. – Т. 1. – С. 274 – 277.
15. Применение мер подобия информативных векторов при выборе технологических схем и установок / В.В. Резниченко, В.Я. Сильбер, В.К. Шитиков, А.Л. Познякевич // *Теоретические основы химической технологии*. – 1974. – Т. 8. – № 2. – С. 316 – 317.
16. Шитиков, В.К. Метод анализа и синтеза многоассортиментных химико-технологических систем на основе автоматизированной переработки инженерной информации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / В.К. Шитиков. – М., 1979. – 16 с.
17. Методологические принципы автоматизированного выбора оптимальной конструкции химико-технологических аппаратов / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г.И. Минко и др. // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 1987. – Т. 30. – № 6. – С. 101 – 105.
18. Егоров, А.Ф. Оптимальный выбор типового оборудования при проектировании многоассортиментных химических производств / А.Ф. Егоров, В.П. Бельков, Н.С. Тюрина // *Химическая промышленность*. – 2001. – Т. 78. – № 2. – С. 40 – 45.
19. Loonkar, Y.R. Minimization of capital investment for batch processes / Y.R. Loonkar, J.D. Robinson // *Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development*. – 1970. – Vol. 9. – No. 4. – P. 625 – 629.
20. Robinson, J.D. Minimizing capital investment for multi-product batch plants / J.D. Robinson, Y.R. Loonkar // *Processes Technology Intelligent*. – 1972. – Vol. 17. – No. 11. – P. 861 – 863.
21. Sparrow, R.E. The Choice of equipment sizes for multiproduct batch plants. Heuristics vs. branch and bound / R.E. Sparrow, D.J. Forder, D.W.T. Rippin // *Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development*. – 1975. – Vol. 14. – P. 197 – 203.

22. Малыгин, Е.Н. Проектирование многоассортиментных химических производств: определение длительностей циклов обработки партий продуктов / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин // Вестник ТГТУ. – 1999. – Т. 5. – № 2. – С. 201 – 212.
23. Зайцев, И.Д. Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств. Структурные основы / И.Д. Зайцев. – Киев : Наукова думка, 1981. – 308 с.
24. Кафаров, В.В. Основы автоматизированного проектирования химических производств / В.В. Кафаров, В.Н. Ветохин. – М. : Наука, 1987. – 623 с.
25. Бодров, В.И. Стратегия синтеза гибких автоматизированных химико-технологических систем / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий // Теоретические основы химической технологии. – 1991. – Т. 25. – № 5. – С. 716 – 730.
26. Knox, R.E. New Technologies for Concurrent Engineering / R.E. Knox, J.D. Russell // CALS Journal. – 1994. – Vol. 3. – No. 1. – P. 63 – 67.
27. Левин А.И. Концепция и технологии компьютерного сопровождения процессов жизненного цикла продукции / А.И. Левин, Е.В. Судов // Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса. – Киев : Техника. – 2001. – С. 612 – 625.
28. Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин, М.В. Овсянников, А.Ф. Стрекалов, С.В. Сумароков. – М. : Анахарсис, 2002. – 304 с.
29. Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
30. Малыгин, Е.Н. Автоматизированный выбор технологического оборудования совмещенных схем производства продуктов / Е.Н. Малыгин, Б.С. Дмитриевский, В.В. Зотов // Химическая промышленность. – 1978. – Т. 55. – № 9. – С. 710 – 711.
31. Малыгин, Е.Н. Автоматизированный расчет оборудования гибких технологических производств / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин // Химическая промышленность. – 1985. – № 2. – С. 118 – 123.
32. Малыгин, Е.Н. Методы автоматизированного синтеза многоассортиментных химических производств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 и 05.13.12 : защищена 30.12.1986 : утв. 22.05.1987 / Е.Н. Малыгин. – М., 1986. – 601 с.
33. Карпушкин, С.В. Автоматизированный расчет оборудования совмещенных химико-технологических схем производств полупродуктов и красителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 16.01.1987 : утв. 08.07.1987 / С.В. Карпушкин. – Тамбов, 1987. – 265 с.
34. Борисенко, А.Б. Синтез аппаратурного оформления многоассортиментных химико-технологических систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 28.12.2000 : утв. 13.04.2001 / А.Б. Борисенко. – Тамбов, 2000. – 164 с.
35. Малыгин, Е.Н. Проектирование многоассортиментных химических производств: определение аппаратурного оформления химико-технологических схем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8. – № 2. – С. 272 – 282.
36. Малыгин, Е.Н. Методика определения аппаратурного оформления многопродуктовых химико-технологических систем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 5. – С. 43 – 50.
37. Малыгин, Е.Н. Методология определения аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Е.Н. Туголуков // Химическая промышленность. – 2004. – № 3. – С. 148 – 156.
38. Карпушкин, С.В. Система выбора аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко // Информационные технологии. – 2004. – №10. – С. 14 – 19, 4-я ст. обложки.
39. Малыгин, Е.Н. Математическая модель функционирования многопродуктовых химико-технологических систем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – Т. 39. – № 4. – С. 455 – 465.
40. Takamatsu, T. Optimal design and operation of a batch processes with intermediate storage tanks / T. Takamatsu, I. Hashimoto, S. Hasebe // Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development. – 1982. – Vol. 21. – No. 3. – P. 431 – 440.
41. Karimi, I.A. Optimal selection of intermediate storage tank capacity in periodic batch/semicontinuous process / I.A. Karimi, G.V. Reklaitis // AIChE Journal. – 1983. – Vol. 29. – No. 4. – P. 588 – 596.
42. Modi, A.K. Design of multiproduct batch processes with finite intermediate storage / A.K. Modi, I.A. Karimi // Computers & Chemical Engineering. – 1989. – Vol. 13. – P. 127 – 139.
43. Макаров, В.В. Алгоритм структурно-логического анализа многопродуктовых химико-технологических систем / В.В. Макаров // Теоретические основы химической технологии. – 1994. – Т. 28. – № 5. – С. 453 – 459.
44. Grossmann, I.E. Optimum design of multipurpose chemical plants / I.E. Grossmann, R.W.H. Sargent // Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development. – 1979. – Vol. 18. – No. 2. – P. 343 – 348.
45. Flats, W. Equipment Sizing for Multiproduct Plants / W. Flats // Chemical Engineering. – 1980. – Vol. 87. – No. 4. – P. 71 – 80.

46. Knopf, F.C. Optimal design of batch/semicontinuous processes / F.C. Knopf, M.R. Okos, G.V. Reklaitis // *Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development*. – 1982. – Vol. 21. – No.1. – P. 79 – 86.
47. Suhani, I. Optimal design of multipurpose batch plants / I. Suhani, R.S.H. Mah // *Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development*. – 1982. – Vol. 21. – No. 1. – P. 94 – 100.
48. Макаров, В.В. Метод выбора технологического оборудования при проектировании совмещенных схем многоассортиментных производств / В.В. Макаров, Л.Г. Ибрагимов // *Проблемы автоматизированного проектирования и автоматизация эксперимента : Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева*. – М., 1983. – Вып. 127. – С. 103 – 109.
49. Vaselenak, J.A. An embedding formulation for the optimal scheduling and design of multiproduct batch plants / J.A. Vaselenak, I.E. Grossmann, A.W. Vesterberg // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1987. – Vol. 26. – P. 139 – 148.
50. Coulman, G.A. Algorithm for optimal scheduling and a revised formulation of batch plant design / G.A. Coulman // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1989. – Vol. 28. – P. 553 – 561.
51. Faqir, N.M. Design of Multiproduct Batch Plants with Multiple Production Routes / N.M. Faqir, I.A. Karimi // *In Proceedings FOCAPD'89, Amsterdam*. – 1990. – P. 451 – 468.
52. Parageorgaki, S. Optimal design of multipurpose batch plants - 1. Problem formulation / S. Parageorgaki, G.V. Reklaitis // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1990. – Vol. 29. – P. 2054 – 2062.
53. Birewar, D.B. Simultaneous synthesis, sizing and scheduling of multiproduct batch plants / D.B. Birewar, I.E. Grossmann // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1990. – Vol. 29. – P. 2242 – 2251.
54. Shah, N. Optimal long-term campaign planning and design of batch operations / N. Shah, C. Pantelides // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1992. – Vol. 31. – P. 2308 – 2321.
55. Voudouris, V.T. Synthesis of multiproduct batch plants with cyclic scheduling and inventory considerations / V.T. Voudouris, I.E. Grossmann // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1993. – Vol. 32. – P. 1962 – 1980.
56. Shah, N. Design of multipurpose batch plants with uncertain production requirements / N. Shah, C. Pantelides // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1992. – Vol. 31. – P. 1325 – 1331.
57. Subrahmanyam, S. Design of batch chemical plants under market uncertainty / S. Subrahmanyam, J. Pekny, G.V. Reklaitis // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1994. – Vol. 33. – P. 2688 – 2694.
58. Ierapetritou, M.G. Design of multiproduct batch plants with uncertain demands / M.G. Ierapetritou, E.N. Pistikopoulos // *Computers & Chemical Engineering*. – 1995. – Vol. 19. – P. 627 – 635.
59. Ierapetritou, M.G. Batch plant design and operations under uncertainty / M.G. Ierapetritou, E.N. Pistikopoulos // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1996. – Vol. 35. – P. 772 – 781.
60. Harding, S.T. Global optimization in multiproduct and multipurpose batch design under uncertainty / S.T. Harding, C.A. Floudas // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1997. – Vol. 36. – No. 5. – P. 1644 – 1664.
61. Petkov, S.B. Design of multiproduct batch plants under demand uncertainty with staged capacity expansions / S.B. Petkov, C.D. Maranas // *Computers & Chemical Engineering*. – 1998. – Vol. 22. – Supp. No. 1. – P. S789 – S792.
62. Sahinidis, N.V. Reformulation of the multiperiod MILP model for capacity expansion of chemical processes / N.V. Sahinidis, I.E. Grossmann // *Operations Research*. – 1992. – Vol. 40. – Supp. No. 1. – P. S127 – S144.
63. Myers, K.H. Capacity expansion analysis in a chemical plant using linear programming / K.H. Myers, R.R. Leavy // *International Journal of Materials and Product Technology*. – 1996. – Vol. 11. – P. 62 – 68.
64. Малыгин, Е.Н. Определение резерва производительности ГХТС в условиях неопределенности / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Т.А. Фролова. – Черкассы, 1990. – 11 с. – Деп. в ОНИИТТЭХИМ 22.11.1990, № 708-ХП90.
65. Малыгин, Е.Н. Оценка резерва производительности ГХТС многоассортиментных производств с использованием аппарата нечетких множеств / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Т.А. Фролова // *Химическая промышленность*. – 1991. – № 5. – С. 308-310.
66. Фролова, Т.А. Математическое моделирование и оптимизация гибких химико-технологических систем производств полупродуктов и красителей в условиях неопределенности : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 18.12.1992 : утв. 21.05.1993 / Т.А. Фролова. – Тамбов, 1992. – 183 с.
67. Grossmann, I.E. Optimum design of chemical plants under uncertain parameters / I.E. Grossmann, R.W.H. Sargent // *AIChE Journal*. – 1978. – Vol. 24. – No. 6. – P. 1021 – 1032.
68. Halemane, K.P. Optimal process design under uncertainty / K.P. Halemane, I.E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 1983. – Vol. 29. – No. 3. – P. 425 – 433.
69. Grossmann, I.E. Active constraint strategy for flexibility analysis in chemical processes / I.E. Grossmann, C.A. Floudas // *Computers & Chemical Engineering*. – 1987. – Vol. 11. – No. 6. – P. 478 – 484.
70. Островский, Г.М. О гибкости химико-технологических процессов / Г.М. Островский, Ю.М. Волин., М.М. Сенявин, Т.А. Бережинский // *Теоретические основы химической технологии*. – 1994. – Т. 28. – № 1. – С. 54 – 61.



71. Pistikopoulos, E.N. Novel approach for optimal process design under uncertainty / E.N. Pistikopoulos, M.G. Ierapetritou // *Computers & Chemical Engineering*. – 1995. – Vol. 19. – No. 10. – P. 1089 – 1097.
72. Ostrovsky, G.M. An approach to solving two stage optimization problem under uncertainty / G.M. Ostrovsky, Yu. M. Volin, E.I. Barit, M.M. Senyavin // *Computers & Chemical Engineering*. – 1997. – Vol. 21. – No. 3. – P. 317 – 326.
73. Бодров, В.И. Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий // *Теоретические основы химической технологии*. – 1997. – Т. 31. – № 5. – С. 542 – 548.
74. Birewar, D.B. Efficient optimization algorithms for zero-wait scheduling of multiproduct batch plants / D.B. Birewar, I.E. Grossmann // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1989. – Vol. 28. – P. 1333 – 1345.
75. Wellons, M.S. Scheduling of multipurpose batch chemical plants - 2. Multiple-product campaign formation and production planning / M.S. Wellons, G.V. Reklaitis // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1991. – Vol. 30. – P. 688-705.
76. Zang, X. The optimal operation of mixed product facilities - general formulation and some solution approaches for the solution / X. Zang, R.W.H. Sargent // *Computers & Chemical Engineering*. – 1996. – Vol. 20. – P. 897 – 904.
77. Mauderli, I. Production planning and scheduling for multipurpose batch chemical plants / I. Mauderli, D.W.T. Rippin // *Computers & Chemical Engineering*. – 1979. – Vol. 3. – P. 199 – 204.
78. Cerda, J. A new methodology for the optimal design and production schedule of multipurpose batch plants / J. Cerda, M. Vicente, J.M. Guiterres, S. Esplugas, J. Mata // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1989. – Vol. 28. – P. 988 – 998.
79. Sahinidis, N.V. Reformulation of the multiperiod MILP model for planning and scheduling of chemical processes / N.V. Sahinidis, I.E. Grossmann // *Computers & Chemical Engineering*. – 1991. – Vol. 15. – P. 255 – 272.
80. Shah N. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations / N. Shah, C.C. Pantelides, R.W.H. Sargent // *Computers & Chemical Engineering*. – 1993. – Vol. 17. – P. 229 – 244.
81. Kondili, E. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations - I. MILP formulation / E. Kondili, C.C. Pantelides, R.W.H. Sargent // *Computers & Chemical Engineering*. – 1993. – Vol. 17. – P. 211 – 227.
82. Pinto, J.M. Optimal cyclic scheduling of multistage multiproduct plants / J.M. Pinto, I.E. Grossmann // *Computers & Chemical Engineering*. – 1994. – Vol. 18. – P. 797-816.
83. Bhatia, T. Dynamic optimization in the design and scheduling of multiproduct batch plants / T. Bhatia, L.T. Biegler // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1996. – Vol. 35. – P. 2234 – 2246.
84. Papageorgiou, L.G. Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 1. Mathematical Formulation / L.G. Papageorgiou, C.C. Pantelides // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1996. – Vol. 35. – No. 2. – P. 488 – 509.
85. Papageorgiou, L.G. Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 2. A Mathematical Decomposition Approach / L.G. Papageorgiou, C.C. Pantelides // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1996. – Vol. 35. – No. 2. – P. 510 – 529.
86. Ierapetritou, M.G. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling: 1. Multipurpose batch processes / M.G. Ierapetritou, C.A. Floudas // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1998. – Vol. 37. – P. 4341 – 4359.
87. Ierapetritou, M.G. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling: 2. Continuous and semi-continuous processes / M.G. Ierapetritou, C.A. Floudas // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1998. – Vol. 37. – P. 4360 – 4374.
88. Ierapetritou, M.G. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling: 3. Multiple intermediate due dates / M.G. Ierapetritou, T.S. Hene, C.A. Floudas // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1999. – Vol. 38. – P. 3446 – 3461.
89. Lin, X. Design, synthesis and scheduling of multipurpose batch plants via an effective continuous-time formulation / X. Lin, C.A. Floudas // *Computers & Chemical Engineering*. – 2001. – Vol. 25. – P. 665 – 682.
90. Orçun, S. General continuous time models for production planning and scheduling of batch processing plants: MILP formulations and computational issues / S. Orçun, I.K. Antinel, Ö. Hortaçsu // *Computers & Chemical Engineering*. – 2001. – Vol. 25. – P. 371 – 389.
91. Бельков, В.П. Разработка методов анализа и синтеза гибких многоассортиментных химических производств периодического действия : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / В.П. Бельков. – М., 2004. – 32 с.
92. Parageorgaki, S. Optimal design of multipurpose batch processes. 2. A decomposition solution strategy / S. Parageorgaki, G.V. Reklaitis // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1990. – Vol. 29. – P. 2062 – 2073.
93. Декомпозиционный алгоритм оптимизации многопродуктовых химико-технологических систем / Л.С. Гордеев, В.В. Макаров, Ю.В. Сбоева, Е.В. Иленева // *Программные продукты и системы*. – 1997. – № 1. – С. 2 – 10.
94. Даффин, Р. Геометрическое программирование / Р. Даффин, Э. Питерсон, К. Зенер. – М.: Мир, 1972. – 311 с.

95. Lu, C.Y. Close approximations of global optima of process design problems / C.Y. Lu, J. Weisman // *Industrial & Engineering Chemistry. Process Design & Development*. – 1983. – Vol. 22. – No. 3. – P. 391 – 396.
96. Полак, Э. Численные методы оптимизации. Единый подход / Э. Полак. – М.: Мир, 1974. – 376 с.
97. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 536 с.
98. Рыбников, К.А. Введение в комбинаторный анализ / К.А. Рыбников. – М. : Высшая школа, 1972. – 255 с.
99. Ковалев, М.М. Дискретная оптимизация / М.М. Ковалев. – Минск : Изд-во БГУ, 1977. – 191 с.
100. Floudas, C.A. Global optimization algorithm (GOP) for certain classes of nonconvex NLPs: I. Theory / C.A. Floudas, V. Wisvesvaran // *Computers & Chemical Engineering*. – 1990. – Vol. 14. – P. 1397 – 1409.
101. Kocis, G. Global optimization of nonconvex mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problems in process synthesis / G. Kocis, I.E. Grossmann // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1988. – Vol. 27. – P. 1407 – 1415.
102. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 432 с.
103. Voudouris, V.T. Mixed integer-linear programming reformulations for batch process design with discrete equipment sizes / V.T. Voudouris, I.E. Grossmann // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1992. – Vol. 31. – P. 1315 – 1322.
104. Лapidус, А.С. Экономическая автоматизация химических производств / А.С. Лapidус. – М.: Химия, 1986. – 208 с.
105. Трусов, А.Д. Планирование и учет издержек производства в химической промышленности / А.Д. Трусов, В.К. Андреев, Ю.Н. Наумов и др. – М. : Химия, 1977. – 262 с.
106. Кантарджян, С.Л. Экономические проблемы оптимизации химико-технологических процессов / С.Л. Кантарджян. – М. : Химия, 1980. – 152 с.
107. Официальный web-сайт Бердичевского завода "Прогресс" // <http://www.progress.com.ua/products>.
108. Официальный web-сайт завода "УралХИММАШ" // <http://www.uralhimmach.ru/catalog>.
109. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – СПб. : Химия, 1993. – 495 с.
110. Официальный web-сайт ООО "Техника" (г. С.-Петербург) // <http://www.emkosti.spb.ru>.
111. Официальный web-сайт группы компаний ЕВРОМАШ // <http://www.evromash.ru>.
112. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии : учебное пособие / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1985. – 327 с.
113. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1975. – 576 с.
114. Канторович, Л.В. Функциональный анализ / Л.В. Канторович, Г.П. Акилов. – М. : Наука, 1984. – 752 с.