

**С. И. ДВОРЕЦКИЙ, Д. С. ДВОРЕЦКИЙ,  
Г. С. КОРМИЛЬЦИН, А. А. ПАХОМОВ**

# **ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Рекомендовано Федеральным государственным бюджетным  
образовательным учреждением высшего профессионального образования  
«Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки «Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»



**Москва, 2014**

УДК 66.0135(075.8)  
ББК Л11-5-02  
DOI 10.14489/4442-0069-8  
О-753

Рецензенты:

Кафедра «Машины и аппараты химических и  
пищевых производств» Нижегородского государственного  
технического университета им. Р. Е. Алексеева  
(филиал Дзержинского политехнического института)

Доктор технических наук, профессор, декан инженерного факультета,  
профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»  
им. Н. И. Гельперина Московского государственного университета  
тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова  
*А. Л. Таран*

О-753      **Основы** проектирования химических производств: учебник /  
С. И. Дворецкий, Д. С. Дворецкий, Г. С. Кормильцин, А. А. Пахомов. –  
Москва: Издательский дом «Спектр», 2014. – 356 с. – 400 экз. –  
ISBN 978-5-4442-0069-8.

Изложена методология (система принципов, способов организации и построения теоретической и практической деятельности при проектировании) и формализована стратегия интегрированного проектирования промышленных энерго- и ресурсосберегающих технологических процессов, оборудования и ХТС, обеспечивающая оптимальное (в смысле безопасности, энерго- и ресурсосбережения и качества выпускаемой продукции) функционирование ХТС. Специальные разделы посвящены новым подходам к аппаратурно-технологическому оформлению ГАПС химических производств, вопросам обеспечения промышленной безопасности и методическим указаниям по выполнению выпускных работ бакалавров и магистров.

Предназначен для студентов технических вузов, а также будет полезен инженерно-техническим работникам промышленных предприятий, научно-исследовательских и проектных организаций.

УДК 66.0135(075.8)  
ББК Л11-5-02

ISBN 978-5-4442-0069-8

© Дворецкий С. И., Дворецкий Д. С.,  
Кормильцин Г. С., Пахомов А. А., 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	5
<b>Глава 1. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ</b> .....	6
Вопросы для самоконтроля .....	10
<b>Глава 2. ПРЕДПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ</b> .....	11
2.1. Определение мощности проектируемого производства .....	12
2.2. Выбор метода (технологии) производства .....	14
2.3. Эскизная технологическая схема. Расчет материальных и тепловых балансов по стадиям производства .....	20
2.4. Выбор площадки строительства .....	21
2.5. Задание на проектирование и исходные материалы .....	23
Вопросы для самоконтроля .....	26
<b>Глава 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ</b> .....	27
3.1. Проект .....	28
3.1.1. Анализ исходных данных .....	34
3.1.2. Разработка ситуационного и генерального планов .....	40
3.1.3. Общие принципы анализа, расчета и выбора технологического оборудования химических производств .....	44
3.1.4. Расчет нестандартного оборудования .....	56
3.1.5. Расчет на прочность элементов оборудования .....	75
3.1.6. Разработка принципиальной технологической схемы ...	111
3.1.7. Компоновка производства .....	116
Вопросы для самоконтроля .....	132
<b>Глава 4. ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СОСТАВЕ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ</b> .....	134
4.1. Разработка декларации промышленной безопасности .....	135
4.2. Основы разработки плана локализации и ликвидации последствий аварий .....	140
4.3. Оценка воздействия проектируемого объекта на окружающую среду .....	144
Вопросы для самоконтроля .....	148

---

<b>Глава 5. РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ</b> .....	149
Вопросы для самоконтроля .....	163
<b>Глава 6. ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, АППАРАТОВ И СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ</b> .....	164
6.1. Общая характеристика и основные понятия процесса интегрированного проектирования ХТС .....	164
6.2. Средства и методы интегрированного проектирования ХТС ...	172
6.3. Методология интегрированного проектирования ХТС .....	179
6.4. Управление процессом интегрированного проектирования ...	187
Вопросы для самоконтроля .....	194
<b>Глава 7. НОВЫЕ ПОДХОДЫ К АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ОФОРМЛЕНИЮ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ</b> .....	196
7.1. Оценка гибкости и одноэтапное интегрированное проектирование ХТС в условиях интервальной неопределенности исходных данных .....	196
7.2. Двухэтапное интегрированное проектирование ХТС в условиях интервальной неопределенности исходных данных .....	208
7.3. Программные продукты САПР .....	236
7.3.1. Техническое обеспечение САПР .....	240
7.3.2. Информационное обеспечение САПР .....	244
7.3.3. Лингвистическое обеспечение САПР .....	246
Вопросы для самоконтроля .....	255
<b>Глава 8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ</b> .....	256
8.1. Основные понятия и определения многоассортиментных ХТС	256
Вопросы для самоконтроля .....	268
8.2. Основные подходы к анализу и синтезу многоассортиментных ХТС .....	270
Вопросы для самоконтроля .....	272
8.3. Математическое моделирование многоассортиментных ХТС	272
Вопросы для самоконтроля .....	283
8.4. Гибкие автоматизированные производственные системы ....	284
Вопросы для самоконтроля .....	305
<b>Приложение. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ РАБОТЫ</b> .....	308
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	349
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	353

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Проектирование химических предприятий как самостоятельная отрасль инженерного труда относительно молода. До 30-х годов XX века в России разработкой новых химических производств занимались инженеры в конторах заводов и конструкторских бюро исследовательских институтов [1]. В дальнейшем развитие химической промышленности и увеличение объема проектных работ вызвало профилизацию отдельных групп специалистов: технологов, механиков, строителей и т.д. Затем были созданы комплексы, куда вошли отраслевые научно-исследовательские, проектные и строительно-монтажные организации.

В последние годы стремительно развиваются и совершенствуются теория математического моделирования и оптимизация технологических процессов, системы автоматизированного проектирования (САПР) химических производств [2]. При этом, однако, следует помнить, что в первую очередь необходимо освоить общую методику проектирования сложных химико-технологических систем и производств.

Высокий и стабильный экономический уровень России может быть обеспечен за счет гармоничного развития всех отраслей ее промышленности. Это развитие должно базироваться на внедрении новейших достижений науки и техники через проекты для строительства новых и модернизации действующих промышленных объектов.

Проектирование производств химической и смежных с ней отраслей промышленности представляет собой сложный, многообразный и трудоемкий процесс, который необходимо рассматривать как совокупность целого ряда социально-организационных и инженерно-технических стадий. Только системный подход к решению проектных задач обеспечит высокий социально-экономический уровень функционирования промышленных объектов, и этот подход выработан в процессе развития проектного дела.

Содержание данного издания отражает материалы учебных пособий, изданных авторами ранее [3, 4], многолетний опыт преподавания в Тамбовском институте химического машиностроения и ныне Тамбовском государственном техническом университете дисциплины «Проектирование химических предприятий».

Авторы признательны коллективу кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева и декану инженерного факультета доктору технических наук, профессору кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» им. Н. И. Гельперина Московского государственного университета тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова А. Л. Тарану за рецензирование рукописи и полезные замечания, которые в ходе работы были учтены.

# 1

глава

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

*Проект производства* – это комплекс технической документации, необходимый для сооружения промышленного объекта. В проект входят пояснительные записки, инженерно-технические расчеты, чертежи, технологические регламенты, сведения о поставке сырья и удалении отходов производства, информация об организации труда, сметы на все производственные и культурно-бытовые сооружения будущего предприятия.

Проектная документация предназначена для так называемого *заказчика*. В качестве заказчика могут выступать юридические и частные лица, т.е. организации и лица, заинтересованные в выпуске заданного ассортимента химической продукции. Проектная документация разрабатывается *проектировщиком*. В соответствии с Федеральным Законом № 315-ФЗ от 01.12.2007 все проектные организации обязаны состоять в системе саморегулируемых организаций (СРО).

В разработке и реализации проекта кроме проектной организации (*генеральный подрядчик*) принимают участие специализированные предприятия: строительные, монтажные, пусконаладочные и другие, которые называются *субподрядчиками*.

Отношения между заказчиком и подрядчиками регламентируются инструкциями о порядке разработки, согласовании, утверждении и составе проектной документации на строительство предприятий, например, Строительные Нормы и Правила (СНиП) 11-01–95 [5].

Отправным пунктом разработки проектной документации является утвержденное *обоснование инвестиций* в строительство предприятия. Это технико-экономическое доказательство необходимости создания промышленного объекта. Обоснование инвестиций делает заказчик, а точнее, служба маркетинга организации-заказчика по специальной форме, в ходе которого раскрывается ее технический, кадровый, финансовый потенциал и ориентировочно оцениваются технико-экономические показатели проектируемого предприятия.

Обоснование инвестиций утверждается руководителем предприятия-заказчика. Затем после рассмотрения государственной экспертизой обоснование инвестиций согласовывается с *инвестором*, которым чаще всего является банк.

Проектная документация разрабатывается после утверждения инвестиций, как правило, на конкурсной основе через торги подряда (*тендер*). В проекте детализируются принятые в обосновании инвестиций решения и уточняются основные технико-экономические показатели проектируемого объекта. Проектировщик в своей деятельности руководствуется законодательными нормативными актами Российской Федерации и ее субъектов.

После конкурсных торгов заказчик и проектировщик заключают *договор* (контракт), регулирующий правовые и финансовые отношения, взаимные обязательства и ответственность сторон. Неотъемлемой частью договора является *задание на проектирование и исходные материалы*. Предварительно заказчик с проектировщиком и другими заинтересованными организациями выбирают *площадку строительства*, т.е. место расположения будущего предприятия.

Проектная документация на строительство промышленных предприятий может разрабатываться в одну или две стадии. Для технически несложных объектов, а также строящихся по проектам массового и повторного применения документация разрабатывается в одну стадию – *рабочий проект*. Для технически сложных объектов с целью исключения ошибок и улучшения качества технической документации используют двухстадийное проектирование. На первой стадии разрабатывается *проект*, а затем на его основе *рабочая документация* для строительства промышленного объекта.

Проект подвергается *государственной экспертизе* и согласовывается с другими заинтересованными организациями. На основании утвержденного проекта при необходимости подготавливается тендерная документация и проводятся торги подряда на строительство объекта. Затем заключается договор, открывается финансирование строительства и разрабатывается рабочая документация.

Современные химические производства отличаются многостадийностью получения целевых продуктов, сложностью технологических решений, высокой энергонасыщенностью и материалоемкостью, большой протяженностью и сложностью трубопроводных и кабельных коммуникаций, глубокой функциональной взаимозависимостью по материальным, энергетическим и информационным потокам отдельных стадий. Для размещения таких сложных производств, коммуникаций и всех служб возникает необходимость в создании специализированных зданий, подземных сооружений и эстакад.

Строительство и ввод в действие промышленных производств связаны со значительными затратами денежных средств, материальных и трудовых ресурсов и поэтому проекты должны обеспечивать:

– реализацию последних достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта;

- внедрение высокопроизводительного энергосберегающего оборудования, установок и агрегатов большой единичной мощности;
- рациональное использование природных ресурсов, комплексное использование сырья и материалов, организацию безотходной энергосберегающей технологии производства;
- автоматизацию и механизацию производственных процессов, отдельных технологических машин и аппаратов.

Развитие современных химико-технологических систем (ХТС) сопровождается значительным усложнением технологических схем, созданием энерготехнологических циклов, машин и аппаратов сложных конструкций, работающих в условиях агрессивных сред, высоких температур и давлений. В связи с этим при их проектировании необходимо решать проблемы охраны окружающей среды, обоснованного применения конструкционных материалов, обеспечения надежности технологического оборудования, безопасности производства. Все это требует совершенствования самого процесса проектирования, повышения качества проектной документации, четкого определения совокупности нормативных документов по отдельным стадиям проекта.

В проектировании современных ХТС ведущая роль принадлежит технологу, который выбирает метод (технологию) получения продукта, рассчитывает и выбирает оборудование, разрабатывает технологическую схему производства, выдает задания специалистам-смежникам проектной организации на разработку общепромышленных разделов проекта (строительного, монтажного, электротехнического, КИПиА, сантехнического и т.д.), согласовывает результаты выполнения этих заданий с основными решениями по технологическому разделу. Для координации и увязки всех разделов назначается главный инженер проекта (ГИП). Он является техническим руководителем не только в период разработки проекта, но и монтажа технологической схемы, а также пуско-наладочных работ (*авторский надзор*). Он несет ответственность за правильность решений, сроки выполнения и технико-экономические показатели проектируемого объекта.

Взаимосвязь отделов проектной организации и главного инженера проекта можно проиллюстрировать схемой, представленной на рис. 1.1.

В целом методику разработки проектной документации можно иллюстрировать блок-схемой, представленной на рис. 1.2.

Как показывает эта блок-схема, проектирование является итерационным процессом.

Принятые решения при обосновании инвестиций не только уточняются, но и могут измениться, например, в процессе подготовки задания на проектирование: обосновывается принятый метод производства, уточняется ассортимент и мощность будущего промышленного объекта.

В свою очередь решения, принятые при подготовке задания на проектирование, корректируются при разработке проекта и рабочей документации.



Рис. 1.1. Схема взаимосвязей отделов проектной организации



Рис. 1.2. Блок-схема принятия решений в процессе проектирования и создания промышленного объекта

### Вопросы для самоконтроля

1. *Что принято понимать под проектом производства?*
  - совокупность документации договора между заказчиком и подрядчиком;
  - комплекс технической документации, необходимый для сооружения промышленного объекта;
  - совокупность тендерной документации.
2. *Для кого предназначена проектная документация?*
  - для заказчика;
  - для главного инженера проекта;
  - для генподрядчика.
3. *Что является отправным пунктом разработки проектной документации?*
  - согласие субподрядчика;
  - приказ главного инженера проекта;
  - утвержденное обоснование инвестиций.
4. *С какой целью применяется двухстадийное проектирование?*
  - с целью исключения ошибок и улучшения качества технической документации;
  - чтобы уменьшить объем проектной документации;
  - с целью сокращения сроков разработки проектной документации.
5. *Кому принадлежит ведущая роль при разработке проектов?*
  - руководителю субподрядной организации;
  - инженеру-механику;
  - инженеру-технологу.

# 2

глава

## ПРЕДПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Предпроектная подготовка к проектированию сложной ХТС или химического производства предполагает решение следующих задач:

- 1) определение мощности производства;
- 2) выбор метода (технологии) производства и типа оборудования;
- 3) составление структурной (эскизной) технологической схемы;
- 4) расчет материальных и тепловых балансов производства;
- 5) выбор площадки строительства;
- 6) определение технико-экономических показателей производства;
- 7) подготовку задания на проектирование и исходные материалы.

Главной задачей предпроектирования (предпроектной подготовки) является обоснование инвестиций в строительство объекта (далее просто *обоснование*), т.е. определение экономической и технической целесообразности создания производства заданного ассортимента химической продукции.

В обосновании дается краткое описание технологического процесса и оборудования, содержатся основные данные по *ситуационному и генеральному планам* промышленного предприятия, сведения о строительных, архитектурно-планировочных и конструктивных решениях зданий и сооружений, о складском хозяйстве, ремонтной службе, о мероприятиях по охране окружающей среды. Приводятся основные решения по организации строительства промышленного предприятия и выполняется расчет его стоимости.

В обосновании рассчитывают определяющие показатели проектируемого производства заданного ассортимента химической продукции: себестоимость и годовой выпуск продукции, прибыль, численность персонала, годовой фонд заработной платы, производительность труда одного работающего, удельные капитальные вложения, производственные фонды, (в том числе основные и оборотные), рентабельность фондов (%), срок окупаемости капитальных вложений (число лет), фондоотдачу, годовую потребность в основных видах сырья (тыс. т), потреб-

ность в энергоресурсах (электроэнергии, паре, сжатых газах, воде), грузооборот по прибытию и отправлению, потребность в территории (га).

Предварительные экономические показатели будущего производства, как правило, берутся из опыта работы завода-аналога и определяются по упрощенным ориентировочным расчетам. Стоимость комплектного оборудования рассчитывается по формуле  $C = C'K^\alpha$ , где  $C'$  – стоимость оборудования для меньшей базовой мощности (завода-аналога);  $K$  – коэффициент увеличения мощности завода-аналога;  $\alpha$  – масштабный фактор, зависящий от типа оборудования и изменяющийся в пределах  $0,2 \dots 1,0$ ; общие капитальные вложения  $Q$ , необходимые для строительства и монтажа, рассчитываются как  $Q = Q'K^n$ , где  $Q'$  – капиталовложения для меньшей базовой мощности (завода-аналога);  $n$  – масштабный фактор, изменяющийся в пределах  $0,38 \dots 0,98$ .

Определив расходы сырья, материалов и энергетических затрат на выпуск единицы товарной продукции, капитальные затраты на строительство зданий и сооружений, приобретение и монтаж оборудования, приборов, коммуникаций, штаты проектируемого промышленного предприятия, можно рассчитать ориентировочную себестоимость продукции.

Себестоимость выпускаемой продукции включает следующие составляющие:

1) затраты на сырье, из которого получают готовый продукт, и затраты на вспомогательные материалы (фильтровальные ткани, упаковочные материалы и т.п.); при расчете этой статьи себестоимости из затрат вычитают стоимость утилизированных отходов;

2) затраты на электроэнергию, пар, горячую воду, сжатые газы, высококипящие теплоносители;

3) оплата труда рабочих, обслуживающих технологическое оборудование;

4) цеховые расходы: оплата труда управленческого персонала и вспомогательного производственного персонала, расходы на отопление и вентиляцию, на ремонт и обслуживание оборудования, на мероприятия по охране труда и технике безопасности;

5) общезаводские расходы на обслуживание общезаводского хозяйства, управленческого аппарата;

6) амортизационные расходы.

При проектировании новых и расширении действующих химических предприятий обычно пользуются технико-экономическими данными заводоаналогов.

## 2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМОГО ПРОИЗВОДСТВА

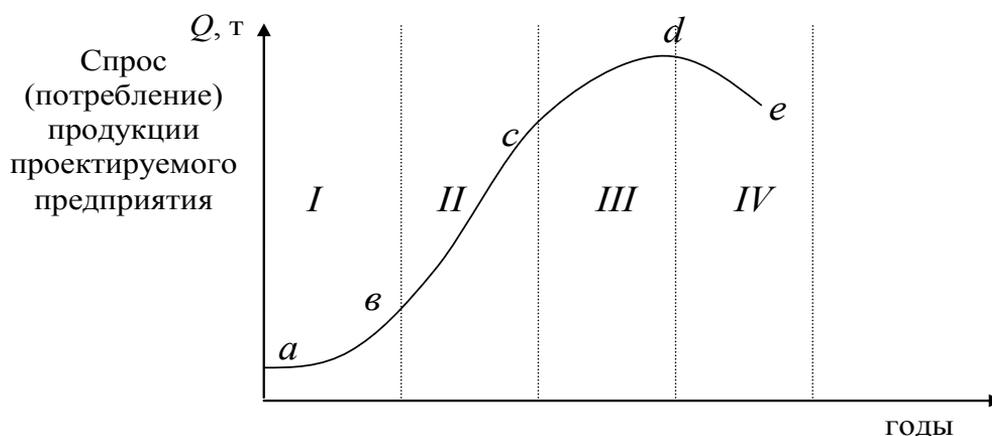
Мощность нового предприятия определяется необходимой потребностью общества не менее чем на пять лет вперед с возможностью расширения производства. Для определения мощности используют балансовый и статистический методы [1].

В *балансовом методе* исходят из конечных показателей развития рынка сбыта на планируемый период. Например, потребность в синтетических каучуках выявляется, исходя из планируемого рынка резиновых изделий (шины, технические и бытовые изделия, обувь и т.д.). Объем их производства, в свою очередь, зависит от темпов развития, намеченных для потребителей резины. По выявленной потребности в синтетических каучуках и в резиновых изделиях определяется потребность в исходных углеводородах для синтеза каучуков (бутадиен, изопрен, стиролы и др.), в химикатах-добавках для резин и в других продуктах. По общей потребности в химикатах-добавках для резин выявляют потребность в исходных промежуточных продуктах для их производства (анилин, нитробензол, дифениламин и т.д.).

*Статистический метод* предполагает изучение рынков сбыта и построение так называемой *S-кривой* прогнозирования их развития. Различают четыре характерные стадии развития рынка сбыта (рис. 2.1).

Стадия I называется инкубационной и характеризуется выработкой небольших партий продукта для отработки технологии и оценки потребителем качества выпускаемой продукции. Например, текстильным предприятиям требуется время для отработки технологии крашения и отделки тканей новыми красителями. Полагают, что оценить спрос на новый продукт, ранее не применявшийся, можно только во время инкубационного периода.

Стадия роста рынка II предполагает быстрое расширение производства. Спрос на продукт увеличивается. Если рынок сбыта полностью сформирован, то спрос стабилизируется (стадия III).



**Рис. 2.1. Кривая жизненного цикла проектируемого предприятия:**

*I* – инкубационная стадия (постепенное расширение рынка);

*II* – стадия роста (экспоненциальное расширение рынка);

*III* – стадия стабилизации; *IV* – стадия сокращения рынка

В этот период строительство новых объектов нецелесообразно и все внимание уделяется модернизации действующих предприятий и снижению себестоимости продукции. Длительность периода стабилизации зависит от того, насколько данный продукт конкурентоспособен с более новой продукцией. Стадия сокращения рынка IV может оказаться довольно короткой (около двух лет) или совсем отсутствует. Анализ кривой прогнозирования позволяет определить: относится ли спрос на продукцию проектируемого производства к периоду роста или стабилизации. Для проектируемых производств промежуточных продуктов следует анализировать статистику потребления тех веществ, которые изготавливаются из данных полупродуктов.

Одним из методов контроля потребности в продуктах широкого потребления является сравнение предполагаемой динамики их производства со статистикой роста производства этих продуктов в наиболее технически развитых странах.

Таким образом, статистический метод позволяет прогнозировать темпы роста потребления данного продукта, что дает возможность устанавливать очередность ввода мощностей, начиная с опытно-промышленных установок и кончая крупными производственными цехами.

Для выявления объема выпуска продукции рекомендуется использовать и балансовый, и статистический методы: по балансовому методу рассчитывают максимальное потребление продукта, а статический метод дает возможность прогнозировать темпы роста производства данного продукта и установить очередность ввода мощностей проектируемого производства.

## 2.2. ВЫБОР МЕТОДА (ТЕХНОЛОГИИ) ПРОИЗВОДСТВА

При выборе метода производства используют следующие критерии: технико-экономические показатели, возможности обеспечения производства сырьем, организацию доставки сырья и вывоза готовой продукции, наличие современного оборудования для промышленной реализации выбранной технологии, обеспечение заданной мощности и качества производимой продукции, соблюдение санитарно-гигиенических условий труда на производстве, обеспечение технологической и экологической безопасности.

Существующие способы разработки технологии получения целевых продуктов включают этапы выбора метода, разработки и оптимизации технологической схемы проектируемого производства [1, 6, 7].

Выбор оптимального маршрута производства продукта осуществляют технологи-исследователи либо на основе списков известных реакций, либо на основе химических аналогий. Для этого задаются видом сырья и его ресурсами, получают оценки возможных количеств целевых продуктов, степенью использования сырья.

На этом этапе составляются материальные балансы по стадиям технологического процесса, которые позволяют произвести предварительный расчет экономической эффективности метода (технологии) производства, основанного на предпо-

лагаемой стоимости продуктов и сырья без учета капитальных и эксплуатационных затрат. В результате балансового расчета выясняется целесообразность дальнейшей проработки данной технологии производства целевых продуктов.

Многие химические продукты могут быть получены по различным схемам и из различного сырья. Так, фталевый ангидрид можно получить из нафталина и О-ксилола; малеиновый ангидрид – из бензола, бутиленов и фурфурола; фенол – из кумола, бензолсульфокислоты, хлорбензола, бензола; стирол – из бензола и этилена, нефтяного этилбензола и т.д. [1].

При разработке технологической схемы химического производства проверяются как ресурсы сырья, так и денежные затраты на него по рекомендованной технологии в сравнении с затратами по другим известным технологиям. Так, малеиновый ангидрид может быть синтезирован из бензола, фурфурола и из бутан-бутиленовой фракции (продукт нефтепереработки). Например, ресурсы бензола и бутан-бутиленовой фракции обеспечивают потребность в них производства малеинового ангидрида. Потенциальные ресурсы фурфурола также велики. Поэтому показателями, определяющими выбор схемы производства, в данном случае будут эксплуатационные затраты.

Освоение технологии синтеза малеинового ангидрида из фурфурола показало, что по технико-экономическим показателям он не конкурентоспособен с двумя другими способами. Если принять суммарные расходы на сырье и энергию при синтезе продукта из фурфурола за 100%, то по бензольному методу они составят 50%, а по бутан-бутиленовому – около 35%. Кроме того, по бутан-бутиленовому методу в перспективе возможно использование отхода производства фумаровой кислоты.

Производства основного и тонкого органического и нефтехимического синтеза дают большой ассортимент продуктов (сотни наименований) и в больших количествах (от десятков до сотен тысяч тонн в год) [6, 7]. При этом в биосферу выбрасывается значительное количество различных химических веществ (углеводородов, оксидов углерода, азота, серы, органических веществ и др.), загрязняющих ее. Следовательно, необходимо разрабатывать технологии, которые обеспечивали бы сброс загрязняющих веществ в биосферу только в допустимых количествах, причем таких веществ, которые могут усваиваться природными биологическими системами. Необходимо также учитывать, что в химических производствах используется в больших количествах сырье, вода и энергия, а, кроме того, за счет химических превращений часто выделяется большое количество тепла. Следовательно, необходима такая организация производства, при которой утилизируются не только побочные продукты, но и тепло, выделяемое на различных стадиях химического производства.

В настоящее время многие отходы используются в существующих производствах. Так, например, на основе СО можно получать муравьиную кислоту (через формиаты), фосген (при хлорировании СО), метан и метанол (при гидрировании СО), парафиновые углеводы (синтез Фишера-Тропша), альдегиды, спирты и др. На основе СО<sub>2</sub> можно получать мочевины (при взаимодействии с аммиаком), эти-

ленкарбонат (при взаимодействии с оксидом этилена) и др. На основе оксидов азота можно синтезировать азотную кислоту, а из нее получать нитропарафины (нитротолуол, тринитротолуол, нитробензол, анилин) и другие продукты [8].

В качестве примера сравним два метода получения муравьиной кислоты (рис. 2.2).

В большинство вновь создаваемых в мире производств муравьиной кислоты используют метод гидролиза метилформиата (традиционная схема на рис. 2.2, а) для многотоннажных производств, как правило, удаленных от потребителя. В отличие от этого метода процесс синтеза муравьиной кислоты из формальдегида характеризуется простой и надежной технологической схемой с минимальным количеством стадий (новая схема на рис. 2.2, б). Основу его составляет прямое окисление формальдегида кислородом воздуха в трубчатом реакторе в присутствии оксидного катализатора с последующей конденсацией продукта.

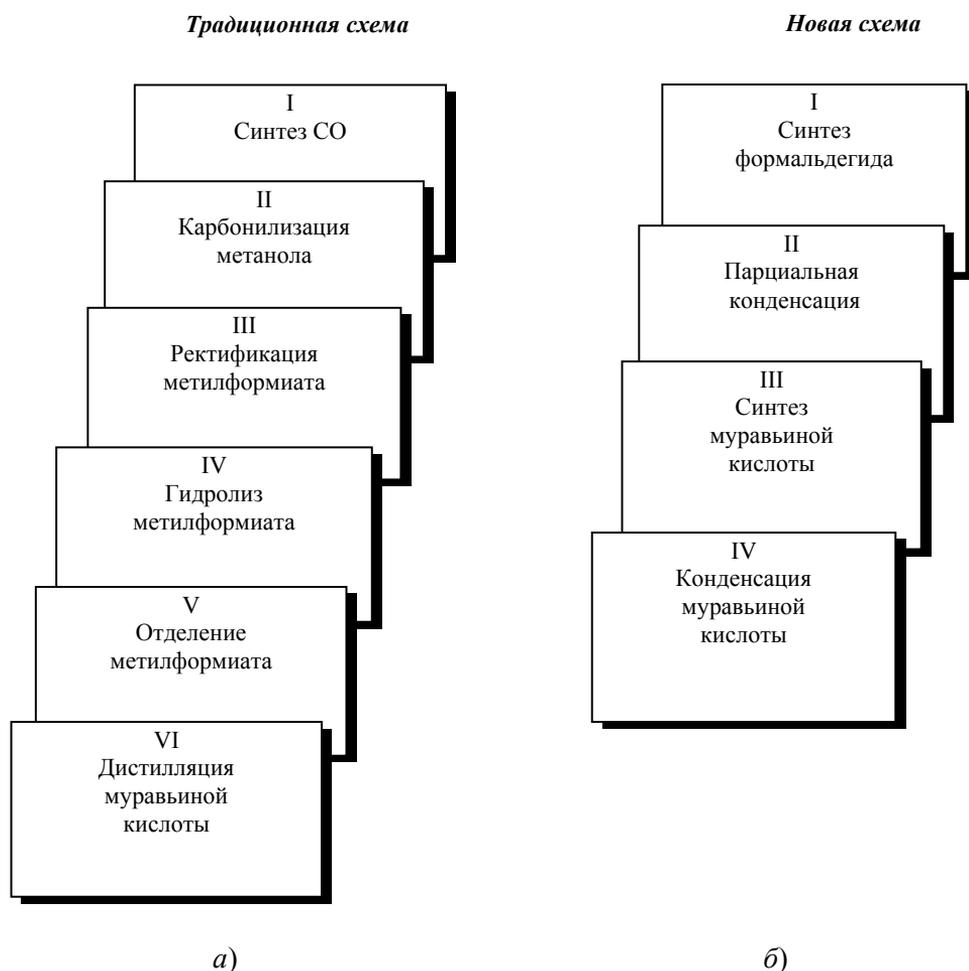


Рис. 2.2. Способы производства муравьиной кислоты

По сравнению с традиционными технологиями, новая [8] имеет ряд преимуществ: экологическая безопасность, обусловленная отсутствием сточных вод, твердых отходов и вредных газовых выбросов; низкая себестоимость конечного продукта; низкие удельные капитальные вложения и короткие сроки их окупаемости; возможность создания небольших производств в непосредственной близости от потребителя; использование стандартного технологического оборудования; небольшие занимаемые производственные площади.

Комбинация производства формалина с производством муравьиной кислоты на одном предприятии позволяет перерабатывать метанол в продукты более широкого ассортимента: формалин, муравьиную кислоту, пентаэритрит.

Технологический процесс получения муравьиной кислоты является непрерывным и включает стадии получения формальдегидсодержащего газа, обезвоживания формальдегидсодержащего газа, контактного превращения формальдегида в муравьиную кислоту, конденсации муравьиной кислоты.

Наиболее экономически эффективным является производство муравьиной кислоты, в котором в качестве сырья используют реакционные газы, полученные на серебряном катализаторе. Себестоимость 85%-ной муравьиной кислоты по этой технологии в условиях России (АО «Азот» г. Кемерово) составляет 290...300 USD за 1 т при цене метанола 200 USD за 1 т.

Обобщая вышесказанное, можно сформулировать основные принципы выбора метода (технологии) производства, позволяющего обеспечивать:

- увеличение выпуска необходимой продукции заданного качества и экологическую безопасность;
- повышение степени комплексности переработки сырья;
- использование в качестве сырья отходов производства;
- создание ресурсо- и энергосберегающих производств с малым потреблением воды.

Во всех странах наблюдается стремление сократить потребление природных ресурсов и увеличить степень использования вторичных материальных и энергетических ресурсов. Мировой и отечественный опыт показывает, что 80% экономии материальных ресурсов связано с внедрением ресурсосберегающих технологий и лишь 20% – с другими мероприятиями. Более 50% экономии топливно-энергетических ресурсов в химической промышленности в России можно получить за счет совершенствования технологических процессов, примерно 20% – путем более полного использования вторичных энергетических ресурсов и около 25% – за счет организационно-технических мероприятий.

При условии роста масштабов производства и высоких экологических требованиях можно определить два принципиально отличных друг от друга направления получения химических продуктов.

Первое направление предусматривает реконструкцию действующих производств и создание технологии с дальнейшей (более глубокой) очисткой газовых выбросов, воды, выводимой из производства и твердых отходов, вредных для

природы и здоровья человека веществ. Такой путь в настоящее время широко применяется, но он малоэффективен. С помощью очистных сооружений не всегда удается полностью освободить выбросы от вредных веществ, и они попадают в биосферу. Кроме того, очистные сооружения являются дорогостоящими, занимают большие площади, создают новые проблемы уничтожения твердых отходов, потребляют большое количество материалов и энергии.

Второе направление предусматривает создание технологий и разработку новых технологических установок, обеспечивающих полную переработку сырья в продукт с использованием вторичных энергоресурсов на базе принципов рециркуляции и цикличности. При рециркуляции предусматривается создание замкнутых технологических комплексов с возвратом на вход непрореагировавшего сырья, комплексного использования энергии за счет теплообмена между прямыми и обратными потоками. Второе направление пока еще не нашло широкого распространения: реконструировать существующие производства до такой степени практически невозможно, так как в них заложена технология, по которой предусматривается вывод из химико-технологических систем разных потоков. Однако при создании новых химических производств должен соблюдаться принцип комплексного использования сырья: материальный субстант, введенный в технологический процесс, полностью перерабатывается, а полученная при переработке продукция используется в полном объеме и ассортименте.

Обобщающим принципом при создании малоотходных производств является системный подход, который следует использовать при проектировании, создании и эксплуатации производства. Более конкретные принципы, направленные на более полное использование сырья и энергетических ресурсов, а также на охрану окружающей среды, могут быть подразделены на три группы: 1) химические; 2) технологические; 3) организационно-управленческие [6, 7].

1. *Химические:*

- создание малостадийных (одностадийных) химических процессов;
- разработка методов получения продуктов из дешевого и доступного сырья;
- разработка химико-технологических процессов с повышенной селективностью;
- применение «сопряженных» методов химического синтеза;
- разработка технологий с высокими целевыми конверсиями реагентов;
- совмещение нескольких реакций, направленных на получение одного и того же целевого продукта.

2. *Технологические:*

- использование рециркуляции по компонентам и потокам;
- применение совмещенных процессов;
- полнота выделения продуктов из реакционной смеси;
- разработка процессов с низким энергопотреблением;
- полнота использования энергии системы;

- разработка технологии с минимальным расходом воды и использованием ее кругооборота;
- полнота использования газовых потоков и очистка газовых выбросов;
- применение аппаратов и технологических линий большой единичной мощности;
- применение непрерывных процессов;
- полнота использования жидких и твердых отходов;
- высокая степень автоматизации;
- обеспечение высокой надежности функционирования ХТС.

### 3. *Организационно-управленческие:*

- кооперирование и комбинирование различных производств;
- создание технологий по переработке отходов производства и на их основе безотходных территориально-промышленных комплексов;
- разработка гибких автоматизированных производственных систем (ГАПС).

Отметим, что ГАПС для химической промышленности является относительно новым объектом исследования, синтеза и управления. Применяются они в основном при организации многопродуктовых (многоассортиментных) малотоннажных химических производств, выпускающих разнообразные продукты, обычно классифицируемые по их назначению и области применения:

- лакокрасочные материалы >2000 наименований;
- красители ~6000 марок;
- лекарственные препараты >2000 видов;
- пестициды >450 препаратов;
- химикаты-добавки к полимерным материалам, реактивы и т.п.

Практически во всех многоассортиментных малотоннажных химических производствах преобладает периодический способ организации технологических процессов, для которых характерны: строгая последовательность технологических операций и стадий во времени; обособленность аппаратурных стадий в пространстве; инвариантность (независимость) «элементарных» процессов относительно их аппаратурного оформления.

ГАПС в химической технологии можно определить как интегрированный производственный комплекс, ориентированный на реализацию нефиксированного множества технологических процессов, некоторые подмножества которого могут быть реализованы параллельно (одновременно). ГАПС, как правило, содержит «избыточное» оборудование и снабжена системой гибких коммуникаций, позволяющих быстро перестраивать ее на производство новой продукции. При этом частично изменяется аппаратурный состав технологической схемы химического производства, ее структура, а также алгоритм управления, реализуемый информационно-управляемой подсистемой.

ГАПС позволяет существенно интенсифицировать многоассортиментные малотоннажные производства с переменным ассортиментом продукции, главным

образом, за счет оптимального согласования режимов работы технологического оборудования, увеличения полезного времени его работы, реализации необходимых технологических режимов и организационных мероприятий, комплексной автоматизации производства и, как следствие, обеспечение высокого качества выпускаемой продукции.

### 2.3. ЭСКИЗНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА. РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНЫХ И ТЕПЛОВЫХ БАЛАНСОВ ПО СТАДИЯМ ПРОИЗВОДСТВА

Для проектирования химических производств на основе выбранной технологии составляют предварительную эскизную (структурную) технологическую схему, на которой показывают основные технологические стадии и материальные потоки между ними, выявляют лимитирующую стадию и стадии, подлежащие усовершенствованию. Разработка эскизной схемы заключается в определении совокупности процессов, направленных на выпуск продукта заданного количества и качества при минимальной себестоимости. Химико-технологические процессы можно разделить на основные (химические, физико-химические, механические) и вспомогательные (транспортировка, упаковка, складирование, удаление отходов). Технологические стадии условно изображаются прямоугольниками (рис. 2.3).

Руководствуясь эскизной технологической схемой приступают к расчету уравнений материального и теплового балансов для всей технологической схемы.

Назначение расчета – определение расходных норм сырья и тепла для получения заданного количества конечного продукта; объемов и составов реакционных масс на каждой стадии процесса, количеств и составов отходов производства. Расчет материальных балансов стадий, связанных с химическими превращениями, проводят на основании стехиометрических уравнений реакции.

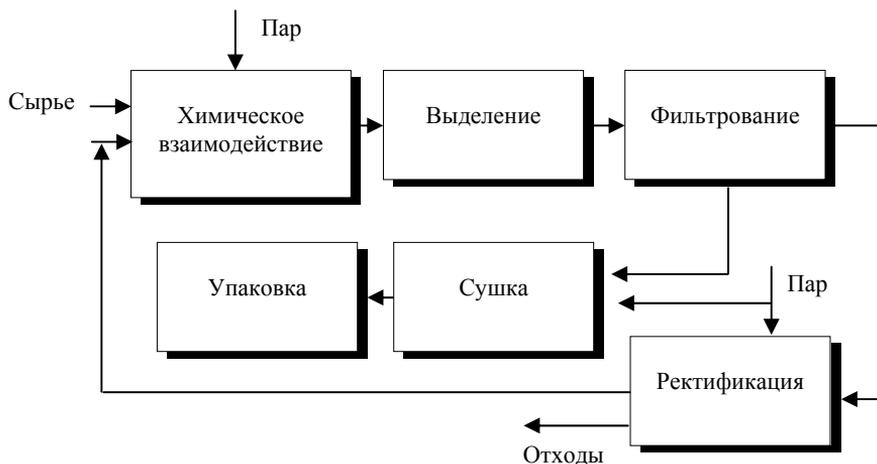


Рис. 2.3. Структурная технологическая схема

Исходными данными для проведения расчета являются: эскизная технологическая схема химического производства с указанием основных и побочных реакций; степень превращения (выход); состав исходных веществ и состав реакционной массы, поступающей с предыдущей стадии; данные регламента (завода-аналога) о соотношении реагирующих веществ для стадий, связанных с химическими превращениями и состав получаемых потоков для стадий фильтрации, сушки, ректификации и т.п.

Уравнение покомпонентного материального баланса для многостадийного химического производства имеет вид

$$\sum_{i=1}^S \sum_{r=1}^y \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p g_{irj} x_{irjk} = 0,$$

где  $g_j$  – массовый расход  $j$ -го потока;  $x_{jk}$  – доля  $k$ -го компонента в  $j$ -м потоке;  $i$  – номер технологической стадии производства,  $i = \overline{1, s}$ ;  $r$  – номер ступени превращения на технологической стадии (для периодического процесса),  $r = \overline{1, q}$ ;  $k$  – номер чистого компонента, участвующего в технологическом процессе,  $k = \overline{1, p}$ .

При составлении уравнения материального баланса периодического производства принимают допустимые потери сырья: при фильтровании – 1...2%; при сушке – 1...10%; при размоле, дроблении, смешении – 0,5%; при выпаривании, дистилляции, ректификации – 5...15%; при фасовке и упаковке – 0,5%.

Составление и расчет уравнений материального баланса можно проводить двумя способами.

1. Расчет на 1 т готового продукта. При этом рассчитывают расходные коэффициенты по сырью, объемы реакционных масс, приходящиеся на 1 т готовой продукции. Данные по реальным загрузкам в технологические аппараты, объемам реакционных масс, расходам на каждой стадии получают после пересчета.

2. Расчет на одну операцию для периодического процесса и часовую производительность – для непрерывного. В этом случае получают реальные загрузки в технологические аппараты и объемы реакционных масс.

Одновременно составляют и рассчитывают уравнения теплового баланса по стадиям производства. В результате расчетов материального и теплового балансов определяются связи проектируемого производства с общезаводским хозяйством. Следует отметить, что материальные и тепловые балансы уточняются в процессе разработки проекта.

## 2.4. ВЫБОР ПЛОЩАДКИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Организационные работы по выбору площадки строительства химического производства производит заказчик. При этом создается комиссия, в состав которой входят представители генерального проектировщика, местной администра-

ции, территориальной проектной организации Госстроя России, изыскательских организаций, территориальных и местных органов государственного надзора, штабов военных округов, гражданской обороны и других заинтересованных организаций.

Комиссия в своей работе руководствуется основами земельного, водного законодательства Российской Федерации и учитывает также проекты районной планировки.

Для оптимального выбора района строительства нового промышленного объекта необходима следующая информация [1]:

- ориентировочная потребность в сырье;
- месторасположение источников сырья;
- размещение рынков сбыта готового продукта;
- потребность в энергии (тепловой и электрической);
- количество и качество технологической воды;
- ориентировочные размеры строительной площадки с учетом перспективы расширения объекта;
- потребность в рабочей силе (по квалификациям);
- количество и состав отходов, подлежащих удалению, способы их обезвреживания.

Территориальное размещение производства является важным фактором, определяющим его экономические и социальные показатели, например, расходы на перевозку сырья и готовой продукции. Так, производство удобрений стараются разместить ближе к заводам, выпускающим минеральные кислоты. Однако следует учитывать, что затраты на перевозку готовой продукции относительно малотоннажных производств, таких как производства тонкого органического синтеза, не являются определяющим фактором, влияющим на экономические показатели и себестоимость готового продукта. При различных вариантах расположения подобных производств транспортные расходы отличаются лишь в долях процента, поэтому большое значение для таких производств имеют условия удаления отходов, особенно сброса очищенных сточных вод.

Важное значение при выборе площадки строительства приобретает вопрос обеспечения высококвалифицированными кадрами вновь строящегося промышленного предприятия. Химическое предприятие должно быть обеспечено химиками, технологами, механиками, специалистами по автоматизации, экологами, экономистами и другими, так как производство продуктов в химической отрасли связано с эксплуатацией сложных процессов и оборудования, токсичными и взрывоопасными материалами.

Немаловажным фактором при выборе района расположения химического предприятия является наличие источников воды. В химическом производстве потребляют большое количество воды как для технических нужд, так и для организации технологических процессов (в частности, процессов охлаждения).

С этой точки зрения районы, находящиеся вблизи больших рек, предпочтительнее для размещения химических предприятий, хотя при организации процессов охлаждения можно применять обессоленную морскую воду, а также при сбросе сточных вод и отработанных газов, которые могут иметь вредные вещества, окружающая среда загрязняется. Это последнее обстоятельство может оказаться решающим при выборе площадки строительства химического предприятия.

Как правило, химические производства связаны с энергоемкими процессами. Подсчитано, что на две такие стадии, как выпарка и сушка, расходуется до 20% затрат топлива и электроэнергии. Поэтому важным условием при выборе площадки строительства является вопрос теплоснабжения, газоснабжения и электроснабжения. Если вопрос электроснабжения решается порой просто – подключением к электросетям, то для теплоснабжения необходимо иметь пар соответствующих параметров и в необходимом количестве, что зачастую приводит к строительству новой ТЭЦ. Для предприятия с небольшим потреблением тепла при выборе площадки можно предусмотреть строительство собственной котельной, которая будет снабжать завод паром для технологических нужд и горячей водой для отопления.

Проектировщик по поручению заказчика осуществляет предварительный выбор нескольких альтернативных вариантов размещения предприятия. В комплекс работ по выбору оптимального варианта входят:

- инженерные обследования и изыскания в объеме, требуемом для выбора площадки;
- получение у заинтересованных организаций технических условий на подключение объекта к инженерным и транспортным коммуникациям;
- разработка проектных предложений по технологической схеме, составу завода, схеме генерального плана, энерго- и водоснабжению, транспорту сырья и готовой продукции, защите окружающей среды, жилищно-гражданскому строительству.
- технико-экономическое сравнение альтернативных вариантов и выбор оптимального варианта размещения химического предприятия.

## **2.5. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Ответственным за разработку задания является заказчик проекта. Непосредственная разработка задания на проектирование химического производства производится проектировщиком по поручению заказчика. Задание на проектирование должно содержать следующие сведения [4, 5, 7]:

- 1) наименование производства и предприятия;
- 2) основание для проектирования;
- 3) вид строительства;

- 4) стадийность проектирования;
- 5) требования по вариантной разработке;
- 6) особые условия строительства;
- 7) основные технико-экономические показатели объекта, в том числе мощность, производительность, производственная программа;
- 8) требования к качеству, конкурентной способности и экологическим параметрам продукции;
- 9) требования к технологии, режиму предприятия;
- 10) требования к архитектурно-строительным, объемно-планировочным и конструктивным решениям;
- 11) выделение очередей и пусковых комплексов, требования по перспективному расширению предприятия;
- 12) требования и условия по разработке природоохранных мер и мероприятий;
- 13) требования к режиму безопасности и гигиене труда;
- 14) требования по ассимиляции производства;
- 15) требования по разработке инженерно-технических мероприятий гражданской обороны и мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций;
- 16) требования по выполнению опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ;
- 17) состав демонстрационных материалов.

Задание на проектирование должно нацеливать проектную организацию на разработку документации с учетом последних достижений науки и техники с тем, чтобы будущее предприятие было технически передовым, выпускало продукцию высокого качества при научно обоснованных нормах затрат труда, сырья, материалов и топливно-энергетических ресурсов. Кроме того, проектировщик должен при проектировании объекта обеспечить высокую эффективность капитальных вложений, рациональное использование земель, охрану окружающей природной среды, сейсмостойкость, взрыво- и пожаробезопасность.

На данном этапе выполнения работ, как и в течение всего процесса проектирования, используется внутренняя и внешняя информация.

Составными частями внутренней информации являются материалы технического архива и библиотеки проектной организации, а также опыт и квалификация самих проектировщиков. Эта внутренняя информация может принести пользу лишь при быстром введении ее в процесс проектирования, что, в свою очередь, зависит от системы управления и организации труда в проектной организации. Эффективность внутренней информации зависит от непрерывного ее расширения и обновления при использовании обратной связи (корректировка и проверка данных внутренней информации в процессе строительства и эксплуатации проектируемых предприятий).

Слагаемыми внешней информации являются исходные данные, получаемые от заказчика и исследовательских институтов, регламенты предприятий-аналогов

и другие сведения по проектируемому объекту, поступающие извне. Конечным результатом переработки внутренней и внешней информации является проект предприятия.

Вся информация, полученная на стадии предпроектной проработки, составляет необходимые исходные материалы для проектирования. Объем их зависит от характера намеченного строительства (новостройка, расширение, реконструкция) и состава проектируемого объекта.

Исходные материалы готовит заказчик с привлечением генерального проектировщика и отраслевого научно-исследовательского института. При строительстве нового объекта к основным исходным материалам относятся:

- обоснование инвестиций в строительство объекта;
- решение местного органа исполнительной власти о предварительном согласовании места размещения объекта;
- акт выбора земельного участка для строительства объекта;
- архитектурно-планировочное задание;
- технические условия на присоединение проектируемого объекта к источникам снабжения, инженерным сетям и коммуникациям;
- исходные данные по оборудованию, в том числе индивидуального изготовления;
- необходимые данные по выполненным научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам, связанным с созданием технологических процессов и оборудования;
- материалы инвентаризации, акты и решения органов местной администрации о размере компенсации за сносимые здания и сооружения;
- материалы местной администрации, органов государственного надзора о социально-экономической обстановке, состоянии окружающей среды в районе строительства;
- материалы инженерных изысканий и обследований (по существующим сооружениям, сетям и коммуникациям);
- техническая характеристика продукции будущего химического предприятия;
- задание на разработку тендерной документации на строительство (при необходимости);
- заключение и материалы, выполненные по результатам обследования действующих производств, конструкций зданий и сооружений;
- технологические планировки действующих цехов, участков со спецификацией оборудования и сведениями о его состоянии, данными об условиях труда;
- условия на размещение временных зданий и сооружений, подъемно-транспортных машин и механизмов, мест складирования строительных материалов;
- другие необходимые материалы.

### Вопросы для самоконтроля

1. *Какие главные задачи решаются при разработке обоснования инвестиций?*
  - определение экономической и технической целесообразности создания промышленного предприятия;
  - определение условий размещения временных зданий и сооружений.
2. *Из каких статей складывается себестоимость продукции будущего объекта?*
  - затраты на разработку проектной документации;
  - затраты работ субподрядной организации;
  - затраты на сырье, энергетические затраты, оплата труда рабочих и управленцев, расходы на отопление, вентиляцию ремонт и обслуживание оборудования, на мероприятия по охране труда и технике безопасности, общезаводские и амортизационные расходы.
3. *Какие методы используют при определении мощности будущего объекта?*
  - последовательного приближения;
  - балансовый и статистический;
  - метод проб и ошибок.
4. *Какие факторы влияют на выбор метода (технологии) производства?*
  - погодные условия в процессе выбора метода;
  - технико-экономические показатели, возможности обеспечения сырьем, организация доставки сырья и вывоза готовой продукции, наличие оборудования для промышленной реализации метода, обеспечение заданной мощности и качества продукции, соблюдение санитарно-гигиенических условий труда на производстве; вопросы экологии;
  - условия сейсмичности в районе строительства объекта.
5. *Что является основой для разработки эскизной схемы?*
  - материальный баланс производства;
  - тепловой баланс производства;
  - выбранный метод производства.
6. *Какие факторы влияют на выбор площадки строительства объекта?*
  - стадийность проектирования, наличие тендерной документации;
  - ориентировочная потребность в сырье, месторасположение источников сырья, размещение рынков сбыта готового продукта, потребность в энергии (тепловой и электрической), количество и качество технологической воды, ориентировочные размеры строительной площадки с учетом перспективы расширения объекта, потребность в рабочей силе (по квалификациям), количество и состав отходов, подлежащих удалению, способы их обезвреживания;
  - наличие обоснования инвестиций.
7. *Какая информация используется при проектировании объекта?*
  - сообщения центрального телевидения;
  - газетная;
  - внутренняя и внешняя.

# 3

глава

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Разработка проектной документации заключается в конкретизации и проверке решений, принятых при составлении обоснований инвестиций. Как отмечалось выше, проектная документация для технически несложных объектов разрабатывается в одну стадию – рабочий проект. Для технически сложных она подготавливается в две стадии: проект, а затем на его основе – рабочая документация.

Выполнение проектной документации в одну стадию – рабочий проект – характерно для предприятий технически несложных, а также для тех, которые можно сооружать по типовым проектам. Рабочий проект состоит из следующих разделов:

1) общая пояснительная записка, в основе которой содержатся исходные данные для проектирования: обоснование инвестиций, акт выбора площадки, данные о потребностях в энерго- и трудовых ресурсах, чертежи ситуационного плана размещения предприятия, зданий и сооружений с указанием на нем инженерных коммуникаций (при необходимости делают дополнительные чертежи по так называемой привязке типовых и повторно применяемых проектов);

2) организация строительства – раздел готовится в соответствии с нормативными документами, утвержденными Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации;

3) сметная документация;

4) паспорт рабочего проекта.

При одно- и двухстадийном проектировании техническая документация включает в себя следующие основные разделы:

1) анализ исходных материалов;

2) расчет и выбор технологического оборудования;

3) разработка принципиальной технологической схемы производства;

4) компоновка производства;

- 5) выдача заданий на разработку спецразделов проекта;
- 6) монтажная проработка;
- 7) составление смет.

Рассмотрим более подробно основные задачи, которые решаются при двухстадийном проектировании.

### 3.1. ПРОЕКТ

Основой для выполнения проекта является утвержденное заказчиком задание на проектирование.

На стадии разработки проекта решаются все основные технические, технико-экономические, экологические и другие проблемы проектируемого производства с учетом новейших достижений науки и техники: обосновывается технология производства; разрабатывается принципиальная технологическая схема производства; рассчитывается и выбирается оборудование; осуществляется размещение оборудования технологической схемы по этажам строительных конструкций (компоновка оборудования); решаются вопросы энергоснабжения, автоматизации и механизации производства; составляются сметы и заказные спецификации на соответствующее оборудование.

Полностью состав проекта определяется инструкцией (в настоящее время СНиП 11-01–95). Проект должен содержать следующие разделы:

- 1) общая пояснительная записка;
- 2) генеральный план и транспорт;
- 3) технологические решения;
- 4) управление производством, предприятием и организация условий и охраны труда рабочих и служащих;
- 5) архитектурно-строительные решения;
- 6) инженерное оборудование, сети и системы;
- 7) организация строительства;
- 8) охрана окружающей среды;
- 9) инженерно-технические мероприятия гражданской обороны, мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций;
- 10) сметная документация;
- 11) эффективность инвестиций.

1. **Общая пояснительная записка** содержит:

- основание для разработки проекта;
- исходные материалы для проектирования;
- краткую характеристику предприятия и входящих в его состав производств;
- данные о проектной мощности и номенклатуре, качестве, конкурентоспособности, технологическом уровне продукции, сырьевой базе, потребности в топливе, воде, тепловой и электрической энергии, комплексном использовании сырья, отходов производства, вторичных энергоресурсов;

- сведения о социально-экономических и экологических условиях района строительства;
- основные показатели по генеральному плану, инженерным сетям и коммуникациям, мероприятия по инженерной защите территории;
- общие сведения, характеризующие условия и охрану труда работающих; санитарно-эпидемиологические мероприятия;
- сведения об использованных в проекте изобретениях;
- технико-экономические показатели, полученные в результате разработки проекта, их сопоставление с показателями утвержденного обоснования инвестиций в строительство объекта и установленными заданием на проектирование;
- сведения о проведенных согласованиях проектных решений; подтверждении соответствия разработанной проектной документации государственным нормам, правилам, стандартам, исходным данным, а также техническим условиям и требованиям, выданным органами государственного надзора (контроля) и заинтересованными организациями при согласовании места размещения объекта (площадки строительства).

**2. Генеральный план и транспорт.** В разделе приводятся: краткая характеристика района и площадки строительства проектируемого химического предприятия; решения и показатели по ситуационному и генеральному плану (с учетом зонирования территории), внутриплощадочному и внешнему транспорту, выбор вида транспорта, основные планировочные решения, мероприятия по благоустройству территории; решения по расположению инженерных сетей и коммуникаций; организация охраны предприятия.

Данный раздел содержит чертежи:

- ситуационный план размещения предприятия, здания, сооружения с указанием на нем существующих и проектируемых внешних коммуникаций, инженерных сетей и подсобных территорий, границы санитарно-защитной зоны, особо охраняемой территории, приводится план трасс (внутри- и внешнеплощадочных), а при необходимости – продольный профиль трасс;
- картограмму земельных масс;
- генеральный план, на который наносятся существующие и проектируемые (рекомендуемые) и подлежащие сносу здания и сооружения, объекты охраны окружающей среды и благоустройства, озеленение территории, принципиальные решения по расположению внутриплощадочных инженерных линий и транспортных коммуникаций, планировочные отметки территории. Выделяются объекты, сети и транспортные коммуникации, входящие в пусковые комплексы.

**3. Технологические решения** содержат:

- данные о производственной программе;
- характеристику и обоснование решений по технологии производства;
- данные о трудоемкости изготовления продукции, механизация и автоматизация химико-технологических процессов;
- состав и обоснование применяемого технологического оборудования (в том числе импортного);

- решения по применению малоотходных технологических процессов и производств, вторичному использованию ресурсов;
- предложения по организации контроля качества продукции;
- решения по организации ремонтного хозяйства;
- данные о количестве и составе вредных выбросов в атмосферу и сбросов в водные источники по отдельным цехам, производствам, сооружениям;
- технические решения по предотвращению (сокращению) выбросов и сбросов вредных веществ в окружающую среду; оценка возможности возникновения аварийных ситуаций и решения по их предотвращению;
- вид, состав и объем отходов производства, подлежащих утилизации и захоронению;
- топливно-энергетический и материальный балансы технологических процессов;
- потребность в основных видах ресурсов для технологических нужд.

Основные чертежи этого раздела:

- принципиальные технологические схемы производства;
- компоновочные чертежи (планы и разрезы) по корпусам (цехам);
- функциональные и принципиальные схемы автоматизации технологических процессов и энергоснабжения технологического оборудования;
- схемы грузопотоков.

**4. Управление производством, предприятием и организация условий и охраны труда рабочих и служащих.** Раздел выполняется в соответствии с нормативными документами. В нем рассматриваются организационная структура управления предприятием и отдельными производствами, автоматизированная система управления и ее информационное, функциональное, организационное и техническое обеспечение; автоматизация и механизация труда работников управления, результаты расчетов численного и профессионально-квалификационного состава работающих; число и оснащенность рабочих мест; санитарно-гигиенические условия труда работающих; мероприятия по охране труда и технике безопасности, в том числе решения по снижению производственных шумов и вибраций, загрязненности помещений, избытка тепла, повышению комфортности условий труда и т.д.

**5. Архитектурно-строительные решения.** В разделе приводятся сведения об инженерно-геологических, гидрогеологических условиях площадки строительства. Дается краткое описание и обоснование архитектурно-строительных решений по основным зданиям и сооружениям; обоснование принципиальных решений по снижению производственных шумов и вибрации; бытовому, санитарному обслуживанию работающих. Разрабатываются мероприятия по электро-, взрыво- и пожаробезопасности; защите строительных конструкций, сетей и сооружений от коррозии. Основные чертежи: планы, разрезы и фасады основных зданий и сооружений со схематическим изображением основных несущих и ограждающих конструкций.

**6. Инженерное оборудование, сети и системы.** Раздел содержит решения по водоснабжению, канализации, теплоснабжению, газоснабжению, электрооборудованию, отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха. Дано инженерное оборудование зданий и сооружений, в том числе: электрооборудование, электроосвещение, связь и сигнализация, радиофикация и телевидение, противопожарные устройства и молниезащита; диспетчеризация и автоматизация управления инженерными сетями. Основные чертежи раздела:

- планы и схемы теплоснабжения, электроснабжения, газоснабжения, водоснабжения и канализации и др.;
- планы и профили инженерных сетей;
- чертежи основных сооружений;
- планы и схемы внутрицеховых отопительно-вентиляционных устройств, электроснабжения и электрооборудования, радиофикации и сигнализации, автоматизации управления инженерными сетями и др.

**7. Организация строительства.** Раздел разрабатывается в соответствии со СНиП «Организация строительного производства» и с учетом условий и требований, изложенных в договоре на выполнение проектных работ и имеющихся данных о рынке строительных услуг.

**8. Охрана окружающей среды.** Раздел выполняется в соответствии с государственными стандартами, строительными нормами и правилами, утвержденными Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, нормативными документами и другими нормативными актами, регулирующими природоохранную деятельность.

**9. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны, по предупреждению чрезвычайных ситуаций.** Выполняется в соответствии с нормами и правилами в области гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Для определения стоимости строительства предприятий, зданий и сооружений (или их очередей) составляется *сметная документация* в соответствии с положениями и формами, приводимыми в нормативно-методических документах Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации по определению стоимости строительства.

**10. Сметная документация,** разрабатываемая на стадии проекта, должна иметь:

- сводные сметные расчеты стоимости строительства (при необходимости сводку затрат)<sup>1</sup>;
- объектные и локальные сметные расчеты;
- сметные расчеты на отдельные виды затрат (в том числе на проектные и изыскательские работы).

---

<sup>1</sup> Составляются в том случае, когда капиталовложения предусматриваются из разных источников финансирования.

В состав рабочей документации включаются объектные и локальные сметы<sup>2</sup>.

Для определения стоимости строительства рекомендуется использовать действующую сметно-нормативную (нормативно-информационную) базу, разрабатываемую, вводимую в действие и уточняемую в установленном порядке.

Разработку сметной документации рекомендуется приводить в двух уровнях цен:

1) в базисном (постоянном), определяемом на основе действующих сметных норм и цен;

2) в текущем или прогнозируемом, определяемом на основе цен, сложившихся ко времени составления смет или прогнозируемых к периоду осуществления строительства.

В состав сметной документации проектов строительства включается также пояснительная записка, в которой приводятся данные, характеризующие применяемую сметно-нормативную (нормативно-информационную) базу, уровень цен и другие сведения, отражающие условия данной стройки.

На основе текущего (прогнозируемого) уровня стоимости, определенного в составе сметной документации, заказчики и подрядчики формируют свободные (договорные) цены на строительную продукцию. Эти цены могут быть открытыми, т.е. уточняемыми в соответствии с условиями договора (контракта) в ходе строительства, или твердыми (окончательными). В результате совместного решения заказчика и подрядной строительной-монтажной организации оформляется протокол (ведомость) свободной (договорной) цены на строительную продукцию по соответствующей форме.

При составлении сметной документации, как правило, применяется ресурсный (ресурсно-индексный) метод, при котором сметная стоимость строительства определяется на основе данных проектных материалов о потребных ресурсах (рабочей силе, строительных машинах, материалах и конструкциях) и текущих (прогнозируемых) ценах на эти ресурсы.

В сводном сметном расчете отдельной строкой предусматривается резерв на непредвиденные работы и затраты, исчисляемые от общей сметной стоимости (в текущем уровне цен) в зависимости от степени проработки и новизны проектных решений. Для строек, осуществляемых за счет капитальных вложений, финансируемых из республиканского бюджета Российской Федерации, размер резерва не должен превышать трех процентов по объектам производственного назначения и двух процентов по объектам социальной сферы.

**11. Эффективность инвестиций.** Раздел готовится на основе количественных и качественных показателей, полученных при разработке соответствующих частей проекта; выполняются расчеты эффективности инвестиций. Производится сопоставление обобщенных данных и результатов расчетов с основными технико-экономическими показателями, определенными в составе обоснований инвестиций в строительство данного объекта. Примерный перечень технико-экономических показателей приведен в табл. 3.1.

<sup>2</sup> Составляются, если это предусмотрено договором на выполнение рабочей документации.

### 3.1. Примерный перечень технико-экономических показателей для объектов производственного назначения

Наименование показателя	Единицы измерения
Мощность предприятия, годовой выпуск продукции: – в стоимостном выражении – в натуральном выражении	тыс. р. в соотв. ед.
Общая площадь участка	га
Коэффициент застройки	отн. ед.
Удельный расход на единицу мощности: – электроэнергии; – воды; – природного газа; – мазута; – угля	кВт·ч м <sup>3</sup> тыс. м <sup>3</sup> т т
Общая численность работающих	чел.
Годовой выпуск продукции на работающего: – в стоимостном выражении; – в натуральном выражении	тыс. р./чел. ед./чел.
Общая стоимость строительства, в том числе строительно-монтажных работ	тыс. р.
Удельные капитальные вложения	р./ед. мощности
Продолжительность строительства	мес.
Стоимость основных производственных фондов	тыс. р.
Себестоимость продукции	тыс. р./ед.
Балансовая (валовая) прибыль	тыс. р.
Чистая прибыль	тыс. р.
Уровень рентабельности производства	%
Внутренняя норма доходности	%
Срок окупаемости	лет
Срок погашения кредита и других заемных средств	лет

### 3.1.1. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Первоочередной задачей анализа исходных данных является проверка обоснованности рекомендованного метода производства. Если учесть, что один и тот же продукт можно получить различными методами и из различного сырья, то решающим фактором при выборе схемы часто оказывается стоимость сырья. Это объясняется тем, что в химической промышленности затраты на сырье составляют значительную долю производственных расходов.

При выборе технологии производства необходимо учитывать ограничивающие параметры, в частности, запрещено использовать в процессе переработки вредные для здоровья вещества. Токсические свойства новых видов сырья должны быть исследованы специализированными организациями. Кроме того, выбирая технологию производства, следует руководствоваться действующими правилами и нормами по технике безопасности и охране окружающей среды.

Сравнивая с технологической точки зрения непрерывный и периодический способы получения одного и того же продукта, следует помнить, что эффективное применение непрерывного метода возможно при наличии сырья с постоянными заданными физико-химическими свойствами, надежного контроля производства с автоматическим поддержанием необходимых параметров процесса, надежной и бесперебойной работы оборудования. Для периодического производства характерен пооперационный контроль, требования к которому должны быть высокими с целью обеспечения заданного качества продукта.

В целом непрерывные производства имеют значительные преимущества перед периодическими: возможность постадийной специализации аппаратуры, стабилизация процесса во времени, а, следовательно, постоянное качество продукта, возможность регулирования параметров процесса и полной его автоматизации. Непрерывные схемы предусматриваются, как правило, для крупно- и среднетоннажных производств, а периодические – для малотоннажных, что объясняется в первом случае рентабельностью применения средств автоматизации.

При выборе технологии химического производства прежде всего изучают различные методы получения продукции, которую будет выпускать проектируемый объект. При этом учитывают новейшие результаты исследований по усовершенствованию технологии производства, анализируют регламенты действующих и опытных производств-аналогов, проверяют нормы расхода сырья, вспомогательных материалов, рекомендации по выбору конструкционных материалов для изготовления оборудования. При рассмотрении базового регламента проектировщик намечает пути усовершенствования некоторых технологических узлов с учетом последних достижений науки и техники.

Одним из таких путей является поиск и разработка методов интенсификации технологических процессов. Интенсификация химико-технологических процессов дает возможность увеличить производительность аппаратов при уменьшении их габаритов, металлоемкости, стоимости и соответствующем сокращении необ-

ходимых производственных площадей и уменьшении эксплуатационных расходов. Кроме того, интенсификация технологических процессов зачастую позволяет получить новые эффекты, соизмеримые и даже превосходящие по значимости основные целевые эффекты (уменьшение инкрустации на внутренних поверхностях аппаратов или осмоления перерабатываемых веществ, увеличение селективности химических процессов, улучшение качества продукции, уменьшение энергетических затрат).

Известно значительное количество традиционных и сравнительно новых способов интенсификации технологических процессов [9]. Условно их можно разделить на два класса: системные (когда к установке подходят как к единому целому) и декомпозиционные методы, при которых выявляют и интенсифицируют лимитирующие стадии процесса или элементы его аппаратного оформления.

Под интенсивностью  $i$  любого технологического аппарата понимают отношение одной из количественных характеристик  $Q$  (например, производительности или количества переносимого тепла) к основной геометрической характеристике аппарата (например, поверхности рабочей зоны).

Для теплообменного аппарата

$$i = \frac{Q}{F\tau} = \frac{K_2 F \tau \Delta t_{cp}}{F\tau} = K_2 \Delta t_{cp} =$$

$$= K_2 \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,31g \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\left[ \frac{1}{\alpha_1} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_2} \right] \cdot 2,31g \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (3.1)$$

где  $F$  – поверхность теплообмена;  $K_2$  – коэффициент теплопередачи;  $\tau$  – время;  $\Delta t_{cp}$  – среднелогарифмическая разность температур;  $\Delta t_6$ ,  $\Delta t_m$  – большая и меньшая разности температур между теплоносителями;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи;  $\delta_j$  – толщина стенки и отложений;  $\lambda_j$  – теплопроводность стенки и отложений.

Соотношение (3.1) можно использовать для составления наглядной схемы действий разработчика технологии по интенсификации конкретного теплообменного аппарата, вводя обозначения:  $\uparrow$  – необходимость увеличения и  $\downarrow$  – необходимость уменьшения того или иного параметра [9]. В этом случае последнее соотношение можно записать в виде

$$i \uparrow = (\Delta t_6 \uparrow, \Delta t \downarrow, \alpha_1 \uparrow, \delta_j \downarrow, \lambda_j \uparrow, \alpha_2 \uparrow). \quad (3.2)$$

В соответствии с соотношением (3.1) необходимо увеличивать наименьшее  $\alpha$ . Такая запись показывает направление изменения тех или иных параметров процесса или конструктивных характеристик аппарата для интенсификации процесса теплообмена.

Рассмотрим теперь пути интенсификации массообменной аппаратуры.

Если использовать основное уравнение процесса массопереноса, то для наиболее распространенных тарельчатых массообменных аппаратов фактор интенсификации можно рассчитать по формуле

$$i = M/V = K_3 F \Delta C/V, \quad (3.3)$$

где  $M$  – масса вещества, переносимого в единицу времени;  $V = n(V_6 + V_c) = nF(H_6 + H_c)$  – объем тарельчатого аппарата;  $V_6, V_c$  – соответственно объем рабочей (барботажной) и сепарационной зон одной секции аппарата;  $F$  – поверхность полотна тарелки;  $H_6, H_c$  – соответственно высота барботажной и сепарационной зон;  $K_3$  – коэффициент массопередачи, отнесенный к  $1 \text{ м}^2$  полотна тарелки;  $\Delta C$  – движущая сила процесса.

Для противоточного аппарата (допускается коэффициент массопередачи, не зависящий от концентрации), запишем

$$i = K_3 \Delta C/[n(H_6 + H_c)]. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) видно, что на величину фактора интенсификации оказывает влияние кинетический параметр  $K_3$ , движущая сила  $\Delta C$  и число секций в аппарате, тесно связанные со статическими характеристиками процесса, в частности, с равновесиями между фазами, определяемыми термодинамическими свойствами компонентов системы, а также параметрами  $H_6$  и  $H_c$ . Последние зависят в основном от конструктивных особенностей аппарата и физико-химических свойств перерабатываемых продуктов. Вводя эффективность ступени контакта  $\eta$ , получим

$$i = \eta K_3 \Delta C/[n_T(H_6 + H_c)], \quad (3.5)$$

где  $n_T$  – число необходимых теоретических ступеней контакта.

Тогда направление интенсификации массообменного аппарата можно представить в виде

$$i \uparrow = \eta \uparrow, K \uparrow, \Delta C \uparrow, n_T \downarrow, H_6 \downarrow, H_c \downarrow. \quad (3.6)$$

Для поиска пути увеличения коэффициента массопередачи можно использовать многочисленные эмпирические зависимости определения  $K$  в колонной аппаратуре различного типа и получить более полное выражение для  $i$ .

При определении интенсивности газожидкостного реактора будем рассуждать следующим образом. Если в газожидкостном барботажном реакторе протекает реакция между веществом  $A$ , находящемся в жидкой фазе, и веществом  $B$ , переходящем из газа в жидкость, то для реакции вида



скорость переноса вещества  $B$  из газа в жидкость

$$W_{B_1} = \frac{dG_B}{dt} = K_{\text{ж}} aV / (C_B^{\text{ж}} - C_B), \quad (3.8)$$

где  $m_A$ ,  $m_D$  – число молей веществ  $A$  и  $D$ ;  $K_{\text{ж}}$  – коэффициент массопередачи в жидкой фазе;  $a$  – удельная поверхность контакта фаз;  $V$  – объем ступени реактора;  $C_B^{\text{ж}}$  – равновесная концентрация веществ  $B$  на границе раздела фаз;  $C_B$  – концентрация вещества  $B$  в жидкости.

Скорость связывания вещества  $B$  в жидкой фазе

$$W_{B_1} = -\frac{dG_B}{dt} - \frac{1}{m} r_B V (1 - \varphi_r) = \frac{1}{m} K_4 C_A^{\text{ж}} C_B^V (1 - \varphi_r), \quad (3.9)$$

где  $r_B$  – скорость реакции;  $\varphi_r$  – среднее газонаполнение в ступени реактора;  $K_4$  – константа скорости реакции.

При условии, что  $W_{B_1} \gg W_{B_2}$ , для  $n$ -ступенчатого реактора можно записать

$$i = \sum_{j=1}^n W_{B_j} / V_p,$$

где  $V_p$  – объем реактора.

После подстановки значения  $V_p = nV$  для ступеней одинакового объема  $V$  и использования выражения (3.9) получим

$$i = \frac{K_4 \sum_{j=1}^n c_{A_j}^m c_{B_j} (1 - \varphi_{r_j})}{n m}, \quad (3.10)$$

или

$$i \uparrow = K \uparrow, c_A \uparrow, c_B \uparrow, \varphi_r \downarrow, n \downarrow, m \downarrow. \quad (3.11)$$

При  $W_{B_1} \ll W_{B_2}$ , т.е. когда реакционный процесс лимитируется подводом к зоне реакции компонента  $B$ , получается выражение, аналогичное выражению (3.8).

Декомпозиционные методы можно разделить на две, тесно связанные между собой, группы: режимно-технологические и аппаратно-конструктивные. Режимно-технологические методы, которые представляют собой набор приемов интенсификации [9], приведены в табл. 3.2.

Классификация аппаратно-конструктивных методов интенсификации приведена в табл. 3.3.

Одним из наиболее эффективных режимно-технологических методов интенсификации газожидкостных реакционных и совмещенных процессов является использование обратной технологической связи путем рециркуляции непрореагировавшего сырья.

Рециркуляция может быть использована не только для интенсификации реакторов или совмещенных аппаратов, но и для интенсификации массообменных аппаратов.

### 3.2. Режимно-технологические методы интенсификации

Используемый физический эффект	Приемы использования метода в процессах и аппаратах
Нестационарности, пульсационный, кавитационный, кумулятивного воздействия, термодecomпрессии, электрогидравлический Юткина, Джоуля–Томпсона, Ранка, ударных волн	Циклическая подача фаз. Создание колебаний рабочей зоны внешними устройствами. Создание автоколебаний потоков контактирующих фаз. Импульсное изменение температуры, концентрации, давления
Электрические явления при фазовых превращениях, Марангони, Рэлея, Соре, Дюфура, термодиффузии, диффузиофорез	Совмещение процессов: химических, массообменных, теплообменных, тепло- и массообменных
Гетерогенизация, адсорбция, трибоэффект, кавитация, эффект ударных волн, диффузиофорез	Дополнительное вещество: катализатор, стабилизатор, инициатор. Поверхностьобразующий твердый агент, промежуточный теплоноситель. Паровая фаза одного из компонентов. Рециркулянт. Агент: разделяющий, десорбирующий, высаливающий
Оптимизация режимно-технологических параметров	Температура, давление, степень превращения, состав, гидродинамические параметры

### 3.3. Аппаратурно-конструктивные методы интенсификации

Метод интенсификации	Используемый физический эффект	Приемы использования метода в процессах и аппаратах	Метод интенсификации
Обеспечение многократности воздействия на фазы	Концевой, входной, капиллярный, инверсии фаз	Секционирование. Чередование зон контакта-сепарации. Пропускание через капиллярно-пористое тело	Импульсная обработка контактирующих фаз
Конструктивная оптимизация гидродинамического режима	Инверсия фаз, Крауссольда, Рейнольдса, турбулизация и срыв пограничного слоя	Ударно-струйное взаимодействие фаз. Соударение потоков. Пленочное движение с турбулизацией. Множественная инверсия фаз. Ячеисто-пенный режим взаимодействия	

Продолжение табл. 3.3

Метод интенсификации	Используемый физический эффект	Приемы использования метода в процессах и аппаратах	Метод интенсификации
Использование энергии контактирующих фаз	Жуковского, Бернулли	Турбулизация. Закручивание. Взаимное эжектирование. Осциллирование. Автоколебательные режимы	Совмещение технологических процессов
Использование внешних источников энергии	Двойной электрический слой, электрофорез, термофорез, кавитация	Поля: магнитное, электрическое. Перемешивающие устройства. Пульсаторы	Введение дополнительного вещества в рабочую зону
Оптимизация конструктивных параметров		Форма. Соотношение размеров. Материал. Распределение фаз	
Совмещение аппаратов	Энерджентность, инерэктность	Однотипное комбинирование. Агрегатирование. Блочно-модульный подход. Трансформирование структуры. Совмещение функций аппаратов и их частей	Оптимизация режимно-технологических параметров

В последние годы все большее внимание исследователей привлекает возможность значительного повышения эффективности массообменных аппаратов и реакторов вследствие увеличения движущей силы при циклической подаче контактирующих фаз или одной из них. Циклические режимы (пульсации) могут создаваться как с помощью внешних генераторов пульсаций различных конструкций (механических, клапанных, гидравлических, пневматических и т.п.), так и спонтанно за счет конструктивных особенностей контактных устройств (клапанные контактные устройства, «провальные» тарелки, плоскопараллельная насадка с турбулизирующими вставками). Например, в ректификационных установках можно использовать новый способ циклической ректификации. Способ заключается в том, что периодически изменяют состав, количество и температуру паров, поступающих в колонну из куба, за счет наложения на паровой поток термопульсаций. Исследования на системе этиловый спирт-вода свидетельствуют, что наложение термопульсаций способствует увеличению коэффициентов массопередачи на 40...50%.

Еще одним эффективным методом интенсификации является введение дополнительного вещества. Рассмотрим использование диффузиофореза при очистке германийсодержащих газовых смесей.

Германий в этих газовых системах находится в аэрозоле (двуокись и пары тетрахлорида). Известно, что концентрация паров влаги очищаемого газа при определенных условиях может оказывать существенное влияние на эффективность осаждения частиц аэрозоля. Повышение эффективности осуществляется за счет захвата частиц аэрозоля под действием гидродинамического течения, направленного к поверхности образовавшейся капли или к поверхности конденсации; за счет укрупнения и утяжеления частиц при конденсации на них пара (вокруг частицы образуется микропенка из сконденсировавшейся влаги), а также вследствие создания благоприятных условий для захвата частицы поглотителем.

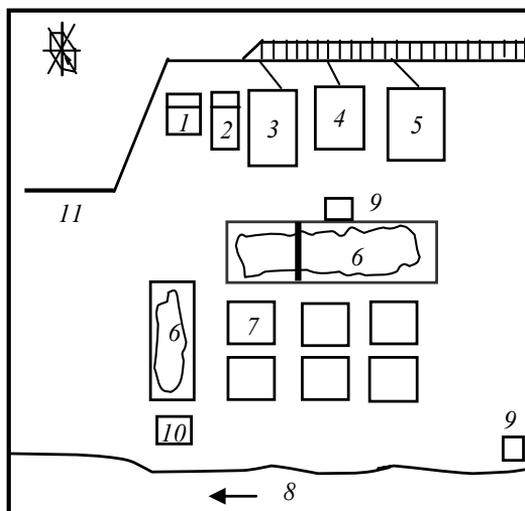
Положительные результаты использования эффекта диффузиофореза для интенсификации процесса отделения частиц аэрозоля двуокиси германия от анализируемой газовой смеси позволили найти оптимальные условия проведения процесса, при которых обеспечивается наиболее полное осаждение частиц.

Оптимизация как метод интенсификации в равной степени относится к режимно-технологическим и аппаратурно-конструктивным методам. Однако, если оптимизация температуры, давления и конверсии является задачей технологии и в той или иной мере решается применительно к конкретным процессам, то задачи оптимизации контактного устройства, контактной ступени, всего аппарата (в плане обеспечения оптимальной схемы движения контактирующих фаз и их распределения по сечению оптимальной формы) ставятся и решаются значительно реже. Между тем даже немногочисленные работы, посвященные вопросам аппаратурно-конструктивной оптимизации, свидетельствуют о ее чрезвычайно высокой результативности.

### 3.1.2. РАЗРАБОТКА СИТУАЦИОННОГО И ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНОВ

Ситуационный и генеральный план – одна из важнейших частей проекта химического предприятия, содержащая комплексное решение вопросов планировки и благоустройства территории, размещения зданий и сооружений, инженерных сетей, организации систем хозяйственного и бытового обслуживания. Ситуационным планом химического предприятия называют часть проекта, включающую в себя план определенного района населенного пункта или окружающей территории, на котором указывают расположение запроектированного предприятия и другие объекты, имеющие с ним непосредственные технологические, транспортные и инженерно-технические связи [10].

При разработке ситуационного плана стремятся территориально объединить предприятия в один промышленный узел. Ситуационный план разрабатывается в масштабе 1:5000, 1:10000, 1:25000. Промышленный узел, объединяющий химический и текстильный комбинаты, ТЭЦ, показан на рис. 3.1.



**Рис. 3.1. Ситуационный план:**

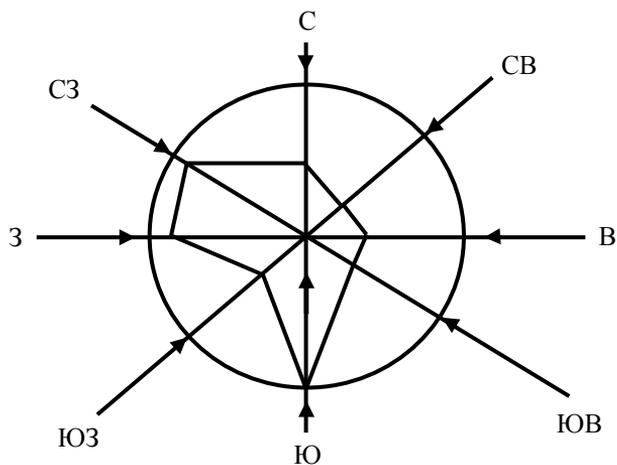
- 1 – пассажирский железнодорожный вокзал; 2 – товарная железнодорожная станция;  
 3 – химический комбинат; 4 – ТЭЦ; 5 – текстильный комбинат;  
 6 – санитарно-защитная зона; 7 – жилые кварталы; 8 – река;  
 9 – водозаборный узел; 10 – очистные сооружения; 11 – железная дорога

Предприятия на плане связаны одной системой энергоснабжения, водоснабжения, транспортными коммуникациями. Кроме того, химкомбинат является поставщиком красителей для текстильного комбината. Такое кооперирование позволяет разработать общую схему водоснабжения и канализации, кратчайшие транспортные связи предприятий с жилыми массивами и железной дорогой. В ситуационный план включают общие водозаборные сооружения, санитарно-защитные зоны, отмечают точки выбросов газов и т.д.

Для уменьшения загазованности жилого массива выбросами промышленных предприятий их располагают с учетом преобладающего направления ветров, которое определяют по средней розе ветров летнего периода на основе многолетних наблюдений (50 – 100 лет) метеорологических станций [10]. Розу ветров располагают на ситуационных и генеральных планах в верхнем левом углу чертежа и строят в соответствующем масштабе следующим образом (рис. 3.2): окружность делят на 8 или 16 равных частей и в результате получают 8 или 16 румбов: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ. От центра окружности (начало координат) откладывают в выбранном масштабе процентную повторяемость ветров в течение года (результат многолетних наблюдений) по соответствующим румбам. Полученные точки соединяют.

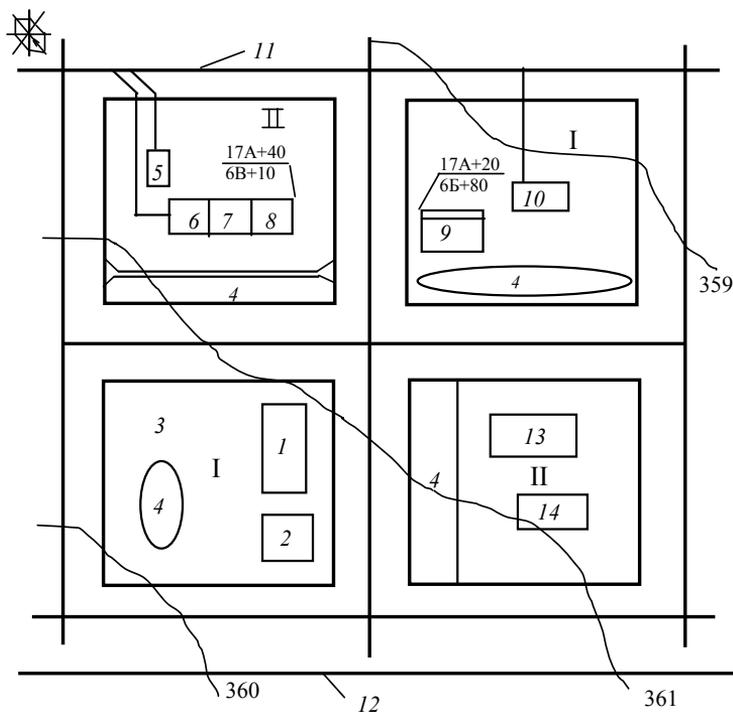
Наиболее вытянутая сторона полученной фигуры показывает направление господствующих ветров.

Промышленные здания рекомендуется располагать продольной осью по направлению господствующего ветра или под углом  $45^\circ$  к нему.



**Рис. 3.2. Роза повторяемости ветров**

С использованием ситуационного плана разрабатывают генеральный план проектируемого предприятия в масштабе 1:500, 1:1000, 1:200 или 1:5000 (рис. 3.3).



**Рис. 3.3. Схема генерального плана предприятия**

1 – заводоуправление; 2 – столовая; 3 – стоянка автотранспорта;  
4 – санитарно-защитная зона; 5 – депо; 6, 7, 8 – блоки производственных цехов;  
9, 10 – склады; 11 – железная дорога; 12 – автодорога; 13 – ТЭЦ; 14 – АТС

На генеральном плане промышленного предприятия изображают:

- размещение всех зданий и сооружений;
- расположение цехов по группам;
- ширину противопожарных и санитарных разрывов между зданиями;
- проезды и въезды в цехи, автодороги и железнодорожные пути;
- инженерные сети;
- ограждение территории с указанием въезда и проходных на территорию завода;

- размещение пожарных гидрантов, зоны озеленения, розу ветров.

Промышленную зону с производствами повышенной пожаро- и взрывоопасности необходимо располагать с подветренной стороны по отношению к другим зданиям и сооружениям.

Энергетические объекты размещают ближе к основным потребителям. Они должны иметь по возможности наименьшую протяженность тепло-, газопаропроводов и линий электропередач.

Склады располагают около внешних границ территории предприятия с целью эффективного использования подъездных путей и железнодорожного транспорта. Расстояние от путей до зданий определяют по нормативным документам.

При разработке генерального плана следует учитывать перспективу расширения предприятия и резервировать участки, прилагая необходимые технико-экономические обоснования.

Между местами вредных газовых выбросов в атмосферу и жилыми или общественными зданиями необходимо предусматривать санитарно-защитную зону. Ширина зоны принимается по нормативным документам в зависимости от класса вредности газовых выбросов. Санитарно-защитную зону благоустраивают и озеленяют.

На генеральном плане показывают размещение подземных, надземных и наземных коммуникаций (водопровод, канализация, линии энергоснабжения и связи, газопровод, теплопровод и т.д.). Коммуникационные сети проектируют в виде прямолинейных участков вдоль магистральных проездов параллельно линиям застройки. Нельзя прокладывать газопроводы и трубопроводы легковоспламеняющихся и горючих веществ под зданиями, автомобильными и железными дорогами.

При разработке плана производственной зоны предварительно намечают расположение отдельных цехов, соблюдая при этом непрерывность и последовательность размещения в направлении общего технологического потока проектируемого производства. Наиболее рациональное решение плана получают при прямоугольных очертаниях зданий и застройки. Застройка может быть блокированной, когда отдельные цехи размещаются в одном здании.

При рассредоточенной системе застройки отведенной территории между зданиями и сооружениями необходимо оставлять минимальные противопожарные и санитарные разрывы:

- 1) не менее 15 м – для предприятий, выделяющих вредные вещества;
- 2) не менее 20 м – для азотных заводов.

Схема генерального плана завода полупродуктов и красителей представлена на рис. 3.3.

На генплане указываются высотные отметки местности (360, 361, 359). Все сооружения завода «привязывают» к координатной сетке с указанием расстояний от условной нулевой параллели и условного меридиана. По этой привязке можно определить расстояние между цехами.

В качестве примера показана привязка цеха 8 и склада 9 к координатным осям. Число с буквой А в числителе показывает расстояние в км от условной нулевой параллели, а со знаком «+» дополнительные метры. В знаменателе число с буквой Б показывает расстояние от нулевого меридиана. Таким образом, расстояние между точками по широте (снизу вверх)  $17 \text{ км } 40 \text{ м} - 17 \text{ км } 20 \text{ м} = 20 \text{ м}$ , а по долготе (слева направо)  $6 \text{ км } 80 \text{ м} - 6 \text{ км } 10 \text{ м} = 70 \text{ м}$ .

На этом же рисунке показано зонирование строительной площадки. В производственной и складской зонах предусмотрены участки под расширение предприятия. Следует отметить, что на рисунке условно не показаны тротуары, транспортные коммуникации, инженерно-технические сети и ограждение объекта.

Предприятия, выделяющие производственные вредности (газ, дым, копоть, пыль, неприятные запахи и др.), запрещается располагать по отношению к жилую району с наветренной стороны. Не разрешается размещать в плохо проветриваемых долинах или котловинах предприятия, которые выделяют в атмосферу вредные вещества ( $\text{SO}_2$ , Cl, HCl, HF и др.), а также ТЭЦ.

Все места для сбора и хранения отходов производства (содержащие возбудители заболеваний, сильно действующие химические или радиоактивные вещества, которые не были подвергнуты предварительной нейтрализации, обезвреживанию и дезактивации) должны иметь специальные устройства, исключающие загрязнения почвы, подземных вод, атмосферного воздуха и быть строго изолированы от доступа людей.

### 3.1.3. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА, РАСЧЕТА И ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

После составления эскизной технологической схемы рассчитывают материальные и тепловые балансы для всех стадий химического производства, для каждой стадии тип технологического оборудования, производят его расчет и подбор по каталогам.

Рассмотрим в начале принципы выбора типа технологического аппарата на примере оформления энергоемкой стадии сушки. От этой стадии технологической схемы во многом зависит как качество готового продукта, так и технико-экономические показатели производства в целом.

Тип сушилки зависит от выбранного способа сушки, который в свою очередь определяется свойствами материала подвергаемого обезвоживанию.

Без связи с конкретным материалом не могут подобраны рациональный способ сушки и конструкция сушильного аппарата. Список свойств материала как объекта сушки, необходимых для выбора способа сушки, наиболее полно представлены в [11, 12].

Выбор рационального метода сушки обусловлен не только комплексом характеристик материала, но и особенностями производства (малотоннажное, крупнотоннажное, периодического действия, непрерывного действия и т.п.), а также номенклатурой выпускаемого сушильного оборудования. Ограничивающими условиями при выборе метода сушки являются технологические, экономические и требования к качеству готового продукта [12].

Предварительно тип или несколько типов сушилок можно выбрать на основании патентного обзора или по таблицам. При этом надо иметь в виду следующие моменты:

- 1) при небольших объемах производств или при производстве большого ассортимента продуктов следует отдавать предпочтение сушильному оборудованию периодического действия;
- 2) жидкие и хорошо текучие материалы сушат на распылительных сушилках;
- 3) для пастообразных материалов могут быть рекомендованы сушилки с псевдооживленным слоем, вальцеленточные и вакуумгребковые сушилки;
- 4) материалы, не допускающие загрязнения пылью постороннего вещества, нельзя сушить в аппаратах с псевдооживленным слоем на инертном носителе, так как происходит его истирание;
- 5) для материалов с малым внутридиффузионным сопротивлением следует применять сушилки, обеспечивающие хорошее перемешивание материала и сушильного агента (сушилки псевдооживленного слоя и пневматические);
- 6) для удаления прочносвязанной влаги рекомендуют применять барабанные и ленточные сушилки, которые обеспечивают длительное время сушки;
- 7) при необходимости получать продукт в гранулированном виде из суспензий следует применять барабанные грануляторы-сушилки.

Окончательный выбор типа сушильного аппарата производят после испытаний по сушке материалов на лабораторных или полупромышленных установках в отраслевых научно-исследовательских институтах. В первую очередь это относится к крупнотоннажным производствам, которые требуют, как правило, индивидуальных разработок аппаратов с учетом всех особенностей производства [13].

Можно рекомендовать следующую последовательность выбора типа оборудования для каждой стадии технологической схемы:

- 1) проводится исследование (например, в отраслевых НИИ) или определение по справочной литературе физико-химических свойств перерабатываемого материала и готового продукта;
- 2) на основании установленных технико-экономических требований выбирается наиболее рациональный способ осуществления процесса на данной технологической стадии;

3) на основании литературно-патентного обзора предварительно выбирают один или несколько альтернативных типов аппаратов для осуществления процесса на данной технологической стадии;

4) окончательный выбор типа аппаратного оформления делается на основании технико-экономического анализа, а при необходимости (для крупнотоннажных производств) с учетом результатов исследований отраслевого НИИ.

Далее рассмотрим общие принципы анализа и расчета процессов и аппаратов химической технологии.

К одним из важнейших принципов науки о процессах и аппаратах химической технологии относятся теоретические и технологические обобщения и выявление физико-химических аналогий основных процессов.

При исследовании и расчете процессов и аппаратов важно знать кинетические закономерности основных процессов химической технологии.

Кинетика – это учение о механизмах и скоростях процессов, в том числе гидродинамических, тепло- и массообменных. Кинетика является научной основой создания новых и совершенствования действующих аппаратов химической технологии.

По общепринятой классификации, основанной на кинетических закономерностях процессов, различают [13, 14]:

*Гидромеханические процессы* (рис. 3.4), скорость которых определяется законами гидродинамики:

$$j_{\Gamma} = \frac{dV}{Fdt} = \frac{\Delta p}{R_1} = k_1 \Delta p, \quad (3.12)$$

где  $j_{\Gamma}$  – скорость процесса;  $V$  – объем протекающей жидкости;  $F$  – площадь сечения аппарата;  $t$  – время;  $k_1$  – коэффициент скорости процесса (величина, обратная гидравлическому сопротивлению  $R_1$ );  $\Delta p$  – перепад давления (движущая сила процесса).

*Теплообменные процессы* (рис. 3.5), скорость которых определяется законами теплопередачи:

$$j_{\Gamma} = \frac{dQ}{Fdt} = \frac{\Delta t}{R_2} = k_2 \Delta t, \quad (3.13)$$

где  $j_{\Gamma}$  – скорость процесса;  $Q$  – количество переданного тепла;  $F$  – поверхность теплообмена;  $t$  – время;  $k_2$  – коэффициент теплопередачи (величина, обратная термическому сопротивлению  $R_2$ );  $\Delta t$  – средняя разность температур между обменивающимися теплом материалами (движущая сила процесса).

*Массообменные (диффузионные) процессы* (рис. 3.6), скорость которых определяется скоростью перехода вещества из одной фазы в другую:

$$j_{\Gamma} = \frac{dM}{Fdt} = \frac{\Delta c}{R_3} = k_3 \Delta c, \quad (3.14)$$

где  $j_m$  – скорость процесса;  $M$  – количество вещества, перенесенного из одной фазы в другую;  $F$  – поверхность контакта фаз;  $\tau$  – время;  $k_3$  – коэффициент массопередачи (величина, обратная диффузионному сопротивлению  $R_3$ );  $\Delta c$  – разность между равновесной и рабочей концентрациями вещества в фазах (движущая сила процесса).

*Механические процессы* (рис. 3.7), скорость которых определяется законами физики твердого тела.

*Химические процессы*, связанные с превращением веществ и изменением их химических свойств. Скорость этих процессов определяется закономерностями химической кинетики:

$$j_x = \frac{dM}{V_p d\tau} = k_4 f(c), \quad (3.15)$$

где  $j_x$  – скорость процесса;  $M$  – количество прореагировавшего в химическом процессе вещества;  $V$  – объем реактора;  $\tau$  – время;  $k_4$  – коэффициент скорости химического процесса;  $f(c)$  – движущая сила процесса, которая является функцией концентраций реагирующих веществ.

*Биохимические процессы*, связанные с синтезом веществ и осуществляемые под воздействием и при непосредственном участии живых микроорганизмов и выделенных из них ферментов (биологических катализаторов). Скорость биохимических процессов, как и в предыдущем случае, определяется скоростью роста культуры от концентрации одного или нескольких наиболее важных компонентов среды, обеспечивающих основу *метаболизма*. Эти компоненты получили название *лимитирующих субстратов*.

Приведенная классификационная система основных процессов химической технологии удобна тем, что позволяет устанавливать единую номенклатуру типовой аппаратуры, используемой для этих процессов. Так, например, при классификации химических реакторов можно руководствоваться несколькими классификационными признаками:

- 1) способом организации процесса;
- 2) фазовым составом смеси;
- 3) гидродинамическими условиями проведения процесса в реакторе;
- 4) теплообменными условиями процесса в реакторе;
- 5) временными изменениями процесса;
- 6) конструктивными особенностями реактора;
- 7) агрегатным состоянием фазы и др.

По первому признаку (по способу подвода сырья и отвода продукта) различают периодические, полупериодические (полунепрерывные) непрерывно действующие химические аппараты-реакторы.

По второму признаку для проведения гетерогенных процессов выделяются системы газ – жидкость, жидкость – твердое и газ – твердое; для проведения гомогенных процессов – газо- и жидкофазные; отдельно рассматриваются реакторы для гетеро-каталитических процессов.

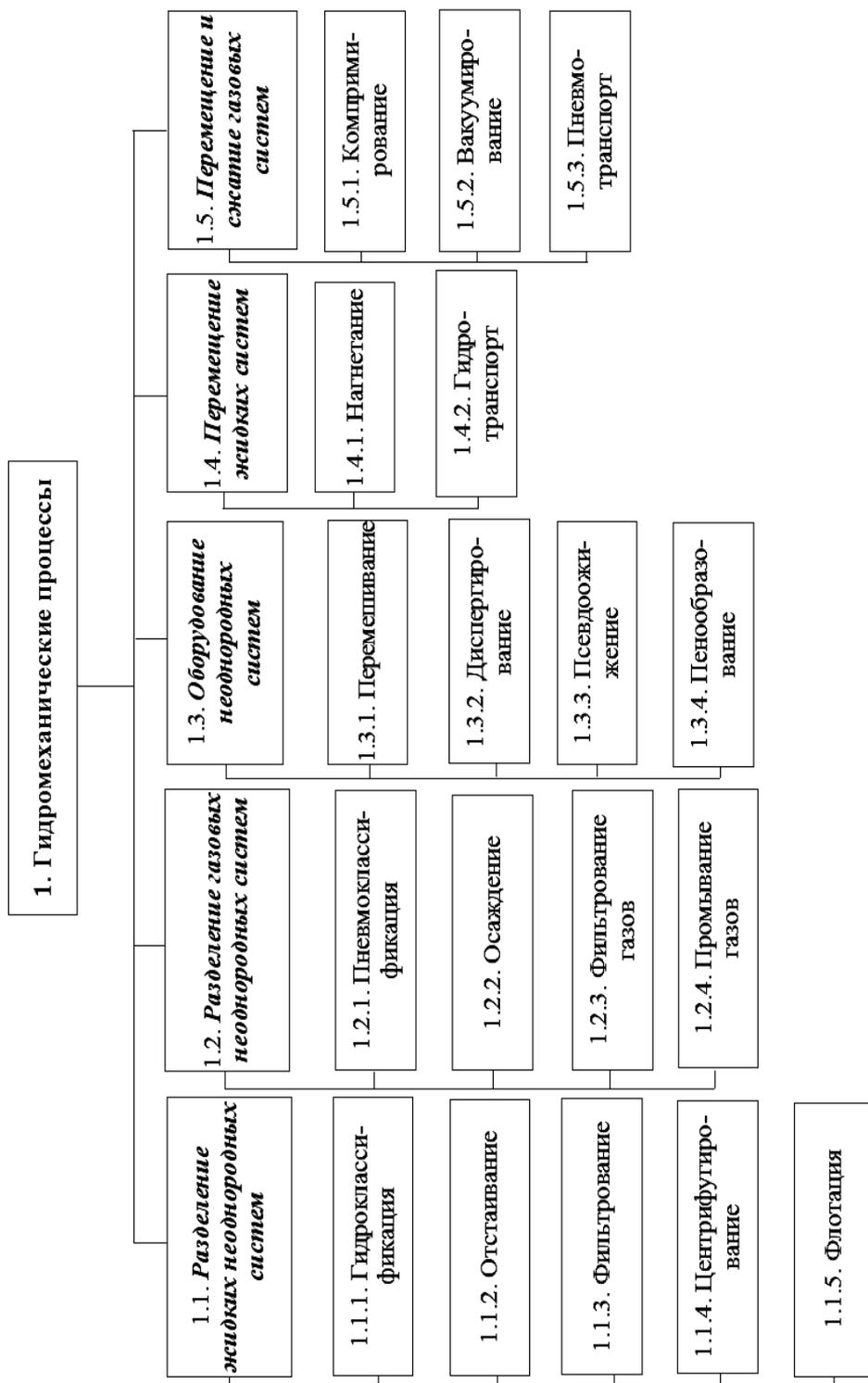


Рис. 3.4. Классификация гидромеханических процессов

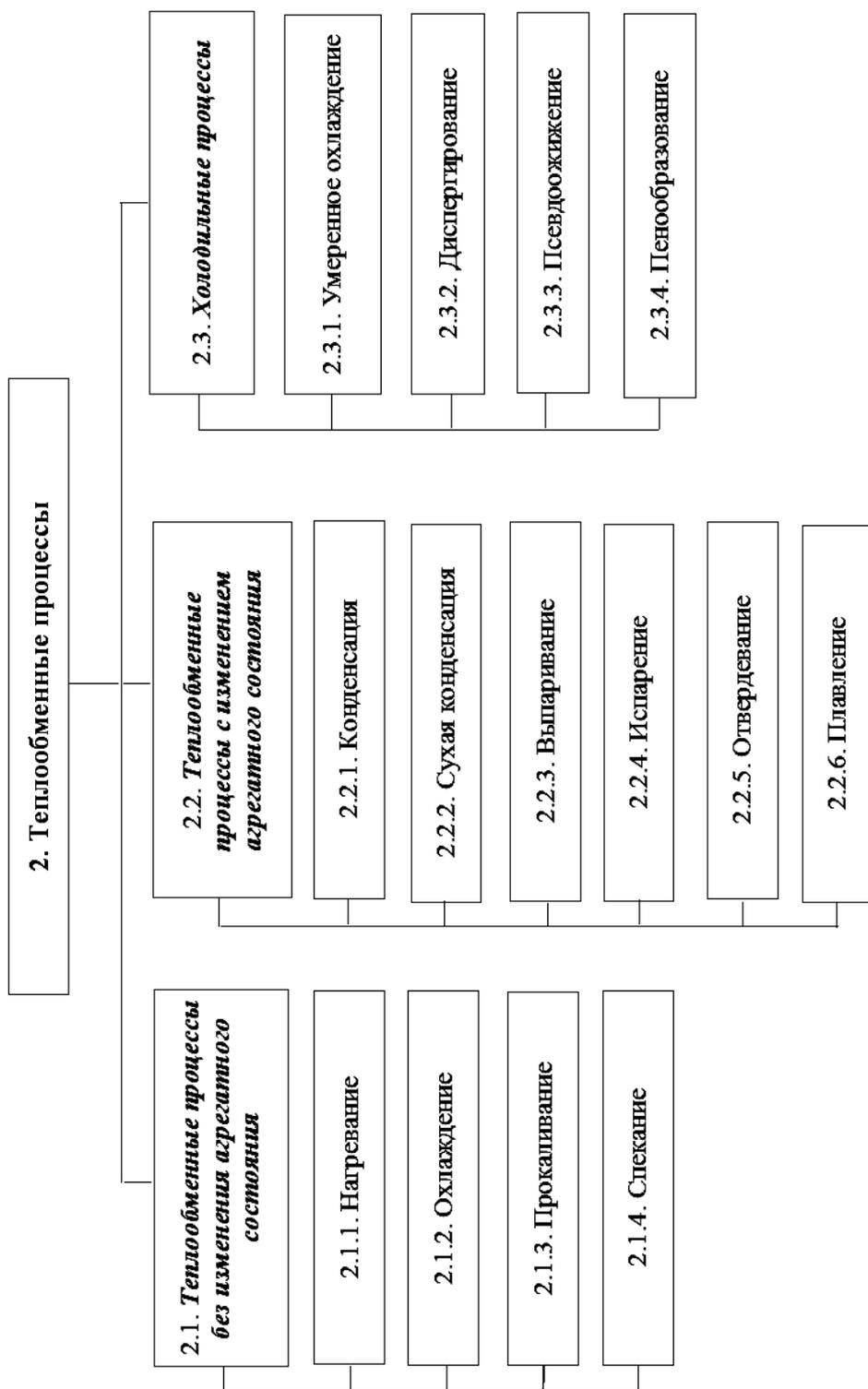


Рис. 3.5. Классификация теплообменных процессов

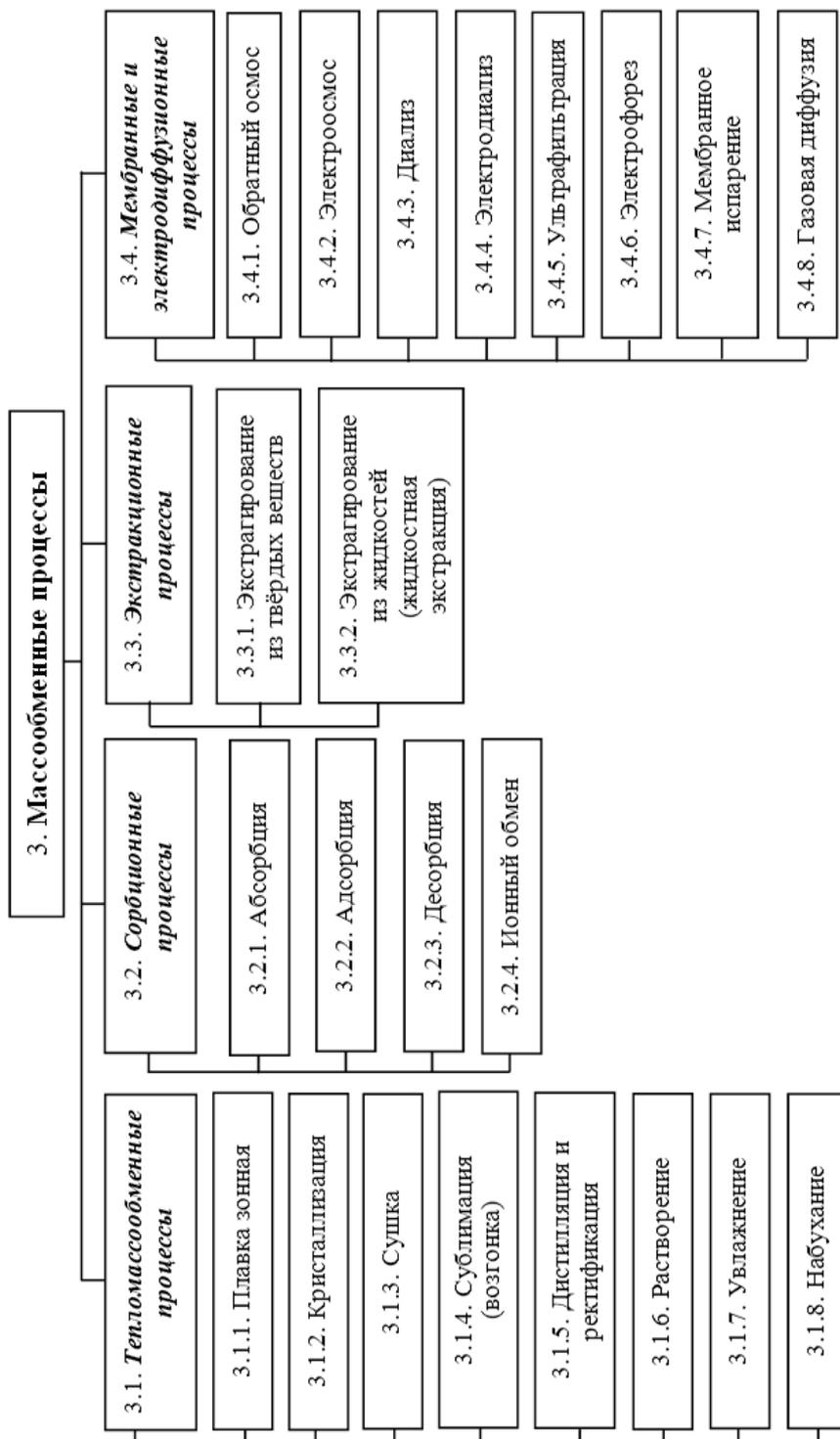


Рис. 3.6. Классификация массообменных процессов

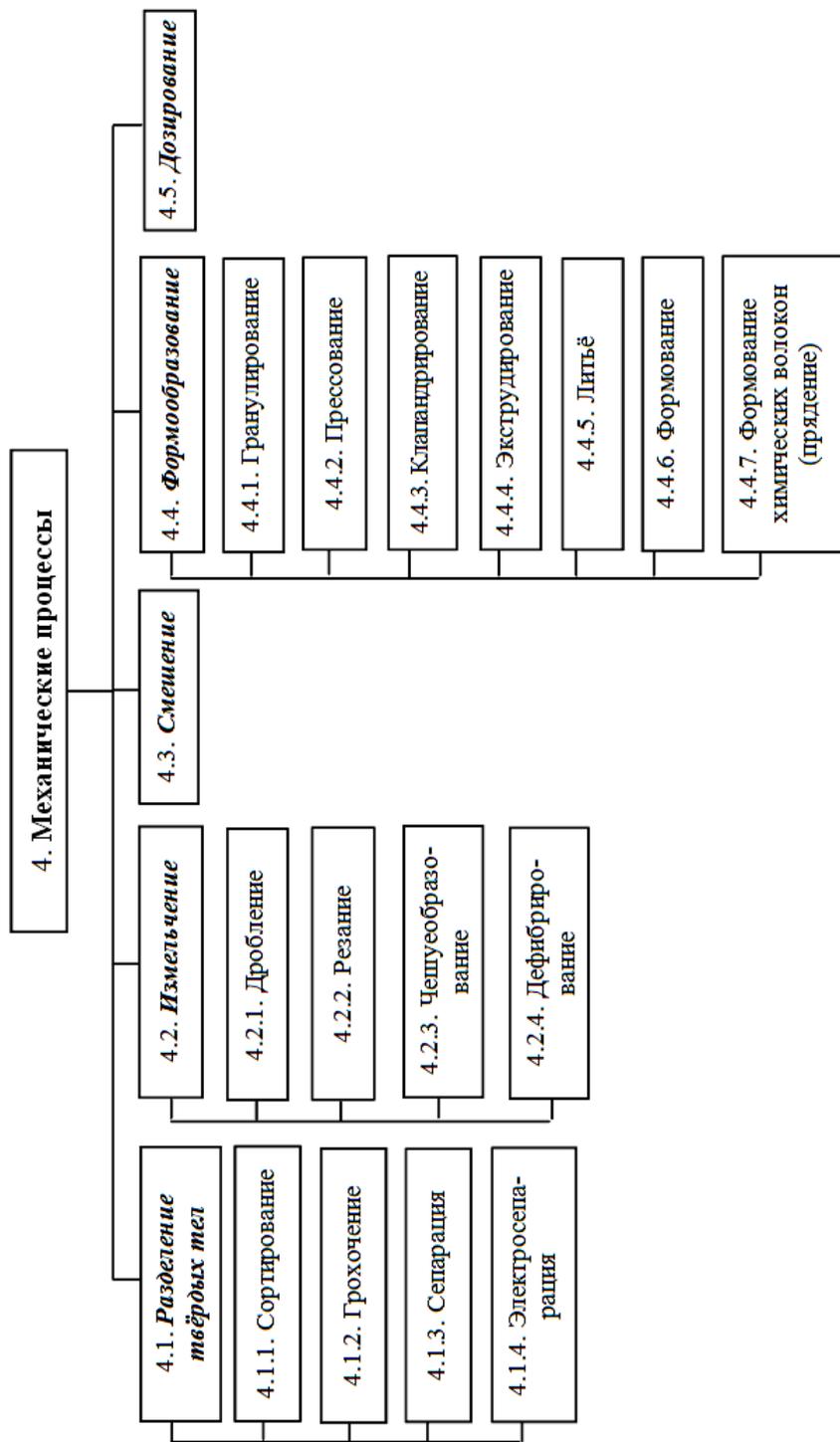


Рис. 3.7. Классификация механических процессов

По третьему признаку в основу классификации закладывается режим движения агентов в аппарате. В зависимости от гидродинамических условий аппараты для осуществления химических реакций разделяют на реакторы смешения (аппараты с мешалками), вытеснения (трубчатые) и промежуточного типа.

По четвертому признаку учитываются тепловые эффекты процессов и рассматриваются реакторы адиабатические (без теплообмена с окружающей средой), автотермические (необходимая для процесса температура поддерживается без внешних источников тепла), изотермические (постоянная температура в аппарате поддерживается за счет внешних источников теплоты) и с промежуточными тепловыми режимами.

По пятому признаку в реакторах могут быть реализованы стационарные (статические) и нестационарные (динамические) режимы работы.

По шестому признаку – конструктивному различают реакторы емкостные (аппараты с мешалкой, автоклавы, барботажные и пр.), колонные (с насадкой или тарелками); организация теплообмена (трубчатые, пленочные и пр.); со взвешенным, движущимся и неподвижным слоем катализатора; аппараты высокого давления и температуры, электролизеры и прочее.

Классификация химических аппаратов по седьмому признаку – агрегатному состоянию основной фазы в реакторе перекликается с классификацией по второму признаку: различают аппараты с газовой, жидкой и твердой фазой. Первые в свою очередь разделяют на контактные (с неподвижным и движущимся слоем катализатора) и высокотемпературные; вторые делят по конструктивным признакам на емкостные (вертикальные и горизонтальные), колонные (насадочные, тарельчатые и пустотелые) и змеевиковые; третьи – на камерные, барабанные, лопастные и с псевдооживленным слоем.

Анализ технологического процесса начинается с определения условий равновесия системы в соответствии с законами гидродинамики и термодинамики. Наибольшее число  $N$  переменных (параметров), которое можно изменять, не нарушая равновесия, определяют с помощью правила фаз Гиббса для различных систем:

$$N = K + 2 - \Phi ,$$

где  $\Phi$  – число фаз;  $K$  – число компонентов системы;  $N$  – число степеней свободы, т.е. число независимых переменных, значения которых можно произвольно изменять без изменения числа или вида (состава) фаз в системе.

Итак, для расчета аппарата, в соответствии с уравнениями, приведенными выше, необходимо знать материальные и тепловые потоки, движущую силу процесса, кинетические коэффициенты. Последовательность расчета такова:

1. На основании закона сохранения материи составляют материальный баланс процесса:

$$\sum M_{\text{н}} = \sum M_{\text{к}} ,$$

где  $\sum M_{\text{н}}$ ,  $\sum M_{\text{к}}$  – количество исходных и конечных веществ соответственно.

2. На основании закона сохранения энергии составляют тепловой баланс процесса:

$$\sum Q_{\text{н}} + \sum Q_p = \sum Q_{\text{к}} + \sum Q_{\text{пот}},$$

где  $\sum Q_{\text{н}}$ ,  $\sum Q_{\text{к}}$  – теплота, поступающая в аппарат с исходными материалами, и теплота, отводимая из аппарата с конечными продуктами, соответственно;  $\sum Q_p$  – тепловой эффект процесса;  $\sum Q_{\text{пот}}$  – потери теплоты в окружающую среду.

3. Используя законы термодинамики, определяют направление процесса и условия равновесия.

4. Исходя из условий равновесия и заданной технологии, выбирают начальные и конечные рабочие параметры процесса.

5. На основании равновесных и рабочих параметров определяют движущую силу процесса.

6. Используя законы химической, тепловой или диффузионной кинетики находят коэффициент скорости процесса.

7. Исходя из полученных выше данных, рассчитывают основной размер аппарата (емкость, площадь поперечного сечения, поверхность теплообмена, высоту), используя зависимости (3.12) – (3.15). Методики по расчету и конструированию оборудования даны в специальной литературе [13 – 16].

После определения основного размера выбирают стандартное оборудование или разрабатывают нестандартное оборудование. При выборе технологического оборудования проектировщику иногда приходится возвращаться на стадию выбора типа аппаратного оформления процессов, осуществляемых на различных стадиях химического производства.

Нахождение численных значений движущей силы и коэффициента скорости химико-технологического процесса является самой сложной частью методики расчета технологической аппаратуры. При этом необходимо обоснованно решать вопросы масштабного перехода – распространения данных, полученных в лабораторных исследованиях, на промышленные объекты.

При разработке новых химико-технологических процессов и аппаратов применяют физическое и математическое моделирование. К физическому моделированию прибегают, когда натурные испытания трудно осуществить вследствие очень больших или очень малых размеров технологического объекта. Физическое моделирование заключается в замене изучения какого-либо объекта опытным изучением его физической модели, отличающейся от оригинала масштабом. Оно сводится к воспроизведению постоянства определяющих критериев подобия в физической модели и объекте. Практически это означает, что надо в несколько этапов воспроизводить исследуемый технологический процесс, т.е. переходить от меньших масштабов его осуществления к большим (масштабный переход).

Принцип подобия оправдал себя при анализе детерминированных процессов, описываемых законами классической механики и протекающих в однофазных системах с фиксированными границами (обычно твердые стенки). Для анализа недетерминированных процессов с многозначной стохастической картиной связи между явлениями и, в частности, для анализа двухфазных систем и процессов, осложненных химическими реакциями, использование физического подобия затруднительно.

В этом случае для расчета и исследования технологических процессов и аппаратов применяется математическое моделирование.

Следует иметь в виду, что математическое моделирование ни в коей мере не противопоставляется физическому моделированию, а скорее призвано дополнить его имеющимся арсеналом математических методов. Методы физического моделирования в настоящее время приобретают новое качество: их можно использовать для нахождения границ деформации коэффициентов, входящих в уравнение математической модели, т.е. для масштабирования математически описанного процесса и установления адекватности модели изучаемому объекту.

При аппаратурном оформлении технологического процесса необходимо иметь количественную информацию об эффективности той или иной стадии. Эта информация, как правило, выражается в форме критерия эффективности, который используют для сравнительной оценки альтернативных вариантов аппаратурного оформления технологических стадий и для определения оптимальных конструктивных параметров оборудования и технологических режимов функционирования установки.

Чтобы критерий эффективности достаточно полно характеризовал качество функционирования технологического объекта (или отдельной технологической стадии), он должен учитывать основные особенности и свойства оборудования, технологические режимы его функционирования.

В качестве критериев эффективности используют как экономические критерии в виде различных технико-экономических показателей (средняя прибыль, приведенный доход, приведенные затраты и т.д.), так и технологические критерии (качественные показатели выпускаемой продукции, выход целевого продукта, термодинамический или эксергетический КПД установки, аппарата и т.д.).

При выборе технологического оборудования в зависимости от поставленных целей (задание на проектирование) необходимо умело использовать как экономические, так и технологические критерии эффективности. Задача расчета экономических критериев эффективности технологической установки зачастую требует реализации достаточно сложного алгоритма и переработки большого количества информации. Расчет технологических критериев эффективности значительно проще, поэтому правильно выбранные технологические критерии не должны противоречить экономическим критериям эффективности.

Практика оптимального выбора технологического оборудования показывает, что использование технологических критериев эффективности позволяет исклю-

читать на первом этапе из дальнейшего рассмотрения существенную часть альтернативных вариантов оборудования как весьма далеких от оптимальных. Так, например, при выборе типа аппаратурного оформления ступени контакта для массообменного аппарата при прочих равных условиях всегда отдают предпочтение типу ступени контакта с большим коэффициентом массопередачи, который в этом случае представляет собой технологический критерий эффективности элемента аппарата.

Значение критериев эффективности зависит не только от типа выбираемого оборудования, его конструктивных параметров и режимов функционирования, но и от характеристических свойств технологической установки (аппарата), к которым можно отнести: чувствительность, надежность, управляемость и сложность. Существуют методы расчета количественных оценок чувствительности, надежности и управляемости технологического оборудования [17].

*Чувствительность* технологического объекта (аппарата) – это свойство объекта изменять характеристики своего функционирования под влиянием малых изменений режимных и конструктивных параметров, а также внешних возмущающих воздействий. При проектировании необходимо выбирать технологическое оборудование, малочувствительное к изменению собственных параметров и внешних возмущающих воздействий.

*Надежность* технологического объекта (аппарата) – это свойство объекта сохранять качество своего функционирования при определенных условиях эксплуатации. Понятие надежности тесно связано со способностью технологического объекта (аппарата) в течение определенного интервала времени сохранять работоспособность (безотказность); приспосабливаться к обнаружению и устранению причин, вызывающих отказы (ремонтпригодность) со способностью объекта (аппарата) к длительной эксплуатации (долговечность). Расчет показателей надежности (наработка на отказ, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы за определенное время и др.) технологического оборудования дает возможность осуществить выбор и разработать мероприятия по обеспечению требуемой надежности технологического оборудования.

*Управляемость* технологического объекта (аппарата) – это свойство объекта достигать определенных техническим заданием целей (заданного состава продуктов, заданной производительности, требуемого качества продуктов и т.д.) при ограниченных ресурсах управления в реальных условиях эксплуатации. При проектировании технологического объекта возникает задача совместного выбора технологического оборудования и соответствующей системы управления режимами функционирования объекта.

Мощность производства представляет годовую производительность, которую должно обеспечить оборудование в условиях нормальной эксплуатации и выражается в единицах массы готового технического продукта или в пересчете на 100%-ное вещество. С учетом затрат времени на капитальный ремонт продолжительность работы оборудования принимают равной 330 суток в течение года.

С учетом остановок на планово-предупредительные ремонты для непрерывных процессов продолжительность работы оборудования уменьшается до 300 суток.

Для периодических процессов вводят запас производительности оборудования, компенсирующий вынужденные простои из-за периодического режима работы оборудования. Таким образом, общий запас мощности оборудования может достигать 25...30%. Этот коэффициент автоматически распространяется на установленную мощность электрооборудования, насосных станций, очистных сооружений, теплоэлектроцентралей и т.д. [1].

Определение резервов, принимаемых для производства в целом, относится к компетенции экономистов. Резервы, принимаемые для отдельных аппаратов и машин, определяют технологи.

В результате выбора типа и расчета оборудования определяют либо его габариты, либо число единиц стандартных аппаратов, обеспечивающих заданную производительность.

По степени унификации технологическое оборудование делится на стандартное и нестандартное. Стандартное техническое оборудование выпускается предприятиями химического машиностроения, причем, обычно в виде ряда типоразмеров. Ряды типоразмеров такого оборудования определяются стандартами и содержатся в каталогах.

### 3.1.4. РАСЧЕТ НЕСТАНДАРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Наряду со стандартным оборудованием для осуществления заданного технологического процесса проектировщику приходится разрабатывать нестандартные машины и аппараты [15, 16].

Нестандартное оборудование ориентировано на конкретный технологический процесс и проектируется на заданную производительность. Современный уровень химического производства требует использования высокоэффективных технологических процессов, аппаратов и систем, сокращения числа технологических стадий производства для уменьшения потерь промежуточных продуктов, быстрой переналадки технологического оборудования и, следовательно, разработки новой химической техники, которая позволила бы с наибольшей эффективностью осуществлять нетрадиционные высокоинтенсивные процессы, а также совмещение различных процессов.

Для уменьшения количества технологических стадий используют многофункциональные аппараты, в которых осуществляется совмещение различных технологических процессов. При этом сокращается число транспортных операций, а также уменьшаются связанные с ними потери промежуточных продуктов. Использование многофункциональных аппаратов в некоторых случаях позволяет снизить материалоемкость конструкции, энергетические затраты, упростить аппаратное оформление технологических стадий и его обслуживание.

Расчет нестандартного оборудования производится аналогично расчету стандартного оборудования. После выбора типа оборудования и определения его размеров технологи с участием специалистов других профилей (механиков, теплотехников, электриков и др.) составляют задание на разработку чертежей нестандартного оборудования.

Техническое задание обычно содержит эскиз разработанного оборудования с указанием его технологического назначения и краткое описание принципа работы. Кроме того, в техническом задании приводятся основные параметры технологического процесса, физико-химические характеристики сырья и перерабатываемых продуктов с перечислением важнейших свойств этих веществ (агрегатное состояние, плотность, вязкость, летучесть, токсичность, огне- и взрывоопасность и т.п.), способ загрузки исходных веществ и выгрузки реакционной массы. К числу технологических данных относятся также способы теплообмена, конструкция, тип и размер теплообменной поверхности, параметры теплоносителя (хладагента), тип и конструкция перемешивающих устройств, характеристика привода с указанием мощности и типа устанавливаемого двигателя.

Технологу следует также оценить степень огне- и взрывоопасность помещения, где будет установлен аппарат, способ монтажа технологического аппарата. С возможно большей тщательностью следует охарактеризовать химическую агрессивность перерабатываемых веществ и дать рекомендацию по выбору материала для изготовления корпуса аппарата и его деталей. Первоочередной задачей разработчика нестандартного оборудования является обоснованный выбор конструкционного материала.

### **Основные требования к конструкционным материалам**

Специфические условия работы химического оборудования, характеризующиеся диапазоном давления от глубокого разряжения (вакуума) до избыточного (250 МПа и выше), большим интервалом рабочих температур ( $-254...+1000$  °С и выше) при агрессивном воздействии среды, предъявляют высокие требования к выбору конструкционных материалов проектируемого аппаратурно-технологического оформления химических производств [15, 16].

Наряду с обычными требованиями высокой коррозионной стойкости в определенных агрессивных средах к конструкционным материалам, применяемым в химическом машиностроении, одновременно предъявляются также требования высокой механической прочности, жаростойкости и жаропрочности, сохранения удовлетворительных пластических свойств при высоких и низких температурах, устойчивости при знакопеременных или повторных однозначных нагрузках (цилиндрической прочности), малой склонности к старению и др.

Для изготовления технологической аппаратуры химических и нефтехимических производств используют конструкционные материалы, стойкие и весьма

стойкие в агрессивных средах. Материалы пониженной стойкости применяют в исключительных случаях.

При выборе материалов для оборудования, работающих под давлением при низких и высоких температурах, необходимо учитывать, что механические свойства материалов существенно изменяются в зависимости от температуры.

При статическом приложении нагрузки важными характеристиками для оценки прочности материала являются предел текучести  $\sigma_T$  (условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  или  $\sigma_{1,0}$ ) и временное сопротивление  $\sigma_B$ . Упругие свойства металлов характеризуются значениями модуля упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Эти характеристики являются основными при расчетах на прочность деталей аппаратуры, работающей под давлением при низких ( $-40 \dots -254$  °С), средних ( $+200 \dots -40$  °С) и высоких (выше  $+200$  °С) температурах.

Для работы при низких температурах по нормам Ростехнадзора следует выбирать металлы, у которых порог хладоломкости меньше заданной рабочей температуры. Следует отметить, что в химической промышленности на протяжении многих лет безаварийно эксплуатируется при рабочих температурах до  $-40$  °С большое количество аппаратов, трубопроводов, арматуры, насосов и другого оборудования, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества и из серого или ковкого чугуна, т.е. из материалов, имеющих ударную вязкость  $KCU < 20$  Дж/см<sup>2</sup> при указанной температуре. Поэтому при выборе металла для работы при низких температурах следует исходить не только из его ударной вязкости, но и учитывать величину и характер приложенной нагрузки (статическая, динамическая, пульсирующая), наличие и характер концентраторов напряжений и чувствительность металла к надрезам, начальные напряжения в конструкции, способ охлаждения металла (хладагентом или окружающей средой).

При статическом приложении нагрузки в ряде случаев допускается изготовление оборудования из металлов, приобретающих хрупкость при пониженных рабочих температурах, но не имеющих дефектов, нарушающих однородность структуры и способствующих концентрации напряжений. Технология изготовления оборудования из таких материалов должна исключать возможность возникновения высоких начальных напряжений в конструкции. К такому оборудованию можно отнести свободно опирающиеся емкости для жидких и газообразных продуктов, содержащихся в них под небольшим избыточным давлением, металлоконструкции неотчетливого назначения и др.

При динамических нагрузках, кроме указанных выше характеристик, необходимо учитывать также ударную вязкость. Для многих углеродистых и легированных сталей ударная вязкость при низких температурах (обычно ниже  $-10$  °С) резко уменьшается, что исключает применение этих материалов в таких рабочих условиях. Ударная вязкость для большинства цветных металлов и сплавов (меди, алюминия, никеля и их сплавов), а также хромоникелевых сталей

аустенитного класса при низких температурах, как правило, уменьшается незначительно и пластические свойства этих материалов сохраняются на достаточно высоком уровне, что позволяет применять их при рабочих температурах до  $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для оборудования, подверженного ударным или пульсирующим нагрузкам и предназначенного для работы при низких температурах, следует применять металлы и сплавы с ударной вязкостью  $KCU > 30\text{ Дж/см}^2$ . Для деталей, имеющих концентраторы напряжений (болтов, шпилек), рекомендуются материалы, у которых при рабочей температуре ударная вязкость  $KCU > 40\text{ Дж/см}^2$ .

При высокой температуре наблюдается значительное снижение основных показателей, характеризующих прочностные свойства металлов и сплавов. Временное сопротивление  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_t$  зависят от времени пребывания под нагрузкой и скорости нагружения, так как с повышением температуры металл из упругого состояния переходит в упругопластическое и под действием нагрузки непрерывно деформируется (явление ползучести). Температура, при которой начинается ползучесть, у разных металлов различная: для углеродистых сталей обыкновенного качества ползучесть наступает при температуре выше  $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для низколегированных – при температуре выше  $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для жаропрочных – при более высокой температуре.

С увеличением времени пребывания металла под нагрузкой характеристики прочности уменьшаются тем значительнее, чем выше температура эксплуатации оборудования. Поэтому при расчете на прочность аппаратов, работающих длительное время при высоких температурах, допускаемые напряжения определяют по отношению к условному пределу ползучести  $\sigma_{пл}$  или по пределу длительной прочности  $\sigma_{дл}$ . Для химической аппаратуры допускаемая скорость ползучести принимается  $< 10^{-7}\text{ мм/(м}\cdot\text{ч)}$  ( $10^{-5}\%$  в год), для крепежных деталей –  $< 10^{-9}\text{ мм/(м}\cdot\text{ч)}$  ( $10^{-7}\%$  в год).

Снижение механических характеристик материала при высоких температурах обусловлено происходящими в металле структурными и фазовыми превращениями. К структурным изменениям такого рода можно отнести графитизацию углеродистой и молибденовой сталей, образование ферритной фазы в хромоникелевых сталях при длительной работе металла в условиях высоких температур. В ряде случаев стабильность структуры стали при длительной эксплуатации оборудования удастся обеспечить путем термической обработки. В большинстве случаев для аппаратуры, предназначенной для работы при высоких температурах, применяют жаропрочные стали специальных марок, характеризующиеся достаточной механической прочностью и стабильностью структуры. Наряду с жаропрочностью металлы должны обладать жаростойкостью. При непрерывном процессе окалинообразования рабочее сечение металла уменьшается, что приводит к повышению рабочего напряжения и ухудшению условий безопасной эксплуатации оборудования.

Некоторые детали аппаратуры (болты, шпильки, пружины и др.) вследствие повышения пластичности металла при высоких температурах работают в условиях постепенного снижения напряжений, вызванных первоначально приложенной нагрузкой (затягом), при сохранении геометрических размеров (релаксация напряжений). Расчет таких деталей следует производить на предварительную нагрузку (затяг), обеспечивающую на заданный период времени остаточную нагрузку, необходимую для нормальной работы конструкции.

При выборе конструкционных материалов для химического оборудования необходимо также учитывать теплофизические свойства материалов (теплопроводность, линейное температурное расширение), технологию изготовления аппаратуры, дефицитность и стоимость материалов, наличие стандартов или технических условий на его поставку, освоенность материала промышленностью и др. Так как стоимость изделия в значительной мере определяется стоимостью примененных для его изготовления материалов, при всех прочих равных условиях предпочтение следует отдавать более дешевым и менее дефицитным материалам.

В химическом машино- и аппаратостроении основным способом выполнения металлических неразъемных соединений является сварка, а в ряде случаев – пайка. Хорошая свариваемость металлов является одним из основных необходимых условий, определяющих пригодность материала для создаваемой конструкции. Следует стремиться к максимально возможному, без ущерба для конструкции, сокращению номенклатуры применяемых марок материалов и типоразмеров.

Химическую аппаратуру не рекомендуется изготавливать целиком из дорогостоящих и дефицитных материалов. Коррозии обычно подвержена лишь внутренняя поверхность аппаратов. Для обеспечения амортизационного срока службы аппарата достаточен слой коррозионно-стойкого металла толщиной в несколько миллиметров. Таким образом, представляется целесообразным изготавливать аппаратуру для активных коррозионных сред из двухслойного проката, облицовочный слой которого может быть выполнен из требуемого коррозионно-стойкого металла или сплава. Например, вместо монолитной толстолистовой стали 12X18H10T или 10X17H13M2T целесообразно применять двухслойную листовую сталь 16ГС + 12X18H10T или СтЗсп+10X17H13M2T.

В настоящее время металлургической промышленностью освоен ряд новых марок высоколегированных сталей с малым содержанием никеля, которые рекомендуется применять в химическом машиностроении в качестве заменителей дефицитных хромоникелевых сталей или сталей с большим содержанием никеля. К таким сталям относятся 08X22H6T, 08X2Ш6M2T и др.

Для переработки высокоагрессивных сред целесообразно изготовление химической аппаратуры из неметаллических материалов: природных кислотоупоров, керамики, фарфора, стекла, углеграфитовых материалов, пластических масс

(фаолита, полиэтилена, винипласта и др.) или из углеродистой стали, покрытой кислотостойкими эмалями, резиной или пластмассами.

В последнее время в конструировании химической аппаратуры все большее применение находят композиционные материалы, которые по механической прочности превосходят даже качественные стали, а по коррозионной стойкости не уступают керамике, стеклу и эмалям.

Таким образом, при конструировании химической аппаратуры к конструкционным материалам должны предъявлять следующие требования:

1) достаточно умеренные химическая и коррозионная стойкости материала в агрессивной среде с заданными концентрацией, температурой и давлением, при которых осуществляется технологический процесс, а также стойкость против других возможных видов коррозионного разрушения (межкристаллитной, электрохимической сопряженных металлов в электролитах, под напряжением и др.);

2) достаточная механическая прочность при заданных значениях давления и температуры технологического процесса, с учетом специфических требований в ходе испытаний оборудования на прочность, герметичность и дополнительных нагрузок (ветровой, собственного веса и др.);

3) способность материала хорошо свариваться с обеспечением высоких механических свойств сварных соединений и коррозионной стойкости их к агрессивным средам, обрабатываться резанием, давлением, подвергаться изгибу и др.;

4) низкая стоимость материала, недефицитность и освоенность его промышленностью;

5) возможность простой утилизации при выработке сроков эксплуатации оборудования, узлов и деталей.

### ***Металлы и сплавы***

Стали и сплавы на основе железа являются наиболее распространенными конструкционными материалами при изготовлении химического оборудования. Сталь обладает хорошей прочностью, низкой стоимостью по отношению к другим конструкционным материалам, весьма технологична при обработке и изготовлении полуфабрикатов и оборудования.

В зависимости от количества примесей и легирующих добавок конструкционные стали подразделяются на следующие основные группы:

- углеродистая сталь обыкновенного качества;
- качественная углеродистая сталь;
- низколегированная сталь;
- легированная сталь;
- высоколегированные жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы;
- двухслойные конструкционные стали.

Условные обозначения легирующих элементов в металлах и сплавах приведены в табл. 3.4.

### 3.4. Обозначение легирующих элементов в металлах и сплавах

Легирующий элемент	Обозначение	Обозначение в марках металлов и сплавов		Легирующий элемент	Обозначение	Обозначение в марках металлов и сплавов	
		черных	цветных			черных	цветных
Алюминий	Al	Ю	А	Ниобий	Nb	Б	–
Азот	N	А	–	Олово	Sn	–	О
Барий	Ba	–	–	Свинец	Pb	–	С
Бериллий	Be	–	Б	Селен	Se	Е	–
Бор	B	Р	–	Сера	S	–	–
Ванадий	V	Ф	–	Серебро	Ag	–	Ср
Вольфрам	W	В	–	Сурьма	Sc	–	С
Железо	Fe	–	Ж	Теллур	Te	–	–
Кадмий	Cd	–	–	Титан	Ti	Т	Т
Кремний	Si	С	К	Углерод	C	У	–
Магний	Mg	–	Мг	Фосфор	P	П	Ф
Марганец	Mn	Г	Мц	Хром	Cr	Х	–
Медь	Cu	Д	М	Церий	Ce	–	–
Молибден	Mo	М	–	Цинк	Zn	–	Ц
Мышьяк	As	–	Мш	Цирконий	Zr	Ц	–
Никель	Ni	Н	Н				

*Углеродистая сталь обыкновенного качества* (СтЗкп, СтЗпс, СтЗсп, СтЗГпс, Стбкп, Стбпс и др., ГОСТ 380–2005), поставляемая в виде листового, сортового и фасонного проката, труб, поковок и т.д., используется для изготовления несущих конструкций, обечаек, днищ, фланцев, люков, штуцеров и других деталей машин и аппаратов, не контактирующих с агрессивными средами. Цифры в наименовании марки стали обозначают условный номер марки в зависимости от химического состава. По степени раскисления различают сталь кипящую (кп), полуспокойную (пс) и спокойную (сп). Нераскисленные кипящие стали применяются для малонагруженных узлов и деталей химического оборудования, работающего при давлениях не выше 1,6 МПа и температурах до 350 °С. Спокойные стали могут быть использованы для изготовления оборудования, работающем при давлении до 5 МПа и в интервале температур –20...+425 °С.

*Качественная углеродистая конструкционная сталь* (сталь 10, сталь 40, сталь 20К и др.), поставляемая в виде листового проката (ГОСТ 5520–79) и в виде сортового проката и труб (ГОСТ 1050–94), применяется для изготовления корпусов и деталей оборудования, трубных пучков теплообменников, работающих в интервале температур  $-20...+475$  °С с неагрессивными и малоагрессивными средами.

*Низколегированная сталь* с содержанием легирующих элементов до 2,5% (09Г2, 09ГС1, 09ГС2, 16 ГС и т.д.), поставляемая в виде листового проката (ГОСТ 5520–79), сортового и фасонного проката, труб и поковок (ГОСТ 19281–89), применяется для изготовления нагруженных элементов химического оборудования (крепёжных изделий, пружин, элементов арматуры, фланцев, трубных решеток и т.п.), работающего в интервале температур  $-70...+475$  °С с малоагрессивными и неагрессивными средами.

*Легированная конструкционная сталь* с содержанием легирующих элементов до 10% (12ХМ, 12МХ, 15Х5М, 30ХМА, 30ХГСА и др.), поставляемая в виде сортового проката, труб и поковок (ГОСТ 20072–74), применяется для изготовления элементов химического оборудования работающих в интервале температур  $-70...+560$  °С в неагрессивных и малоагрессивных средах, а также для изготовления высоконагруженных деталей машин (шестерни, валы, оси, роторы, валки, штоки и т.п.).

*Высоколегированные, жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы* содержат более 10% легирующих добавок. В зависимости от структурного класса они могут работать в интервале температур  $-253...+700$  °С. Поставляются данные стали в виде листового проката, труб и поковок.

Стали аустенитного класса (08Х18Н9Т, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т, 10Х14Г14М4Т, 03Х21Н21М4ГБ и др.) применяются в зависимости от марки для изготовления химической аппаратуры, работающей с сильными минеральными кислотами и щелочами.

Стали ферритного класса (08Х13, 08Х18Т1, 15Х25Т и др.) применяются для изготовления химического оборудования, работающего в средах окислительного характера. Например, они стойки к воздействию фосфорной и уксусной кислот при температуре  $+70$  °С, азотной кислоты концентрацией до 65% при температуре до  $+40$  °С. Однако данные стали обладают низкой ударной вязкостью в зоне сварных швов.

Стали аустенитно-ферритного класса (08Х22Н6Т, 12Х21Н5Т, 08Х21Н6М2Т и др.) по коррозионной стойкости аналогичны сталям аустенитного класса, но более экономно легированы никелем, менее склонны к межкристаллитной коррозии, коррозионному растрескиванию, имеют повышенные механические показатели в состоянии поставки.

Для экономии дорогостоящих высоколегированных сталей при конструировании химического оборудования широко применяются двухслойные стали с ос-

новным слоем из углеродистых, низколегированных и легированных сталей и плакирующим слоем из высоколегированных сталей (СтЗсп с плакирующим слоем из сталей 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т; 20К с плакирующим слоем из сталей 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 06ХН28МДТ; 16ГС и 09Г2С с плакирующим слоем 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 06ХН28МДТ и другие стали).

Двухслойные стали могут работать в зависимости от марки в интервале температур  $-40...+475$  °С.

Двухслойные стали поставляются в виде листового проката.

### **Чугуны**

Чугуны, как материалы, обладающие хорошими литейными свойствами, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и антифрикционными качествами, до сих пор находят широкое применение при изготовлении химических и нефтехимических аппаратов, узлов и деталей.

Однако их отличает ряд недостатков: высокая хрупкость, сложность обработки резанием, высокие коэффициенты линейного расширения, сильная зависимость прочностных характеристик от температуры, трудность, а в ряде случаев и невозможность сварки.

Правила Ростехнадзора Российской Федерации регламентируют использование чугунных отливок по температуре и давлению.

В химическом машино- и аппаратостроении наибольшее применение получили следующие виды чугунов.

*Серый чугун* (ГОСТ1412–85) марок СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ30 и СЧ35. Цифры обозначают предел временного сопротивления на растяжение ( $\text{МПа}\cdot 10^{-1}$ ).

Из чугуна СЧ10 изготавливают корпусные и ненагруженные детали простой конфигурации, а из чугуна остальных марок – ответственные корпуса и детали сложной конфигурации, работающие в слабоагрессивных средах. При расчете деталей на растяжение коэффициент запаса прочности для серого чугуна принимают 6...8.

*Щелочестойкие чугуны* СЧЩ1 и СЧЩ2 применяют для изготовления корпусов, деталей и узлов машин и аппаратов, работающих в водных растворах щелочей NaOH и КОН при давлении до 1 МПа и температуре  $-15...+300$  °С.

*Ферросилиды* С15, С17 и *антихлор* МФ15 применяют для изготовления корпусов, деталей и узлов простой конфигурации для работы с сильноагрессивными средами (растворами солей, азотной и серной кислотами) при давлении до 0,25 МПа и температуре  $0...+700$  °С. При разработке конструкции следует учитывать, что кремнистые чугуны очень хрупкие, чувствительны к колебаниям температуры и трудно обрабатываются резанием. Поэтому изделия из них получают отливкой, предусматривая плавные переходы. Ферросилиды широко применяют при изготовлении арматуры.

Следует иметь в виду, что ферросилиды легко корродируют под воздействием соляной кислоты, крепких щелочей и фтористых соединений.

*Жаростойкие чугуны*, содержащие до 32% Cr и 1...2% Si, применяют в котельно-топочном оборудовании. Чугуны марки ЖЧХ0,8; ЖЧХ1,5; ЖЧ6 5,5 (ГОСТ 7769–89) используют при изготовлении узлов и деталей, работающих при температуре соответственно 550, 600 и 800 °С, а чугуны марок ЖЧХ16 и ЖЧХ340 обладают хорошей жаростойкостью до температур 1000...1200 °С при действии дымовых газов, содержащих зернистые соединения.

*Жаростойкий и коррозионно-стойкий чугун* ЧН15Д7Х2 применяют при изготовлении узлов и деталей, работающих при температуре +100...+600 °С и агрессивных средах.

*Антифрикционный чугун* АЧС-1, АЧС-2 (ГОСТ 1585–85) используют для изготовления узлов и деталей, испытывающих трение (подшипников, шарниров, направляющих и др.).

*Ковкие чугуны* (ГОСТ 1215–79) КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-7, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5 применяют в основном для небольших отливок. Основным преимуществом отливок из ковкого чугуна является однородность их свойств по сечению, практически отсутствие внутренних напряжений. С целью исключения напряжений в конструкциях отливки получают со стенками толщиной до 50 мм.

*Высокопрочные чугуны* (ГОСТ 7293–85) ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100 применяют для изготовления узлов и деталей с повышенными механическими свойствами. Они имеют высокую жидкотекучесть, незначительную склонность к образованию горячих трещин. Вместе с тем их склонность к образованию усадочных раковин и литейных напряжений выше, чем у серого чугуна. Кроме того, они имеют удовлетворительную коррозионную стойкость (не ниже, чем чугун марок СЧ), жаростойкость, хладостойкость, антифрикционные свойства, обрабатываемость резанием и могут подвергаться сварке и автогенной резке.

## **Цветные металлы и их сплавы**

### ***Алюминий и сплавы на его основе***

Алюминий и сплавы на его основе нашли широкое применение в химической технике для изготовления тепло- и массообменной и емкостной аппаратуры, труб, трубопроводной арматуры благодаря своим физико-механическим, технологическим и эксплуатационным свойствам. Алюминий и его сплавы по плотности почти в 3 раза легче стали или чугуна, обладают высокой пластичностью, тепло- и электропроводностью, хорошо свариваются в инертной атмосфере аргона, удовлетворительно обрабатываются резанием. Кроме того, они обладают высокой коррозионной стойкостью в целом ряде агрессивных сред, благодаря образованию на поверхности тонкой оксидной пленки.

Алюминий высокой технической чистоты марок А995, А99...А95, А8...А5 обладает высокой коррозионной стойкостью, но имеет ограниченное применение для изготовления корпусных деталей, элементов теплообменной и емкостной аппаратуры из-за низких механических характеристик.

Легирование алюминия такими элементами, как Cu, Mn, Mg, Ni, Si, Fe и другими, позволяет получить большое число сплавов с более высокими физико-механическими свойствами, чем чистый алюминий. Поэтому сплавы на основе алюминия нашли широкое распространение при конструировании химического оборудования. В основном в химическом машино- и аппаратостроении применяются деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.

Деформируемые сплавы применяют для изготовления деталей и элементов оборудования, получаемых обработкой давлением различных полуфабрикатов (листов, прутков, труб и т.д.). Наибольшее распространение получили следующие марки деформируемых алюминиевых сплавов: АД0, АД00, АД00Е, АД000, АД0Е, АД, АД1, Амц, Амг2... АМг6, не упрочняемые термообработкой, и сплавы марок Д1, Д16, ВД17, В92, АК-4, АК-6, В-95, упрочняемые термообработкой.

Литейные алюминиевые сплавы применяются для изготовления деталей и элементов химического оборудования, работающих при повышенных температурах, действии больших ударных и статических нагрузок, корпусных деталей. Для фасонного литья наибольшее распространение получили следующие марки сплавов: АЛ2 – АЛ9 (до +250 °С); АЛ20, АЛ33, АЛ34 (до +350 °С).

### *Медь и ее сплавы*

Технически чистая медь применяется в основном в электротехнической промышленности. Для изготовления химической аппаратуры в отдельных случаях находит ограниченное применение технически чистая отожженная медь марок М2 и М3 с содержанием соответственно 99,7 и 99,5% меди. Особенностью меди как конструкционного материала является отсутствие надежных защитных оксидных пленок, обеспечивающих химическую стойкость в большинстве кислот и солей. Многие газы (сероводород, диоксид углерода, пары серы, галоиды, аммиак, сернистый ангидрид) разрушают медь. При низких температурах прочность меди возрастает, при этом сохраняется высокая ударная вязкость. Эти особенности делают ее незаменимым конструкционным материалом для криогенной аппаратуры. Из меди изготавливают также спиртовые ректификационные колонны и кубы-испарители.

Для улучшения свойств меди, как конструкционного материала ее легируют различными элементами, получая сплавы на основе меди. В качестве легирующих элементов используют: цинк, олово, алюминий, никель, железо, кремний, марганец и другие, за счет чего существенно улучшаются механические и технологические свойства получаемых сплавов. По химическому составу сплавы на основе меди подразделяются на латуни, бронзы и медноникелевые сплавы.

*Латуни* – сплавы на основе меди с цинком, обозначаются первой буквой «Л». Латуни, содержащие в сплаве кроме меди до 38% цинка, называются простыми. При содержании цинка до 10% простые латуни называются томпаками. Латуни, содержащие кроме цинка другие легирующие элементы, называются сложными латунями. Например, латунь ЛЖМц59-1-1 расшифровывается как железомарганцевая латунь. По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью и коррозионной стойкостью. Они хорошо поддаются литью, обработке давлением и механическим резанием. По технологическому назначению латуни подразделяют на обрабатываемые давлением и литейные. Из латуней, обрабатываемых давлением, марок Л70, Л60, ЛАЖ60-1-1, ЛАН59-3-2, ЛО62-1, ЛЖС58-1-1, ЛК80-3, ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 изготавливают полуфабрикаты и элементы оборудования (листы, ленты, полосы, трубы теплообменников, проволоку,ковки, сифоны, подшипники скольжения, элементы трубопроводной арматуры). Из различных марок литейной латуни – ЛЦ40С; ЛЦ40Мц1,5; ЛЦ40Мц3Ж; ЛЦ40Мц3А; ЛЦ30А3; ЛЦ23А6Ж3Мц2; ЛЦ16К4 изготавливают детали трубопроводной арматуры, выдерживающие нагрев до 250 °С, элементы аппаратов, работающих в морской воде, малонагруженные подшипники скольжения, венцы шестерен, детали баббитовых подшипников, элементы криогенной аппаратуры.

*Бронзы* – сплавы на основе меди с оловом, в которых в качестве легирующих добавок применяются Al, Pb, Si, Be, Sn, Ti, Ni и другие элементы. Бронзы маркируются буквами «Бр», остальные обозначения аналогичны маркировке латуней.

В химической технике находят применение безоловянные, оловянные, алюминевые, бериллиевые, кремниевые, свинцовые и марганцевые бронзы.

Из безоловянных литейных бронз марок БрА9Мц2, БрА9Ж3Л, БрА10Ж4Н4Л, БрА9Ж4Н4Мц2, БрА7Мц15Ж3Н2Ц2 изготавливают антифрикционные детали и арматура для пара, воды и нефтепродуктов, работающих при температурах до 250 °С, арматура для морской воды.

Более дорогие оловянные литейные бронзы марок Бр03Ц12С5, Бр04Ц7С5, Бр06Ц6С3, Бр010Ф1, Бр010С10 используются при изготовлении арматуры, антифрикционных деталей, вкладышей подшипников, венцов шестерен, шнековых приводов, нагруженных подшипников скольжения, элементов винтовых мешалок.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением марок БрОФ8-0,3; БрОФ6,5-0,4; БрОЦ4-3; БрОЦ4-4-4 применяются для изготовления специальных сеток, пружин, лент, подшипников скольжения, сталелатунных втулок для пар трения и т.д.

Алюминиевые бронзы, деформируемые в холодном и горячем состоянии, марок БрА5; БрАЖМц10-3-1,5; БрАМц10-2 служат для изготовления деталей, работающих в морской воде, трубных досок конденсаторов, износостойких деталей гидравлических систем, шестерен, втулок пар трения и т.п.

Бериллиевые бронзы марок БрБ2; БрБНТ1,9; БрБНТ1,9Мг идут на изготовление пружин ответственного назначения и износостойких деталей различных типов.

Кремниевые бронзы марок БрКМц3, БрКН1-3 являются коррозионно-стойкими и жаропрочными материалами, применяемыми для изготовления деталей химических аппаратов, пружин, антифрикционных деталей, направляющих втулок штоков и пр.

Свинцовые бронзы марок БрС30; БрСН60-2,5 отличаются высокими антифрикционными свойствами и применяются для изготовления методом литья высоконагруженных подшипников скольжения, направляющих втулок и других деталей, работающих в парах трения скольжения.

Марганцевая бронза марки БрМц5 является пластичным сплавом, обладающим достаточной коррозионной стойкостью и теплостойкостью. Из нее изготавливаются детали и сборочные единицы химической аппаратуры, работающие в условиях нагрева.

Медноникелевые сплавы применяются в химической технике в качестве конструкционных материалов, работающих в агрессивных средах. Основными медноникелевыми сплавами этой группы являются:

- монель-металл (НМЖМц28-2,5-1,5) и «Хастеллой» (Н70МФВ-ВИ, ХН58В, ХН65МВУ) – используются для изготовления элементов химической аппаратуры, работающих в средах – сильных восстановителях;
- мельхиор (МНЖМц30-1), нейзильбер (МНц15-20) – применяется для изготовления химической аппаратуры, работающей с сильными минеральными кислотами, щелочами, растворами, содержащими ионы хлора.

### *Титан и сплавы на его основе*

Чистый титан марок ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-2 и титановые сплавы, обрабатываемые давлением марок ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4 (легированы Mn и Al), ВТ5, ВТ14, ВТ20 (легированы Al, V, Cr, Mo, Zr, Fe), ПТ-7М, ПТ-3В (легированы Al, V, Zr) соответствуют по химическому составу ГОСТ19807–91 и используются для изготовления ответственных элементов оборудования, работающих в окислительных средах.

Титан и его сплавы при умеренных температурах превосходят по коррозионной стойкости большинство легированных сталей. Коррозионная стойкость этих конструкционных материалов обусловлена образованием весьма прочной и плотной оксидной пленки  $TiO_2$ , надежно защищающей эти материалы от взаимодействия с окружающей коррозионной средой. Необходимо отметить, что эта оксидная пленка разрушается в восстановительных средах.

Технический титан и его сплавы обладают и другими ценными технологическими и физико-механическими свойствами: сохраняют работоспособность при нагреве до температур 550...600 °С. Механическая прочность титана и его спла-

вов соизмерима с прочностью конструкционных сталей при существенно меньшей плотности. Для этих материалов характерна хорошая или удовлетворительная свариваемость, подверженность большинству известных видов обработки давлением, особенно в горячем состоянии. Недостатками титана и его сплавов следует считать низкую теплопроводность, малый модуль упругости, трудности обработки резанием и получения фасонных отливок. Из титана и его сплавов изготавливают фильтры, автоклавы, емкостные аппараты, детали насосов и компрессоров, центрифуг, теплообменники, трубопроводы и арматуру для агрессивных сред и т.п.

### *Тугоплавкие металлы и их сплавы*

Для современного химического машино- и аппаратостроения необходимы материалы, обладающие длительной жаропрочностью и жаростойкостью при нагреве до 1000...1200 °С. Для удовлетворения этих запросов в химической технике находят применение тугоплавкие металлы ниобий и тантал, а также некоторые сплавы на их основе. Тугоплавкими условно считают металлы, имеющие температуру плавления не менее температуры плавления хрома (1875 °С). К этой группе тугоплавких металлов приближается цирконий (температура плавления 1845 °С). Необходимо отметить, что наличие даже малых количеств вредных примесей (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C, P, Fe, Si) в этих конструкционных материалах существенно ухудшают их свойства и делают их хрупкими. Поэтому применение этих металлов и сплавов на их основе возможно при условии высокой степени их очистки от вредных примесей.

Ниобий и тантал – очень тугоплавкие металлы (температуры плавления Nb – 2415 °С, Ta – 2996 °С), весьма коррозионно стойки, обладают высокой прочностью и пластичностью, поддаются практически всем видам механической обработки. Теплопроводность ниобия при нагреве до 1200 °С повышается, что особенно важно для теплообменной аппаратуры, работающей в этом интервале температур. Ниобий значительно дешевле тантала и в 2 раза легче его, что делает его более перспективным по сравнению с танталом. При легировании этих тугоплавких металлов добавками Mo, W, Zr, V получают сплавы с очень высокой жаростойкостью и жаропрочностью. Например, сплав Ta + 10% W сохраняет работоспособность до 1550...1600 °С. Из ниобия, тантала и сплавов на их основе изготавливают теплообменники, мешалки, нагреватели, реакторы, абсорберы, фильтры, трубопроводы и арматуру. Эти конструкционные материалы в ряде случаев могут служить недорогими заменителями платины, золота, иридия в элементах аппаратуры органического и неорганического синтеза и для изготовления особо ответственных элементов химической аппаратуры, работающей в условиях высоких температур и агрессивных сред. Цирконий и его сплавы находят основное применение в качестве конструкционного материала в ядерной тех-

нике. Однако высокая жаростойкость и жаропрочность, стойкость в очень агрессивных средах, применимость к нему различных видов механической обработки, хорошая свариваемость определяют возможность его широкого применения в качестве конструкционного материала в химическом машиностроении. Из сплавов циркония наиболее применимы сплавы марок  $Zr + 0,5\% Ta$ ,  $Zr + 2,5\% Nb$ , сплав «оженит»  $Zr + 5\% Nb$ . Химическая аппаратура из этих сплавов стойка в высокоагрессивных средах с переменным рН, в среде азотной, фосфорной и соляной кислот, не реагирует с аммиаком до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из циркония и его сплавов изготавливают трубы, листы, сетки, прокат, применяемые при изготовлении трубопроводов, аппаратуры и теплообменников, работающих в высокоагрессивных средах.

### *Припой*

В химической технике паяные соединения составляют ощутимую долю среди других типов неразъемных соединений (сварных, клепаных, клеевых и т.д.). Припоем называется металл или сплав с температурой плавления ниже температурой плавления соединяемых материалов. Припой вводится или образуется в зазоре (стыке) между соединяемыми деталями в процессе пайки. Припой подразделяют на группы: особо легкоплавкие ( $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), легкоплавкие («мягкие»,  $145\text{...}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), среднетемпературные («твердые»,  $450\text{...}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), высокоплавкие ( $1100\text{...}1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тугоплавкие ( $1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Припой, состоящий из порошкообразной смеси расплавляемых металлических частиц и частиц наполнителя, не расплавляющихся при пайке, называется металлокерамическим припоем. Припой, легированный флюсующими элементами, называется самофлюсующим.

В химической технике наиболее часто применяются легкоплавкие («мягкие») и среднетемпературные («твердые») припои. В отдельных случаях при пайке деталей из высоколегированных хромоникелевых аустенитных сталей возможно применение высокоплавких припоев.

В группе легкоплавких припоев наибольшее применение нашли оловянно-свинцовые припои, в отдельных случаях легированные кадмием и сурьмой.

В зависимости от химического состава оловянно-свинцовые («мягкие») припои, применяемые в химическом машиностроении подразделяются на следующие марки: бессурмянистые (ПОС40, ПОСК50-18, ПОСК2-18 и др.); малосурмянистые (ПОССу40-0,5; ПОССу18-0,5 и др.); сурмянистые (ПОССу40-2, ПОССу5-1, ПОССу4-6 и др.).

В группе среднетемпературных («твердые») припоев наибольшее распространение получили серебряные и медно-цинковые припои. Наиболее распространенными марками серебряных припоев являются: ПСр2,5... ПСр72, ПСр50Кд, ПСр12М – применяются для пайки сталей с медью и медно-никелевыми сплавами; ПСрМО68-27-5, ПСр70 – применяются для пайки титана и его сплавов с легированной сталью; ПСр25Ф, ПСр15 – самофлюсующиеся припои для пайки меди и сплавов на основе меди;

ПСрМЦКд45-15-16-24; ПСрКдМ50-34-6; ПСр2,5 – пайка и лужение цветных металлов и сталей.

Медно-цинковые припои (ПМЦ36, ПМЦ48, ПМЦ54) применяются для пайки меди, латуней, бронз, томпаков и стали.

### ***Неметаллические конструкционные материалы***

Неметаллические конструкционные материалы широко применяются в химическом машино- и аппаратостроении. Это достаточно обширное семейство конструкционных материалов, которое можно подразделить на следующие классы:

- неорганические конструкционные материалы естественного происхождения;
- неорганические конструкционные материалы искусственного происхождения;
- органические конструкционные материалы.

К неорганическим конструкционным материалам естественного происхождения относятся: гранит, бештаунит, андезит, асбест. Данные материалы относятся к горным породам.

*Гранит* может применяться при строительстве поглотительных башен в производстве азотной и соляной кислот и изготовлении аппаратуры бромного и йодного производств.

*Бештаунит* используется в качестве футеровочного материала поглотительных башен в производстве серной и соляной кислот.

*Андезит* используется в качестве футеровочного материала поглотительных башен кислотных производств и наполнителя кислотостойких бетонов.

*Асбест* используется в качестве прокладочного материала, сальниковой плетеной, шнуровой и кольцевой набивки, теплоизоляции, а также как наполнитель в прокладочных материалах широкой номенклатуры. Последние десятилетия применение материалов из натурального асбеста ограничивается по экологическим соображениям.

Для вышеперечисленных материалов характерна высокая стойкость в кислотах (кроме плавиковой), определяемая содержанием оксида кремния, и термостойкость (для бештаунита она достигает 800, а для асбеста – 500 °С).

К неорганическим конструкционным материалам искусственного происхождения относятся: каменное литье из диабазы, базальта, доломита и каолина, кварцевое и силикатное стекло, ситаллы, стеклоэмали, керамика, углеродистый, кислото- и щелочестойкие цементы.

*Каменное литье из диабазы и базальта* является кислото- и термостойким. Оно применяется в виде футеровочных плиток, насадочных тел, фасонных изделий. Каменное литье из доломита и каолина дополнительно является износостойким, поэтому часто используется для изготовления шаров шаровых мельниц.

*Кварцевое стекло* обладает очень низким коэффициентом температурного расширения и способно выдерживать температурные перепады свыше 500 °С, длительно работать при температуре до 1200 °С. Оно стойко ко всем минеральным и органическим кислотам (кроме плавиковой и ортофосфорной), хорошо пропускает свет любой длины волны. Из кварцевого стекла изготавливают аппаратуру, трубопроводы и арматуру для производства особо чистых веществ. Кварцевое стекло часто используется для изготовления смотровых окон и мерных труб в оборудовании, работающем с агрессивными средами.

*Силикатные стекла* обладают значительно меньшей термостойкостью, чем кварцевые, не выдерживают воздействия плавиковой и ортофосфорной кислот, растворов щелочей, однако они значительно дешевле, поэтому также используются для изготовления лабораторной посуды, а также аппаратуры, трубопроводов, арматуры для работы с нейтральными средами.

*Ситаллы* в отличие от стекол имеют мелкокристаллическую структуру, обладают высокой термостойкостью, прочностью, низкой плотностью, устойчивостью к воздействию минеральных и органических кислот (кроме плавиковой), щелочам. Твердость ситаллов превышает твердость высокоуглеродистых сталей. Из ситаллов могут изготавливаться реакторы, работающие при высоких температурах с агрессивными средами. Кроме того, они используются для изготовления подшипников качения, работающих без смазки, различных фильтров при производстве синтетических и искусственных волокон, поршней, цилиндров, рабочих колес насосов и т.д.

*Стеклоэмали* применяются в качестве покрытия химической аппаратуры, работающей с агрессивными средами, но изготавливаемой из чугуна и углеродистой стали.

*Керамика* используется в качестве конструкционного материала при изготовлении различных типов насадок, лабораторного оборудования.

*Углеграфит* обладает высокой коррозионной стойкостью к минеральным кислотам и щелочам, хорошей теплопроводностью и высокой термостойкостью (до 2000 °С). Из него изготавливают теплообменную аппаратуру, работающую при высоких температурах с особо агрессивными средами. Однако данный материал имеет низкие прочностные характеристики. Для повышения прочности углеграфита его импрегнируют (пропитывают) различными полимерными связующими (фенолформальдегидными и эпоксидными смолами, кремнийорганическими и другими высокомолекулярными соединениями). Такой материал носит название графитопласт. Прочность этого композиционного материала может повышаться в несколько раз, однако термостойкость снижается до термостойкости пропиточного материала. Графитопласты различных марок служат для изготовления подшипников скольжения, уплотнительных колец в торцовых уплотнениях, поршневых колец компрессоров, рабочих колес насосов.

*Кислото- и щелочестойкие цементы* используются для приготовления вязущих растворов при футеровке химической аппаратуры и изготовлении химического оборудования из горных пород.

Среди материалов органического происхождения в качестве конструкционных материалов химического оборудования наибольшее распространение получили: резина, эбонит, различные виды пластмасс.

*Резина* представляет собой композиционный материал на основе натуральных или синтетических каучуков (термопластичных полимеров).

При добавлении в исходную резиновую смесь не более 3% вулканизатора – серы получают мягкую эластичную резину, при добавлении серы более 8% получают жесткую резину – полуэбонит, а при добавлении серы более 25% получают эбонит. Эбониты тверды, порочны, имеют высокую коррозионную стойкость, легко подвергаются механической обработке и являются высококачественными диэлектриками.

Перечисленные ценные свойства мягких и жестких резин обусловили широкое применение этих материалов в химической технике для изготовления всевозможных прокладок, втулок, рукавов, шлангов, трубок, манжет, виброопор, герметиков, приводных ремней, резиновых клеев и т.д., а также для гуммирования внутренней поверхности аппаратов из черных металлов. Эбониты находят применение для плакирования внутренней поверхности аппаратов, а также для изготовления коррозионностойких деталей, труб, сосудов, насосов и т.д.

*Пластмассы* – композиционные материалы, в которых сплошной средой являются полимеризационные или конденсационные полимеры, а дисперсной средой – наполнители, определяющие свойства композита (газовые наполнители, порошковые и волоконные) и другие ингредиенты (стабилизаторы, катализаторы, отвердители, пластификаторы, красители и др.). На основе поликонденсационных полимеров получают так называемые *реактопласты*, которые после отверждения под влиянием нагрева и давления не переходят снова в вязкотекучее состояние, т.е. не могут быть использованы повторно. На основе полимеризационных полимеров получают так называемые *термопласты*, которые могут под воздействием давления и нагрева снова переходить в вязкотекучее состояние, т.е. могут подвергаться вторичной переработке.

Пластмассы обладают рядом ценных свойств, делающих их ценными конструкционными материалами химической техники. Основные из этих свойств – малая плотность, высокая коррозионная стойкость, относительная простота формообразования изделий, хорошие теплоизоляционные свойства. В то же время эти материалы (особенно термопласты) имеют и ряд недостатков: низкую теплоустойчивость, малую теплопроводность, невысокую прочность, склонны к старению под влиянием различных излучений, высокие коэффициенты термического удлинения и др.

Из группы реактопластов в качестве конструкционных материалов химического оборудования наибольшее распространение получили термореактивные (резольные) фенолиты, которые подразделяются на прессовочные, волокнистые и слоистые. По своей сути это композиционные материалы, матрицей которых служат фенолформальдегидные, эпоксидные, фурановые, кремнийорганические и некоторые другие термореактивные смолы. В качестве наполнителей используется мелкодисперсные материалы (сухая древесная мука, каолин, тальк, слюда, графит, кварц, асбест и др.), волокнистые материалы (стеклянное, углеродное, борные и органические волокна), тканевые материалы на основе вышперечисленных волокон.

В прессовочных пластиках используют первую группу наполнителей, в волокнистых – вторую, в слоистых – третью. Коррозионная и термическая стойкость, механическая прочность пластика зависит как от материала матрицы, так и материала наполнителя. В зависимости от физико-химических свойств пластика он может применяться для изготовления различных емкостных аппаратов и реакторов для работы с агрессивными средами, деталей насосов, мешалок, насадочных и лакирующих материалов и т.д.

Из группы термопластов в качестве конструкционных материалов в химическом машино- и аппаратостроении наибольшее распространение получили полиэтилен, полипропилен, винипласт, фторопласты.

*Полиэтилен* обладает хорошей коррозионной стойкостью к органическим растворителям, кислотам, щелочам, растворам солей при нормальных условиях, но при нагревании разрушается в окислительных средах и в хлорированных углеводородах. Полиэтилен под действием кислорода воздуха, света и тепла стареет. В отдельных случаях процесс старения замедляют введением в его состав небольших количеств аминов, фенолов, сажи или графита. Из полиэтилена могут быть изготовлены фланцы, полумуфты, сильфоны, листы, пленки для упаковочной тары, теплоизолирующие газонаполненные пенопласты и т.д. Температура начала ползучести полиэтилена примерно +80 °С.

*Полипропилен* по сравнению с полиэтиленом изделия из полипропилена обладает большей термостойкостью и коррозионной стойкостью к серной и азотной кислотам, а также стойкостью к воздействию органических растворителей. Из пропилена изготавливают трубы, сосуды, корпуса насосов, трубопроводную арматуру. Полипропилен широко используется для антикоррозионных покрытий (плакирования) внутренних поверхностей химических аппаратов.

*Винипласт* (стабилизированный поливинилхлорид) используется для изготовления труб, трубопроводной арматуры, элементов химического оборудования, центробежных насосов, барабанов центрифуг, поглотительных колонн, фильтров, работающих в среде соляной, фосфорной, уксусной кислот, щелочах, растворах солей. Он имеет низкую хладо- и теплостойкость и температуру ползучести +60 °С.

*Фторопласты* – материалы на основе политетрафторэтилена (фторопласт-4) или политрифторхлорэтилена (фторопласт-3) широко применяются в химической технике. Эти материалы гидрофобны и не растворяются в большинстве растворителей, в том числе в органических, устойчивы к воздействию концентрированных кислот (царская водка, плавиковая, хлорсульфоновая, азотная) и щелочей. Фторо-пласт-4 теплостоек до температур  $+240\dots+260$  °С, но он подвержен хладотекучести, плохо сваривается и склеивается, что затрудняет получение из него изделий. Тем не менее, из этого материала изготавливают трубы, вентили, мембраны, детали насосов, уплотнительные прокладки, сильфоны. Фторопласт-3 более прочен по сравнению с фторопластом-4, устойчив в большинстве кислот, в растворах щелочей и окислителях, но растворяется в некоторых органических растворителях (бензоле, толуоле и его гомологах, в некоторых спиртах). Теплостойкость фторопласта-3 в 2 раза ниже теплостойкости фторопласта-4 и лежит в пределах  $120\dots125$  °С. Из фторопласта-3 изготавливают практически те же элементы химаппаратуры, что из фторопласта-4. Растворимость фторопласта-3 в некоторых органических растворителях используется для футеровки внутренней поверхности стальных аппаратов пленкой из этого материала. С этой целью на тщательно подготовленную и обезжиренную защищаемую поверхность наносят суспензию фторопласта-3 в этиловом спирте или в ксилоле с последующей сушкой получаемого покрытия и сплавлением его при нагревании при температуре примерно  $+210$  °С.

### 3.1.5. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ

#### **Тонкостенные цилиндрические обечайки**

*Сосуд* – устройство, имеющее внутреннюю полость для ведения химических, тепловых или других технологических процессов, а также для хранения и транспортирования газообразных, жидких и других сред.

*Аппарат* – сосуд, оборудованный внутренними устройствами и предназначенный для проведения химико-технологических процессов.

При проектировании сосудов и аппаратов необходимо обеспечить технологичность, надежность в течение установленного срока службы, безопасность при изготовлении, монтаже, ремонте и эксплуатации, возможность осмотра (в том числе внутренней поверхности), очистки, промывки, продувки и ремонта, контроля технического состояния сосуда при диагностировании, а также контроля давления и отбора сред.

В зависимости от расчетного давления, температуры стенки и рабочей среды аппараты подразделяются на группы (табл. 3.5.).

Все аппараты наряду с наличием у них специфических устройств, как правило, состоят из следующих основных элементов и узлов: цилиндрического корпуса, днищ, крышек, штуцеров (для присоединения трубопроводов и контрольно-измерительной аппаратуры), люков, опор, фланцев, строповых устройств.

### 3.5. Классификация технологических аппаратов

Группы аппаратов	Расчетное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Расчетная температура, °С	Характер рабочей среды
1	Выше 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1, 2-го классов опасности по ГОСТ 12.1.007
2	Выше 0,07 (0,7)	Выше +400	Любая, за исключением указанной для 1-й группы сосудов
	Выше 2,5 (25) до 5 (50)	Выше +200	
	Выше 4 (40) до 5 (50)	Ниже –40	
	Выше 5 (50)	Независимо	
3	Выше 0,07 (0,7) до 1,6 (16)	Ниже –20 Выше +200 до +400	
	Выше 1,6 (16) до 2,5 (25)	До +400	
	Выше 2,5 (25) до 4 (40)	До +200	
	Выше 4 (40) до 5 (50)	От –40 до +200	
4	Выше 0,07 (0,7) до 1,6 (16)	От –20 до +200	
5а	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1, 2-го классов опасности по ГОСТ 12.1.007
5б	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1, 2-го классов опасности по ГОСТ 12.1.007

Для стальных цилиндрических аппаратов, корпуса которых выполняются из листового проката, за базовый принимается внутренний диаметр, выбираемый из следующего ряда, мм: 400, (450), 500, (550), 600, (650), 700, 800, 900, 1000, (1100), 1200, (1300), 1400, (1500), 1600, (1700), 1800, (1900), 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000, 3200, 3400, 3600, 3800, 4000 и т.д. Диаметры в скобках предна-

значены только для рубашек аппаратов. Для стальных аппаратов, корпуса которых выполняются из труб, за базовый принимается наружный диаметр, выбираемый из следующего ряда, мм: 133, 159, 168, 219, 273, 325, 377, 426, 480, 530, 630, 720 и т.д.

Внутренние устройства, препятствующие осмотру аппарата, должны быть съемными. Рубашки для наружного обогрева или охлаждения могут быть приварными. Аппараты должны иметь люки-лазы для внутреннего осмотра, расположенные в удобных местах. При наличии у аппарата съемных крышек или днищ и фланцевых штуцеров большого диаметра, устройство лазов и люков в аппаратах необязательно. Опрокидывающиеся аппараты должны иметь приспособления, предотвращающие самопрокидывание.

Для возможности проведения гидроиспытаний аппарат должен иметь штуцера для наполнения и слива воды, а также поступления и удаления воздуха. Для этих целей могут быть использованы также технологические штуцера. На вертикальных аппаратах эти штуцера должны быть расположены с учетом возможности проведения гидроиспытаний в горизонтальном положении аппарата. Во всех глухих частях сборочных единиц и элементов внутренних устройств необходимо предусматривать дренажные отверстия, располагая их в самых низких местах для обеспечения полного слива жидкости.

Для подъема и установки аппарата на нем должны быть предусмотрены строповые устройства. Допускается использовать для этих целей имеющиеся на аппарате элементы (горловины, технологические штуцера, уступы и др.), если прочность их при этом не вызывает сомнений, что должно быть проверено расчетом.

Все основные сварные соединения в аппаратах, как правило, должны выполняться стыковой двухсторонней сваркой или с подваркой и быть доступными для осмотра и контроля. Предпочтение следует отдавать автоматической электродуговой сварке под слоем флюса. В местах присоединения опор к аппарату наличие сварных швов не допускается. Если это не может быть выполнено, необходимо предусмотреть возможность контроля сварного шва под опорой.

Во избежание перегрева и снижения качества сварных швов необходимо смещать их относительно друг друга на расстояние  $a \geq 3s$ , где  $s$  – толщина стенки элемента аппарата, но не менее чем на 100 мм (рис. 3.8, *a*), не следует также соединять несколько деталей одним швом. Отверстия для люков, лазов и штуцеров следует располагать вне сварных швов, на расстоянии от них  $b \geq 0,9d$  (рис. 3.8, *b*). Рекомендуемые расстояния между двумя соседними отверстиями  $A \geq 0,7(d_1 + d_2)$ , а для штампованных эллиптических днищ  $b \geq d_{\min}$ .

Штуцеры, плоские днища, фланцы приваривают тавровым, угловым или стыковым соединением. Для обеспечения равенности свариваемых элементов следует предусматривать плавные переходы при сварке обечаек, днищ и фланцев разной толщины (рис. 3.9). Сварные швы должны быть доступны для осмотра и контроля.

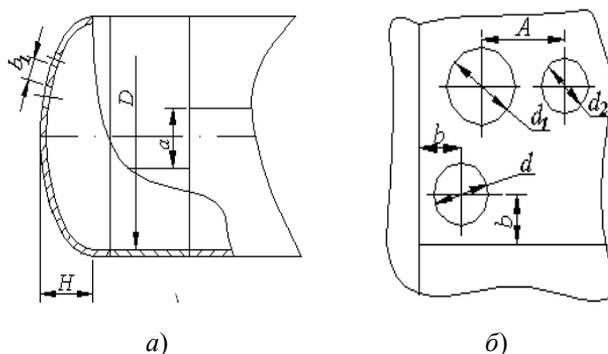


Рис. 3.8. Элементы корпуса сосуда

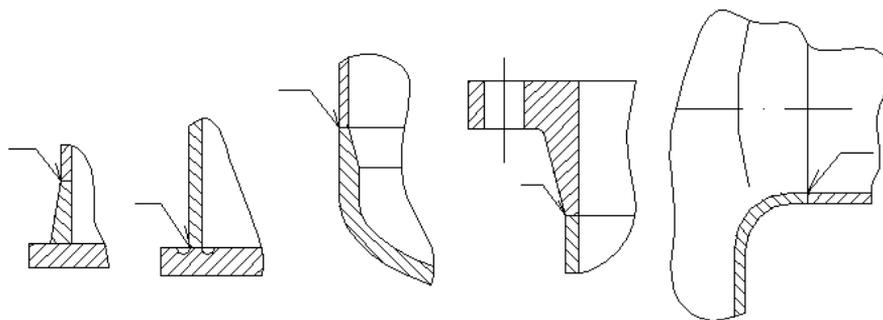
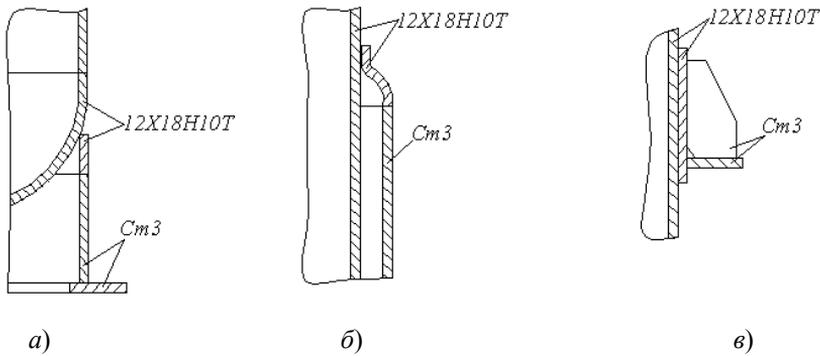


Рис. 3.9. Сварные соединения элементов корпуса

При изготовлении аппаратов из высоколегированных сталей следует учитывать высокую стоимость их и необходимость сохранения коррозионной стойкости. Из высоколегированных сталей следует изготавливать только те элементы корпуса, которые подвержены воздействию агрессивной среды, выполняя остальные детали из углеродистых сталей. При сварке разнородных сталей происходит диффузия легирующих компонентов в углеродистую сталь, что снижает коррозионную стойкость легированной стали. По этой причине следует отдалять места стыка высоколегированной и углеродистой стали от мест воздействия агрессивной среды введением промежуточных элементов (рис. 3.10). Во избежание перегрева в процессе сварки, приводящего к выгоранию легирующих компонентов и ухудшению коррозионной стойкости, необходимо обеспечить одинаковую толщину свариваемых элементов; при этом желательно сваривать их встык, а сварные швы располагать на определенном расстоянии один от другого.

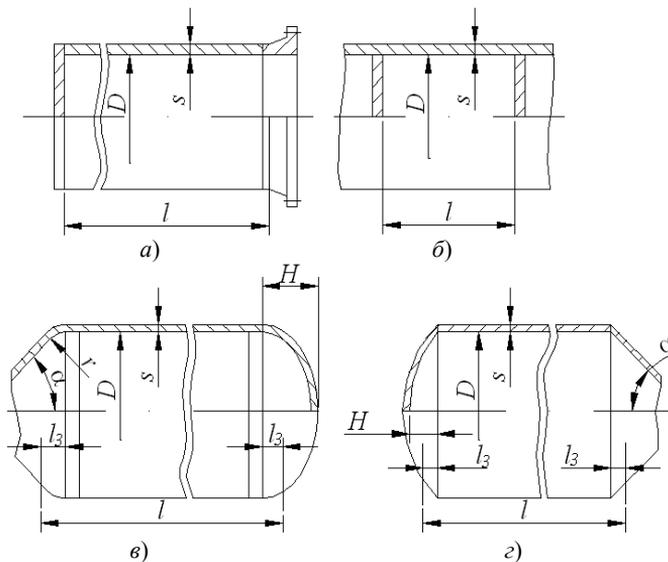
Следует также учитывать различие в физических свойствах высоколегированных и углеродистых сталей: температурный коэффициент линейного расширения для аустенитной стали приблизительно в 1,5 раза больше, чем для углеродистой, а теплопроводность – в 3-4 раза меньше. Вследствие этого возможно возникновение значительных температурных напряжений. Поэтому в ряде случаев необходимо вводить в конструкцию промежуточные упругие элементы.



**Рис. 3.10. Варианты соединения элементов корпуса, изготовленных из высоколегированной и углеродистой стали:**  
*a* – опорная обечайка; *б* – рубашка; *в* – опорная лапа

Сосуды и аппараты, применяемые в промышленности, считаются тонкостенными, если толщина их стенки не превышает 10% внутреннего диаметра. Обычно такие сосуды и аппараты эксплуатируются при давлении не более 10 МПа.

Цилиндрические обечайки являются одним из основных элементов технологических аппаратов. Обычно обечайки изготавливаются вальцовкой из листового проката, реже из труб или поковок. Из одной или нескольких обечайек, свариваемых между собой встык, образуется цилиндрический корпус аппарата (рис. 3.11).



**Рис. 3.11. Цилиндрические обечайки:**

*a* – обечайка с фланцем или плоским дном; *б* – обечайка с жесткими перегородками; *в* – обечайка с отбортованными эллиптическим и коническим днищами; *г* – обечайка с неотбортованными сферическим и коническим дном

В зависимости от поставленных задач при проведении прочностных расчетов различают проектные и проверочные расчеты.

При выполнении *проектных расчетов* задачей является определение размеров отдельных элементов (толщины стенок корпусов, днищ, трубных решеток, диаметра болтов и т.д.). Проектные расчеты проводятся, как правило, при конструировании новых машин и аппаратов.

При *проверочных расчетах* определяют фактически возникающие в элементах напряжения и сравнивают их с допускаемыми при заданных условиях эксплуатации. Проверочные расчеты выполняют для проверки возможности использования выбранного аппарата в конкретных условиях.

Нормы и методы расчета на прочность сосудов и аппаратов, применяемых в химической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности, работающих в условиях однократных и многократных статических нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным избыточным давлением и под действием осевых и поперечных усилий и изгибающих моментов приведены в ГОСТ Р 52587.1 – ГОСТ Р 52587.11 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность».

Данный стандарт устанавливает также значения допускаемых напряжений, модуля продольной упругости и коэффициентов прочности сварных швов.

Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных регламентируются ПБ 03-584-03 и ГОСТ Р 52630 «Сосуды и аппараты сварные стальные. Общие технические условия». Данные документы распространяются на проектируемые, вновь изготавливаемые и модернизируемые стальные сварные сосуды и аппараты, работающих под давлением не более 16 МПа, вакуумом с остаточным давлением не ниже 665 Па (5 мм рт.ст.), внутренним давлением 0,07 МПа и менее (под налив) и при температуре стенки не ниже  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Отклонение наружного (внутреннего) диаметра обечаек, цилиндрических отбортованных элементов днищ, изготовленных из листов и поковок, не должно превышать  $\pm 1\%$  номинального диаметра. Относительная овальность в любом поперечном сечении не должна превышать 1%. Величина относительной овальности определяется по формулам:

- в сечении, где отсутствуют штуцеры и люки,

$$a = \frac{2(D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} 100\%;$$

- в сечении, где имеются штуцеры и люки,

$$a = \frac{2(D_{\max} - D_{\min} - 0,02d)}{D_{\max} + D_{\min}} 100\%,$$

где  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$  – соответственно наибольший и наименьший наружные (внутренние) диаметры сосуда или аппарата, м;  $d$  – внутренний диаметр штуцера, м.

Относительная овальность для элементов сосудов и аппаратов, работающих под вакуумом или наружным давлением, не должна превышать 0,5%, а для сосудов, работающих без давления (под налив) – 2%.

Расчет на прочность необходимо проводить для всех прогнозируемых состояний аппаратов, возникающих во время их эксплуатации, испытания, транспортировки, монтажа. При этом следует учитывать все нагрузки и внешние факторы (температуру, коррозионные среды и т.п.), которые могут оказать влияние на прочность, и учитывать вероятность их одновременного воздействия. В частности, необходимо учитывать следующие факторы: внутреннее или внешнее давление; температуры окружающей среды и рабочие температуры; статическое давление в рабочих условиях и условиях испытания, нагрузки от массы сосуда и содержимого в оборудовании; инерционные нагрузки при движении, остановках и колебаниях; нагрузки от ветровых и сейсмических воздействий; реактивные усилия, которые передаются от опор, креплений, трубопроводов и т.д.; нагрузки от стесненности температурных деформаций; усталость при переменных нагрузках; коррозию и эрозию и т.д.

Физико-механические характеристики конструкционных материалов и допускаемые напряжения определяют по *расчетной температуре*, которую находят на основании теплотехнических расчетов или результатов испытаний, или опыта эксплуатации аналогичных сосудов. При положительных температурах за расчетную температуру стенки сосуда или аппарата принимают наибольшее значение температуры стенки, при температуре ниже 20 °С – при определении допускаемых напряжений температуру 20 °С. При невозможности проведения тепловых расчетов или измерений за расчетную температуру следует принимать наибольшую температуру среды, но не ниже 20 °С.

Под *рабочим давлением* для сосуда или аппарата  $p_r$  следует понимать максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.

*Расчетное давление* в рабочих условиях  $p$  – это давление, на которое проводится расчет на прочность элементов сосудов и аппаратов. Расчетное давление, как правило, принимают равным рабочему давлению или выше. Расчетное давление должно учитывать внутреннее или внешнее давление; гидростатическое давление от среды, находящейся в сосуде; нестабильность перерабатываемых сред и технологического процесса; инерционные нагрузки при движении или сейсмических воздействиях.

Если на сосуде или подводящем трубопроводе к сосуду установлено устройство, ограничивающее давление, чтобы рабочее давление не превышало максимально допустимого рабочего давления, то при определении расчетного давления не учитывают кратковременное превышение рабочего давления в пределах 10%.

Для элементов, разделяющих пространства с разными давлениями (например, в аппаратах с рубашками), за расчетное давление следует принимать либо

каждое давление в отдельности, либо давление, которое требует большей толщины стенки рассчитываемого элемента. Если обеспечивается одновременное действие давлений, то допускается производить расчет на разность давлений. Разность давлений принимается в качестве расчетного давления также для таких элементов, которые отделяют пространства с внутренним избыточным давлением от пространства с абсолютным давлением, меньшим чем атмосферное. Если отсутствуют точные данные о разности между абсолютным давлением и атмосферным, то абсолютное давление принимают равным нулю.

Все сосуды и аппараты после их изготовления подлежат гидравлическому (или пневматическому) испытанию. Под *пробным давлением*  $p_{пр}$  понимают давление, при котором проводится испытание сосуда или аппарата, а под расчетным давлением в условиях испытаний – давление, которому они подвергаются во время пробного испытания, включая гидростатическое давление. Величина пробного давления, при котором должно проводиться гидравлическое испытание сосудов и аппаратов в соответствии с ГОСТ Р 52630 составляет

$$p_{пр} = 1,25 p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t},$$

где  $[\sigma]_{20}$ ,  $[\sigma]_t$  – допускаемые напряжения для материала сосуда или его элементов соответственно при температуре 20 °С и расчетной температуре, МПа.

Гидравлическое испытание элементов, изготовленных из литья, должно проводиться пробным давлением

$$p_{пр} = 1,5 p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}.$$

Под *расчетным пробным давлением* в условиях испытаний для элементов сосудов и аппаратов следует принимать давление, которому они подвергаются во время пробного испытания, включая гидростатическое давление.

Для гидравлических испытаний используют воду с температурой 5...40 °С. Время выдержки сосуда под пробным давлением должно быть не менее 10 мин при толщине стенки до 50 мм, не менее 20 мин при толщине стенки от 50 до 100 мм и не менее 30 мин при толщине стенки свыше 100 мм.

Для аппаратов, работающих под вакуумом, величина расчетного пробного давления принимается равной 0,1 МПа.

Под *условным давлением*  $p_y$  понимают избыточное давление среды в аппарате при температуре 20 °С (без учета гидростатического давления). Согласно ГОСТ 9493–80 рекомендуется следующий ряд условных давлений, МПа: 0,1; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,4; 10; 16; 20.

За *расчетные усилия и моменты* принимают действующие для соответствующего состояния нагружения (например, при эксплуатации, испытании или монтаже), усилия и моменты, возникающие в результате действия собственной массы, инерционных нагрузок, присоединенных трубопроводов, ветровой, сне-

говой, сейсмической и других нагрузок. Расчетные усилия и моменты от ветровой нагрузки и сейсмических воздействий определяют по ГОСТ Р 51273.

Допускаемое напряжение  $[\sigma]$  при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов, работающих при статических однократных нагрузках, определяют:

– для углеродистых, низколегированных, ферритных, аустенитно-ферритных, мартенситных сталей и сплавов на железникелевой основе

$$[\sigma] = \eta \min \left\{ \frac{R_T \text{ или } R_{T0,2}}{n_T}; \frac{R_B}{n_B}; \frac{R_{д10^5}}{n_д}; \frac{R_{1\%10^n}}{n_{п}} \right\};$$

– для аустенитной хромоникелевой стали, алюминия, меди и их сплавов сталей

$$[\sigma] = \eta \min \left\{ \frac{R_{T1,0}}{n_T}; \frac{R_B}{n_B}; \frac{R_{д10^5}}{n_д}; \frac{R_{1\%10^n}}{n_{п}} \right\};$$

где  $\eta$  – поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям (обычно принимается  $\eta = 1$ , за исключением стальных отливок, для которых принимается значение:  $\eta = 0,8$  – для отливок при индивидуальном контроле неразрушающими методами,  $\eta = 0,7$  – для остальных отливок);  $R_T$  – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа;  $R_{T0,2}$ ,  $R_{T1,0}$  – минимальное значение условного предела текучести (при котором остаточное удлинение составляет соответственно 0,2% и 1,0%) при расчетной температуре, МПа;  $R_B$  – минимальное значение временного сопротивления при расчетной температуре, МПа;  $R_{д10^5}$  – среднее значение длительной прочности за  $10^5$  ч при расчетной температуре, МПа;  $R_{1\%10^n}$  – средний 1% предел ползучести за  $10^n$  ч при расчетной температуре, МПа.

Предел ползучести используют для определения допускаемого напряжения в тех случаях, когда отсутствуют данные по пределу длительной прочности или по условиям эксплуатации необходимо ограничивать деформацию (перемещения).

При отсутствии данных об условном пределе текучести при 1%-ном остаточном удлинении используют значение условного предела текучести при 0,2%-ном остаточном удлинении.

Допускаемые напряжения для титановых сплавов, а также при отсутствии данных о пределе текучести и длительной прочности для алюминия, меди и их сплавов вычисляют по формуле

$$[\sigma] = \left\{ \frac{R_B}{n_B} \right\}.$$

Для условий испытания сосудов из углеродистых, низколегированных, ферритных, аустенитно-ферритных мартенситных сталей и сплавов на железникелевой основе допускаемое напряжение вычисляют по формуле

$$[\sigma]_{20} = \eta \left\{ \frac{R_{T/20} \text{ или } R_{T0,2/20}}{n_T} \right\},$$

а для сосудов из аустенитных сталей, алюминия, меди и их сплавов

$$[\sigma]_{20} = \eta \left\{ \frac{R_{T0,2/20} \text{ или } R_{T0,1/20}}{n_T} \right\}.$$

Для титановых сплавов, а также при отсутствии данных о пределе текучести и длительной прочности для алюминия, меди и их сплавов допускаемое напряжение для условий испытаний вычисляют по формуле

$$[\sigma]_{20} = \left\{ \frac{R_{B/20}}{n_B} \right\}.$$

Коэффициенты запаса прочности должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 3.6.

Если сосуды и аппараты работают при многократных статических нагрузках, но количество циклов нагружения от давления, стесненности температурных деформаций или других воздействий не превышает  $10^3$ , то такая нагрузка в расчетах на прочность условно считается однократной. При этом при определении числа циклов нагружения не учитывают колебание нагрузки в пределах 15% от расчетной.

### 3.6. Значения коэффициентов запаса прочности

Условия нагружения	Коэффициенты запаса прочности							
	сталей, алюминия, меди и их сплавов				алюминия, меди и их сплавов	алюминиевых литейных сплавов	титанового листового проката и труб	титановых прутков и поковок
	$n_T$	$n_B^*$	$n_d$	$n_{II}$	$n_B$	$n_B$	$n_B$	$n_B$
Рабочие условия	1,5	2,4	1,5	1,0	3,5	7,0	2,6	3,0
Условия гидравлического испытания и монтажа	1,1	—	—	—	1,8	3,5	1,8	1,8
Пневматические испытания	1,2	—	—	—	2,0	3,5	2,0	2,0
Условия монтажа	1,1	—	—	—	1,8	3,5	1,8	1,8

\* Для аустенитной хромоникелевой стали, алюминия, меди и их сплавов  $n_B = 3,0$ .

Для стальных сосудов и аппаратов, работающих при многократных нагрузках с количеством циклов нагружения от давления, стесненности температурных деформаций или других воздействий более  $10^3$  за весь срок эксплуатации следует выполнять проверку на малоцикловую усталость в соответствии с ГОСТ Р 52857.6.

Расчет на прочность цилиндрических обечаек и конических элементов, выпуклых и плоских днищ для условий испытания проводить не требуется, если расчетное давление в условиях испытания будет меньше, чем расчетное давление в рабочих условиях, умноженное на  $1,35 [\sigma]_{20} / [\sigma]$ .

При расчете на прочность сварных элементов сосудов и аппаратов в расчетные зависимости вводят коэффициент прочности сварных швов  $\phi$ , который характеризует прочность сварного шва по отношению к прочности основного металла. Величина коэффициента прочности сварных швов зависит от вида сварного шва, его расположения и отношения длины контролируемых швов к их общей длине. Например, для стыкового или таврового шва с двухсторонним сплошным проваром, выполняемым автоматической или полуавтоматической сваркой при 100%-ном контроле длины шва  $\phi = 1,0$ , при 50%-ном контроле  $\phi = 0,9$ ; при сварке втавр с конструктивным зазором свариваемых деталей при тех же условиях контроля соответственно  $\phi = 0,9$  и  $0,65$ . Значения коэффициентов прочности сварных швов приведены в табл. 3.7.

Для бесшовных элементов сосудов и аппаратов  $\phi = 1$ .

При расчете сосудов и аппаратов необходимо учитывать прибавку «с» к расчетным толщинам элементов сосудов и аппаратов. Исполнительную толщину стенки  $s$  элемента сосуда или аппарата определяют по формуле

$$s \geq s_p + c, \quad (3.16)$$

где  $s_p$  – расчетная толщина стенки элемента сосуда или аппарата, м.

Прибавка к расчетной толщине стенки

$$c = c_1 + c_2 + c_3,$$

где  $c_1$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, м;  $c_2$  – прибавка на минусовой допуск, м;  $c_3$  – технологическая прибавка, м.

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии

$$c_1 = \Pi \tau_a + c_3,$$

где  $\Pi$  – проницаемость среды в материал (скорость коррозии), м/год;  $\tau_a$  – расчетный срок службы аппарата, год;  $c_3$  – прибавка для компенсации эрозии, м.

Прибавка для компенсации эрозии  $c_3$  учитывается обычно лишь в следующих случаях: при движении среды в аппарате со значительными скоростями (для жидких более 20 м/с, для газообразных более 100 м/с); наличии в движущейся среде абразивных частиц; ударном воздействии среды на элемент.

### 3.7. Коэффициенты прочности сварных швов для стальных сосудов и аппаратов

Вид сварного шва и способ сварки	Коэффициент прочности сварных швов для стальных сосудов и аппаратов при длине контролируемых швов от общей длины составляет	
	100%*	10 до 50%*
Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой	1,0	0,9
Стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый вручную	1,0	0,9
Стыковой, доступный сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металлическую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу	0,9	0,8
Втавр, с конструктивным зазором свариваемых деталей	0,8	0,65
Стыковой, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны	0,9	0,65

\* Объем контроля определяется техническими требованиями на изготовление.

Проницаемость  $\Pi$  определяют по справочным данным или из экспериментальных исследований. Для изготовления оборудования применяют материалы, у которых скорость коррозии  $\Pi \leq 0,1$  м/год. Рекомендуется принимать при  $\Pi \leq 0,05 \cdot 10^{-3}$  м/год прибавку на коррозию и эрозию  $c_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  м, а при отсутствии данных о проницаемости для материалов, стойких в данной среде,  $c = 2 \cdot 10^{-3}$  м. При двухстороннем контакте с коррозионной или эрозионной средой прибавку  $c_1$  соответственно необходимо увеличивать. Прибавку на минусовое значение предельного отклонения по толщине листа  $c_2$ , из которого изготавливается элемент сосуда или аппарата, принимается по соответствующему стандарту на сортамент.

Технологическая прибавка  $c_3$  предусматривает компенсацию утонения стенки сосуда или аппарата при технологических операциях – вытяжке, штамповке, гибке и т.д. Прибавки  $c_2$  и  $c_3$  учитываются в тех случаях, когда их суммарное значение превышает 5% номинальной толщины листа.

При расчете эллиптических днищ, изготавливаемых штамповкой, прибавку  $c_2$  не учитывают, если ее значение не превышает 15% исполнительной толщины листа. Исполнительная толщина стенки, определенная по формуле (3.16), округляется в большую сторону до стандартной толщины листа.

### **Цилиндрические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением**

Расчетная толщина стенки гладкой цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением

$$s_R = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p}, \quad (3.17)$$

где  $p$  – расчетное внутреннее избыточное давление, МПа;  $D$  – внутренний диаметр обечайки, м;  $\varphi_p$  – коэффициент прочности продольного сварного шва.

Исполнительную толщину стенки рассчитывают по формуле (3.16) и округляют до ближайшего большего стандартного значения толщины листа.

Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s - c)}{D + (s - c)}. \quad (3.18)$$

Данные расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру  $(s - c)/D \leq 0,1$  для обечаек и труб при  $D \geq 200$  мм и  $(s - c)/D \leq 0,3$  для труб при  $D < 200$  мм.

Толщину стенки элементов сосудов и аппаратов, работающих под наливом или атмосферном давлении, выбирают из конструктивных или технологических соображений с последующей проверкой на прочность и устойчивость. С учетом технологии изготовления, жесткости и качества сварных швов не рекомендуется принимать исполнительную толщину стенки сосуда или аппарата менее 3 мм.

### **Обечайки, нагруженные наружным давлением**

В большинстве случаев нагруженными наружным давлением оказываются обечайки аппаратов, работающих под вакуумом, а также аппаратов, снабженных водяной или паровой рубашкой, давление в которой выше давления в аппарате. В результате действия наружного давления может произойти потеря первоначальной геометрической формы аппарата, называемое потерей устойчивости формы. При этом на поверхности обечайки образуются продольные вмятины и она теряет свою цилиндрическую форму. Следует отметить, что потеря устойчивости происходит при напряжениях в стенке значительно меньших предела текучести.

Расчетную толщину стенки цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением, определяют предварительно по зависимости:

$$s_R = \max \left\{ 1,06 \frac{10^{-2} D}{B} \left( \frac{p}{10^{-5} E} \frac{l}{D} \right)^{0,4}; \frac{1,2 p D}{2[\sigma] - p} \right\}, \quad (3.19)$$

где коэффициент  $B$  вычисляют по формуле

$$B = \max \left\{ 1,0; 0,47 \left( \frac{p}{10^{-5} E} \right)^{0,067} \left( \frac{l}{D} \right)^{0,4} \right\}.$$

Исполнительную толщину стенки определяют по формуле (3.16) с обязательной последующей проверкой по допускаемому наружному давлению

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}}, \quad (3.20)$$

где допускаемое давление из условия прочности

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)},$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E D}{n_y B_1} \frac{D}{l} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5}, \quad (3.21)$$

где  $B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\}$ ;  $n_y$  – коэффициент запаса устойчивости (принимается равным  $n_y = 2,4$  – для условий эксплуатации,  $n_y = 1,8$  – для условий испытания);  $E$  – модуль продольной упругости материала, МПа;  $l$  – расчетная длина обечайки, м.

При определении расчетной длины обечайки  $l$  необходимо учитывать длину примыкающего элемента  $l_3$  (рис. 3.11, в, з):

– для выпуклых днищ

$$l_3 = \frac{H}{3};$$

– для конических обечаек или днищ без отбортовки, но не более длины конического днища

$$l_3 = D/6 \operatorname{tg} \alpha;$$

– для конических обечаек или днищ с отбортовкой, но не более длины конического днища

$$l_3 = \max \{ r \sin \alpha; D/6 \operatorname{tg} \alpha \},$$

где  $r$  – внутренний радиус отбортовки, м.

Приведенные расчетные формулы могут быть использованы при условии, что расчетная температура не превышает значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии точных данных эти формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380 °С, из низколегированной – 420 °С, из аустенитной – 525 °С.

### Обечайки, нагруженные осевым растягивающим усилием

Расчетную толщину стенки следует определять по формуле

$$s_R = \frac{F}{\pi D [\sigma] \varphi_T},$$

где  $F$  – осевое растягивающее усилие, МН;  $\varphi_T$  – коэффициент прочности кольцевого сварного шва.

Исполнительная толщина стенки рассчитывается по формуле (3.16). Допускаемое осевое сжимающее усилие

$$[F] = \pi(D + s - c)(s - c)[\sigma] \varphi_T.$$

### Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием

Осевое сжимающее усилие также может привести к потере устойчивости обечайки. Однако, характер деформаций при этом будет иной, волны образуются вдоль стенки обечайки, нарушая ее прямолинейность.

Допускаемое осевое сжимающее усилие рассчитывается по зависимости

$$[F] = \frac{[F]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_p}{[F]_E}\right)^2}}, \quad (3.22)$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_p = \pi(D + s - c)(s - c)[\sigma], \quad (3.23)$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости:

$$[F]_E = \min\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\}. \quad (3.24)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие  $[F]_{E1}$  определяют из условия местной устойчивости в пределах упругости по зависимости

$$[F]_{E1} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5},$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие  $[F]_{E2}$  из условия общей устойчивости в пределах упругости рассчитывается по формуле

$$[F]_{E2} = \frac{\pi(D + s - c)(s - c)E}{n_y} \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2.$$

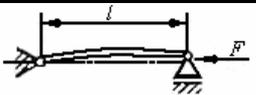
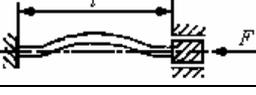
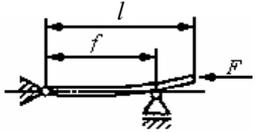
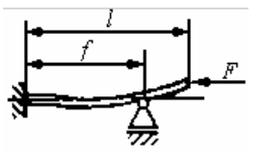
Гибкость  $\lambda$  определяют по уравнению

$$\lambda = \frac{2,83l_{пр}}{D + s - c},$$

Расчетную длину  $l_{пр}$  принимают в соответствии с расчетной схемой (табл. 3.8).

Приведенные расчетные зависимости применимы при  $l/D \geq 10$ . В случае  $l/D < 10$  формула (3.24) принимает вид  $[F]_E = [F]_{E1}$ .

### 3.8. Приведенная расчетная длина $l_{пр}$

Расчетная схема	$\frac{F}{l}$	$l_{пр}$
	—	$l$
	—	$2l$
	—	$0,7l$
	—	$0,5l$
	0	$2,00l$
	0,2	$1,73l$
	0,4	$1,47l$
	0,6	$1,23l$
	0,8	$1,06l$
	1,0	$1,00l$
	0	$2,00l$
	0,2	$1,70l$
	0,4	$1,40l$
	0,6	$1,11l$
	0,8	$1,85l$
	1,0	$1,70l$

Для рабочих условий  $n_y = 2,4$  допускаемое сжимающее усилие можно вычислять по формуле

$$[F]_p = \pi(D + s - c)(s - c)[\sigma] \min(\varphi_1; \varphi_2).$$

Коэффициенты  $\varphi_1, \varphi_2$  следует определять по графикам, приведенным на рис. 3.12.

### Обечайки, нагруженные изгибающим моментом

Допускаемый изгибающий момент определяется по зависимости

$$[M] = \frac{[M]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_p}{[M]_E}\right)^2}}, \quad (3.25)$$

где допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_p = \frac{\pi}{4} D(D + s - c)[\sigma],$$

а допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{8,9 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^3 \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5}.$$

Для рабочих условий ( $n_y = 2,4$ ) допускаемый изгибающий момент можно вычислять по формуле

$$[M] = \frac{\pi}{4} D(D + s - c)(s - c)\varphi_3.$$

Коэффициент  $\varphi_3$  следует определять по графику, приведенному на рис. 3.12.

### Обечайки, нагруженные поперечным усилием

Допускаемое поперечное усилие определяется по зависимости:

$$[Q] = \frac{[Q]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_p}{[Q]_E}\right)^2}}, \quad (3.26)$$

где допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_p = 0,25[\sigma]\pi D(s - c),$$

а допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2,4E(s - c)^2}{n_y} \left[ 0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l^2} \right].$$

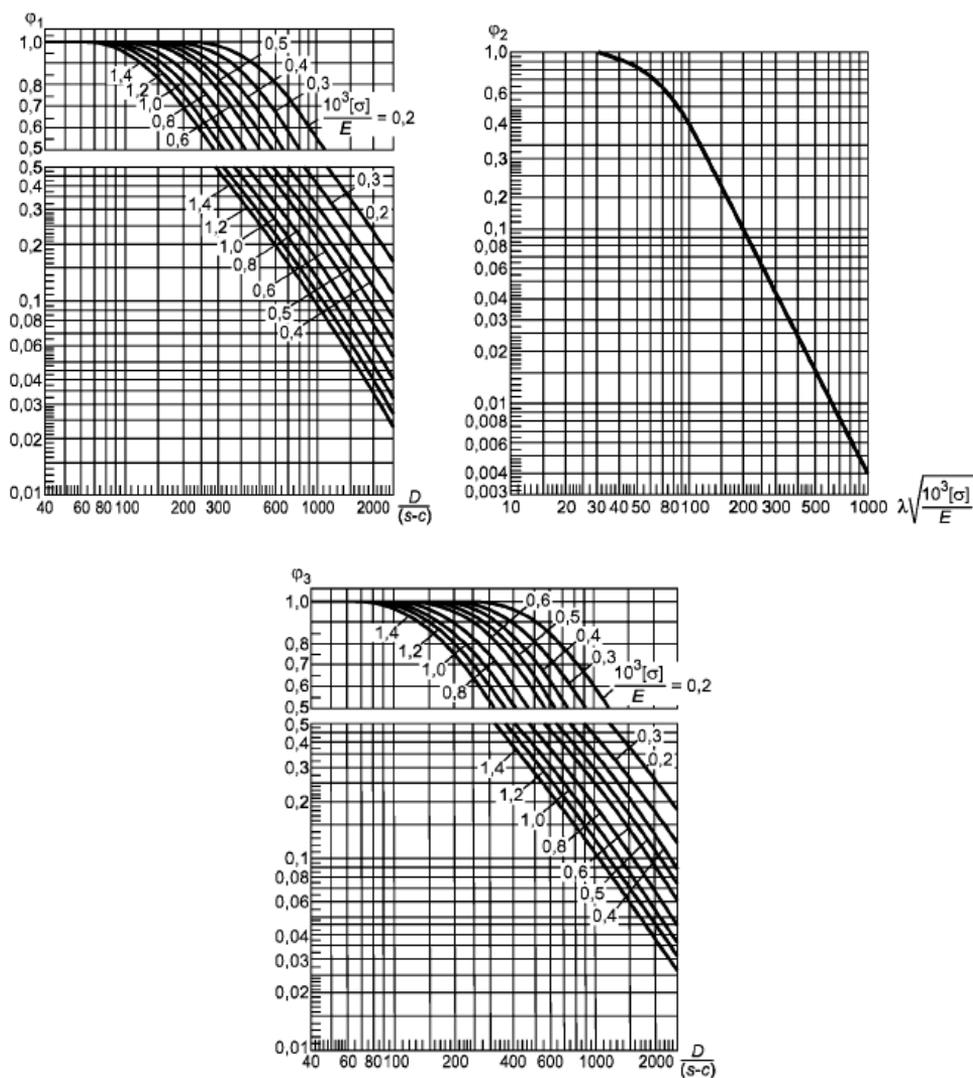


Рис. 3.12. График для определения коэффициента  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$

**Обечайки, работающие под совместным действием  
наружного давления, осевого сжимающего усилия,  
изгибающего момента и поперечного усилия**

Примером совместного действия всех силовых факторов может служить колонный вакуумный аппарат, установленный на открытой площадке. Помимо наружного давления, обусловленного действием внешнего барометрического давления, он будет нагружен осевым сжимающим усилием от собственного веса, ветровым изгибающим моментом и поперечным усилием, обусловленным реакцией трубопроводов.

Проверку на устойчивость при совместном нагружении осуществляют по формуле

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1, \quad (3.27)$$

где  $[p]$ ,  $[F]$ ,  $[M]$ ,  $[Q]$  – соответственно допускаемые наружное давление, осевое сжимающее усилие, изгибающий момент и поперечное усилие, определяемые по зависимостям, приведенным выше.

При отсутствии какого-либо силового фактора расчет выполняют по формуле (3.27), в которую подставляют нулевое значение силового фактора. Обечайка должна быть проверена на устойчивость в наиболее опасных сечениях, в сечениях где имеет место изменение диаметра или толщины стенки, в наиболее ослабленных отверстиями сечениях.

### Обечайки с кольцами жесткости

В ряде случаев для увеличения прочности и обеспечения устойчивости целесообразно не увеличивать толщину стенки, а подкреплять обечайку кольцами жесткости (рис. 3.13). Это позволяет снизить массу аппарата, а, следовательно, и его стоимость.

Кольца жесткости выполняют из профильного проката (прямоугольный профиль, швеллер, уголок) в виде бандажей и устанавливают с внутренней или наружной стороны обечайки. Наиболее целесообразно располагать кольца с той стороны обечайки, которая подвергается меньшему коррозионному износу.

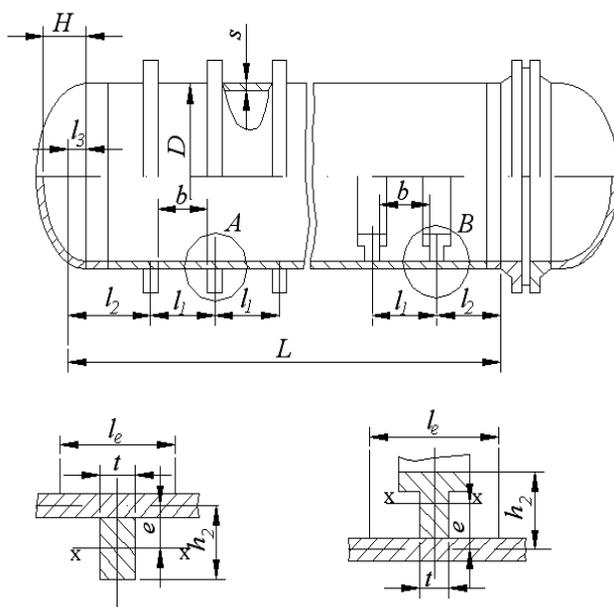


Рис. 3.13. Цилиндрическая обечайка, подкрепленная кольцами жесткости

Приваривают кольца жесткости обычно прерывистым швом с каждой стороны кольца так, чтобы общая длина каждого шва составляла не менее половины длины наружной окружности кольца жесткости.

### Обечайки с кольцами жесткости, нагруженные внутренним избыточным давлением

Для определения необходимости укрепления обечайки кольцами жесткости служит коэффициент

$$K_4 = \frac{p(D + s - c)}{2[\sigma]\varphi_p(s - c)} - 1.$$

Если  $K_4 \leq 0$ , то укрепление обечайки кольцами жесткости не требуется. В диапазоне  $0 < K_4 < 2\varphi_T/\varphi_p - 1$  расстояние между двумя кольцами жесткости рассчитывается по формуле

$$b \leq \sqrt{D(s - c) \left[ \frac{2}{K_4} - \frac{\varphi_p}{\varphi_T} \left( 1 + \frac{1}{K_4} \right) \right]},$$

где площадь поперечного сечения кольца

$$A_k \geq l_1(s - c) \frac{[\sigma]\varphi_p}{[\sigma]_k \varphi_k} K_4,$$

здесь  $[\sigma]_k$  – допускаемое напряжение материала кольца жесткости, МПа;  $\varphi_k$  – коэффициент прочности сварного шва кольца жесткости и обечайки.

При определении площади поперечного сечения кольца жесткости следует учитывать прибавку  $c_1$  для компенсации коррозии. Высота кольца жесткости должна выбираться таким образом, чтобы выполнялось требование  $h_2/D \leq 0,2$ . В случаях, когда кольца жесткости установлены неравномерно, значения  $b$  и  $l_1$  необходимо подставлять для того участка, на котором расстояние между двумя соседними кольцами жесткости максимальное (если  $l_2 > l_1$ , то в качестве расчетной длины принимается  $l_2$ ) (рис. 3.14).

Если  $K_4 > 2\varphi_T/\varphi_p - 1$ , то толщину стенки обечайки необходимо увеличить до такого размера, чтобы выполнялось условие  $0 < K_4 < 2\varphi_T/\varphi_p - 1$ .

Допускаемое внутреннее избыточное давление определяется из условия

$$[p] = \min\{[p]_1; [p]_2\},$$

где допускаемое внутреннее избыточное давление, определяемое из условий прочности всей обечайки,

$$[p]_1 = \frac{2[\sigma]\varphi(s - c) + 2\frac{A_k}{l_1}[\sigma]_k \varphi_k}{D + (s - c)}, \quad (3.28)$$

а допускаемое внутреннее избыточное давление из условий прочности обечайки между двумя соседними кольцами жесткости

$$[p]_2 = \frac{2[\sigma]\varphi_T(s-c)}{D+(s-c)} \frac{2+\lambda_n^2}{1+\frac{\varphi_T}{\varphi_p}\lambda_n^2},$$

где  $\lambda_n^2 = \frac{b^2}{D(s-c)}$ .

Прочность всей обечайки целесообразно повышать увеличением площади поперечного сечения колец жесткости, а прочность обечайки между кольцами жесткости – уменьшением расстояния между двумя смежными кольцами жесткости.

### Обечайки с кольцами жесткости, нагруженные наружным давлением

Допускаемое наружное давление определяют из условия

$$p = \min\{[p]_1; [p]_2\}.$$

Допускаемое наружное давление, определяемое из условий устойчивости всей обечайки, будет рассчитываться по зависимости

$$[p]_1 = \frac{[p]_{1p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{1p}}{[p]_{1E}}\right)^2}},$$

где допускаемое наружное давление  $[p]_{1p}$  соответствует величине  $[p]_1$ , рассчитанной по зависимости (3.28) при значениях коэффициентов  $\varphi_p = 1,0$  и  $\varphi_T = 1,0$ , а допускаемое наружное давление  $[p]_{1E}$  из условий устойчивости в пределах упругости определяется по зависимости

$$[p]_{1E} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E D}{kB_2 n_y} \left[ \frac{100k(s-c)}{D} \right]^{2,5},$$

где  $B_2 = \min\left\{1,0; 9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100k(s-c)}}\right\}$ .

Коэффициент жесткости  $k$  обечайки, подкрепленной кольцами жесткости, рассчитывается по уравнению

$$k = \sqrt{\frac{10,9I}{l_1(s-c)^2}},$$

где эффективный момент инерции расчетного поперечного сечения кольца жесткости равен

$$I = I_k + \frac{l_1(s-c)^3}{10,9} + e^2 \frac{A_k l_e (s-c)}{A_k + l_e (s-c)}.$$

Здесь  $I_k$  – момент инерции кольца жесткости относительно центральной оси  $x-x$  (рис. 3.14),  $m^4$ ;  $e$  – расстояние между центром тяжести поперечного сечения кольца жесткости и срединной поверхностью обечайки, м;  $l_e = \min\{l_1; t + 1,1\sqrt{D(s-c)}\}$  – эффективная длина стенки обечайки, учитываемая при определении эффективного момента инерции, м;  $t$  – ширина поперечного сечения кольца жесткости в месте его приварки к обечайке, м.

Допускаемое наружное давление, определяемое из условий устойчивости обечайки между кольцами жесткости  $[p]_2$ , соответствует давлению  $[p]$  в формуле (3.20) при условии  $l = \max\{b; l_1 - t/2\}$  в уравнении (3.21).

### Днища и крышки приварные

Днищем называют элемент сосуда или аппарата, ограничивающий корпус снизу, сверху или с боков (в зависимости от положения аппарата) и разъемно или неразъемно связанный с ним. Днища, также как и обечайки, являются одним из основных элементов аппарата. Чаще днища крепятся к корпусам неразъемно с помощью сварки, реже – разъемно на фланцах.

В литых аппаратах днища обычно отливают вместе с корпусом. Форма днища зависит от способа изготовления, нагрузки, которое оно должно воспринимать, а также его назначения – должно оно только ограничивать корпус аппарата или обеспечивать какую-либо дополнительную функцию (например, вывод из аппарата сыпучих материалов). В сосудах и аппаратах применяют стандартные или нормализованные днища: полусферические, эллиптические, торосферические, сферические неотбортованные, конические отбортованные и неотбортованные, плоские.

### Полусферические и эллиптические днища

Полусферические (полушаровые) днища целесообразно применять в аппаратах больших диаметров ( $D \geq 4000$  мм), работающих под избыточным давлением свыше 0,07 МПа. Стандартные стальные полушаровые днища изготавливаются с внутренним базовым диаметром  $D = 3600 \dots 12\,000$  мм и толщиной стенок 10...36 мм. Изготавливаются полушаровые днища сварными из штампованных лепестков и шарового сегмента рис. 3.14.

Для крупногабаритных полушаровых днищ отдельные лепестки до штамповки в плоском состоянии могут свариваться из нескольких частей. Количество лепестков выбирается исходя из размеров листа и рационального раскроя. Если по центру днища устанавливается штуцер, то шаровой сегмент допускается не изготавливать. Минимальное расстояние между меридиональными швами  $l_1$  в месте их примыкания к шаровому сегменту или штуцеру, должно быть более

трехкратной толщины днища, но не менее 100 мм. При расположении отверстий в выпуклых днищах расстояние по проекции образующей от края днища до отверстия должно удовлетворять следующим условиям  $l \geq 0,1D_n$  при толщине стенки днища менее 10 мм и  $l \geq (0,09D_n + s)$  при толщине стенки днища  $s \geq 10$  мм (рис. 3.15).

Эллиптические днища благодаря рациональной форме и надежности в работе получили наиболее широкое распространение при изготовлении аппаратов, работающих при давлении до 10 МПа и под вакуумом. Эллиптическое днище состоит из выпуклой части, представляющей в диаметральном разрезе эллипс, и цилиндрической отбортованной части (рис. 3.16). Изготавливаются эллиптические днища штамповкой из плоских круглых заготовок, состоящих из одной или нескольких частей.

В соответствии с ГОСТ 6533 изготавливают днища эллиптические отбортованные стальные с внутренним базовым размером  $D = 400...4500$  мм (толщиной стенки от 4 до 100 мм) и наружным базовым размером  $D_n = 159...720$  мм (толщиной стенки от 4 до 25 мм). Отношение высоты днища к диаметру составляет  $H/D = 0,25$ , а высота отбортовки в зависимости от базового диаметра и толщины стенки составляет от 25 до 120 мм. Отклонение диаметра в цилиндрической части днищ допускается не более  $\pm 1\%$  номинального диаметра, относительная овальность – не более 1%.

*Полусферические и эллиптические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.* Толщину стенки полусферических и эллиптических днищ рассчитывают по формулам

$$s_{1R} = \frac{pR}{2[\sigma]\varphi - 0,5p}; \quad s_1 \geq s_{1R} + c, \quad (3.29)$$

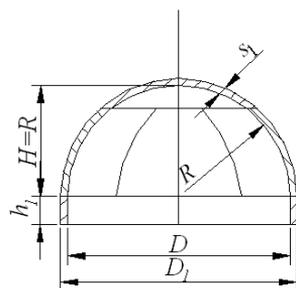
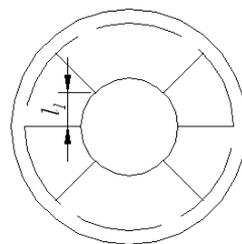


Рис. 3.14. Полушаровое днище

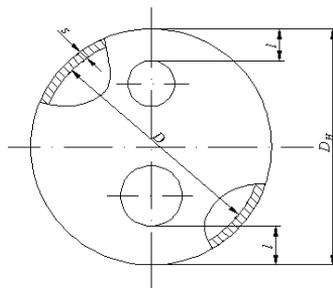


Рис. 3.15. Расположение отверстий в выпуклых днищах

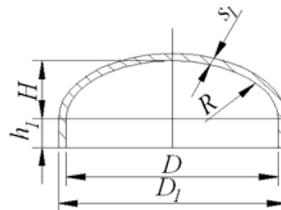


Рис. 3.16. Эллиптическое днище

а допускаемое внутреннее избыточное давление по уравнению

$$[p] = \frac{2(s_1 - c)\varphi[\sigma]}{R + 0,5(s_1 - c)}. \quad (3.30)$$

В этих выражениях радиус кривизны в вершине днища  $R = D^2/4H$ , где  $R = D$  для эллиптических днищ с  $H = 0,25D$  и  $R = 0,5D$  для полусферических днищ с  $H = 0,5D$ .

Если длина отбортованной цилиндрической части днища  $h_1 > 0,8\sqrt{D(s_1 - c)}$  для эллиптического днища и  $h_1 > 0,3\sqrt{D(s_1 - c)}$  для полусферического днища, то толщина днища должна быть не менее толщины стенки обечайки, рассчитанной по зависимостям (3.29) и (3.30) при  $\varphi_p = 1$ . Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент  $\varphi = 1$ , для днищ, изготовленных из нескольких заготовок, коэффициент  $\varphi$  следует определять с учетом вида сварного шва и доли контролируемых сварных швов.

Приведенные расчетные формулы применимы при выполнении условий для эллиптических днищ  $0,002 \leq (s_1 - c)/D \leq 0,1$  и  $0,2 \leq H/D \leq 0,5$ .

*Полусферические и эллиптические днища, нагруженные наружным давлением.* Толщину стенки полусферических и эллиптических днищ приближенно определяют по формулам

$$s_{1R} = \max \left\{ \frac{K_3 R}{161} \sqrt{\frac{n_y p}{10^{-5} E}}; \frac{1,2 p R}{2[\sigma]} \right\}; \quad s_1 \geq s_{1R} + c. \quad (3.31)$$

Для предварительного расчета коэффициент  $K_3$  принимают равным 0,9 для эллиптических днищ и 1,0 для полусферических днищ.

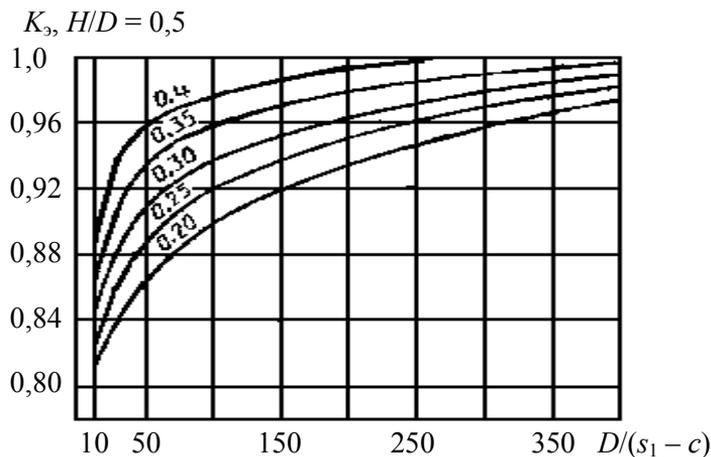


Рис. 3.17. График для определения коэффициента  $K_3$ ,

Допускаемое наружное давление рассчитывают по формуле (3.20), где допускаемое давление из условия прочности  $[P]_p$  определяют по зависимости (3.30), а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{2,6 \cdot 10^{-5} E}{n_y} \left[ \frac{100(s_1 - c)}{K_3 R} \right]^2, \quad (3.32)$$

где коэффициент  $K_3$  определяют по номограмме (рис. 3.17) или по формуле зависимости от отношений  $D/(s_1 - c)$  и  $H/D$ :

$$K_3 = \frac{1 + (2,4 + 8x)x}{1 + (3,0 + 10x)x},$$

где  $x = 10 \frac{s_1 c}{D} \left( \frac{D}{2H} - \frac{2H}{D} \right)$ .

Приведенные расчетные зависимости применимы при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии данных их можно принимать 380 °С для днищ из углеродистой стали, 420 °С – низколегированной и 525 °С – аустенитной.

*Торосферические днища.* Торосферические днища (или как их еще часто называют – коробовые) представляют собой часть сферы радиуса  $R$  плавно отбортованную на цилиндр радиусом торового перехода  $r_1$  (рис. 3.18). При этом радиус центральной части днища  $R$  не должен превышать внутреннего диаметра днища, радиус отбортовки  $r$  должен быть не менее  $0,095D$ , а высота выпуклой части  $H$  не менее  $0,2D$ . Напряжения в переходной части днища могут значительно превышать напряжения в его центральной части, при этом степень концентрации напряжений будет тем больше, чем меньше отношение  $r/D$ . По этой причине торосферические днища уступают в прочностном отношении эллиптическим днищам, в которых распределение напряжений более равномерное вследствие постепенного и непрерывного изменения радиуса кривизны от центра к краю.

В зависимости от соотношения параметров  $R$ ,  $D_1$ ,  $r_1$  приняты следующие типы торосферических днищ: тип  $A$  –  $R = D_1$ ,  $r \geq 0,095D_1$ ; тип  $B$  –  $R = 0,9D_1$ ,  $r \geq 0,170D_1$ ; тип  $C$  –  $R = 0,8D_1$ ,  $r \geq 0,150D_1$ . Длина отбортованной цилиндрической части  $h_1$  должна составлять не менее 50 мм. Расположение отверстий на торосферических днищах допускается в пределах центрального сферического сегмента, при этом расстояние от наружной кромки отверстия до центра днища, измеряемое по хорде, должно быть не более  $0,4$  наружного диаметра днища.

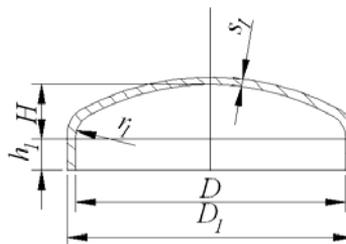


Рис. 3.18. Торосферическое днище

*Торосферические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.*  
Толщина стенки в переходной зоне рассчитывается по формулам

$$s_{1R} = \frac{pD_1\beta_1}{2[\sigma]\varphi}; \quad s_1 \geq s_{1R} + c,$$

где коэффициент  $\beta_1$  определяется в зависимости от типа днища по графику (рис. 3.19).

Для сварных днищ следует дополнительно проверить толщину стенки в центральной зоне по формулам (3.29).

Допускаемое избыточное давление из условия прочности переходной зоны определяется по уравнению:

$$[p] = \frac{2(s_1 - c)\varphi[\sigma]}{D_1\beta_2}, \quad (3.33)$$

где коэффициент  $\beta_2$  определяется в зависимости от типа днища по графику (рис. 3.20).

Для сварных днищ необходимо дополнительно проверить допускаемое избыточное давление из условия прочности центральной зоны по формуле (3.30). За допускаемое давление принимается меньшее из давлений, определяемых по формулам (3.30) и (3.33).

Если длина цилиндрической отбортованной части днища  $h_1 > 0,8\sqrt{D_1(s_1 - c)}$ , то толщина цилиндрической части днища должна быть не меньше толщины обечайки, рассчитанной по зависимостям (3.16) и (3.17) при  $\varphi_p = 1$ .

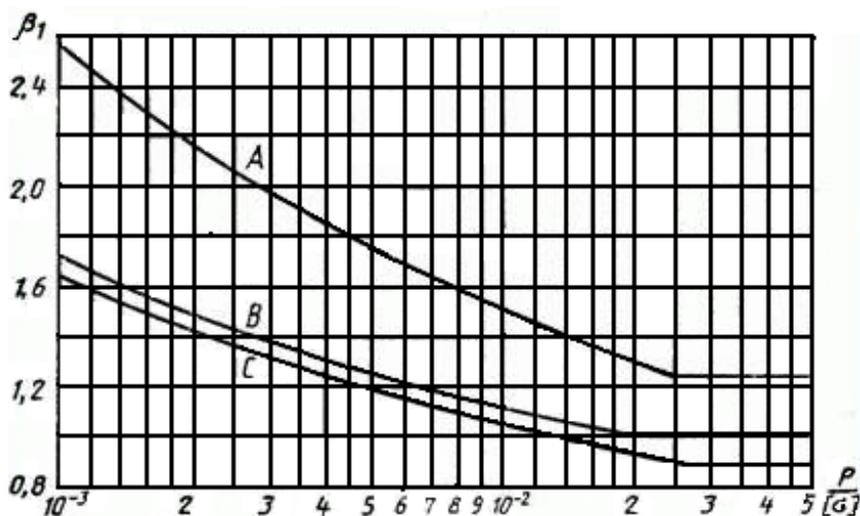
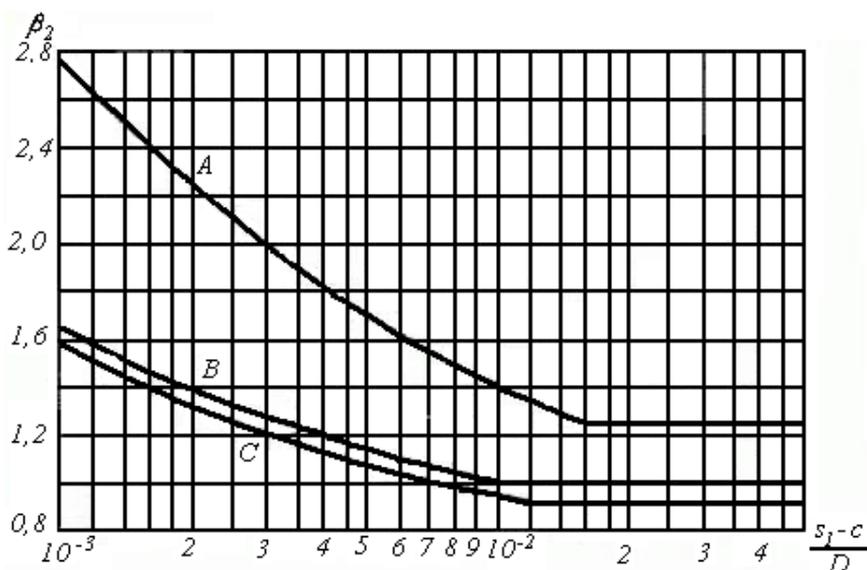


Рис. 3.19. Графики для определения коэффициента  $\beta_1$

Рис. 3.20. Графики для определения коэффициента  $\beta_2$ 

*Торосферические днища, нагруженные наружным давлением.* Торосферические днища, нагруженные наружным давлением, следует рассчитывать по приведенным выше зависимостям при значении коэффициента  $K_3 = 1,0$ .

### *Сферические неотбортованные днища*

Сферические неотбортованные днища представляют собой шаровой сегмент, который приваривается непосредственно к обечайке или фланцу (рис. 3.21). Радиус сферы днища  $R$  должен быть не более внутреннего диаметра обечайки  $D$  и не менее  $0,85D$ . Днища весьма просты по конструкции, но основным недостатком их являются значительные краевые напряжения, возникающие в месте соединения днища с обечайкой, которые могут в несколько раз превосходить напряжения в центральной части днища. Сферические неотбортованные днища допускается применять только в сосудах и аппаратах, работающих под наливом или нагруженных внутренним избыточным давлением, не превышающим  $0,07$  МПа. В аппаратах, работающих при давлении свыше  $0,07$  МПа или под вакуумом, данные днища допускается применять только в качестве элемента фланцевых крышек. Соединение их с обечайкой должно осуществляться сварным швом со сплошным проваром.

Толщину стенки сферического неотбортованного днища определяют методом последовательных приближений.

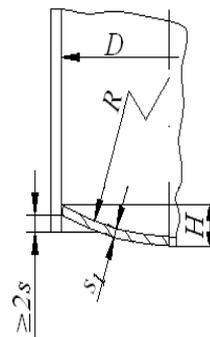


Рис. 3.21. Сферическое неотбортованное днище

Предварительно толщину стенки вычисляют по формуле

$$s_{1R} = \frac{pR}{2[\sigma]\varphi - p}, \quad s_1 \geq s_{1R} + c, \quad (3.34)$$

а затем по формуле

$$s''_{1R} = \frac{pD\beta}{2[\sigma]\varphi - p}. \quad (3.35)$$

Расчет проводят до тех пор, пока разница между полученным значением  $s''_{1R}$  и принятым  $s_1$  при определении коэффициента  $\beta$  не будет превышать 5%. В качестве расчетной толщины стенки днища или крышки принимают большее из двух значений.

Допускаемое внутреннее избыточное давление определяют по формуле

$$p = \min\{[p]_1; [p]_2\},$$

где  $[p]_1$  – допускаемое избыточное давление из условия прочности краевой зоны:

$$[p]_1 = \frac{2(s_1 - c)\varphi_T[\sigma]}{D\beta + (s_1 - c)},$$

$[p]_2$  – допускаемое избыточное давление из условия прочности центральной зоны:

$$[p]_2 = \frac{2(s_1 - c)\varphi[\sigma]}{R + (s_1 - c)}.$$

Коэффициент  $\beta$  определяют в соответствии с ГОСТ Р 5287.2 в зависимости от конструкции днища.

*Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные наружным давлением.* Толщину стенки сферического сегмента днища или крышки предварительно вычисляют по формулам (3.34) и (3.35) с последующей проверкой по формулам (3.36) – (3.38).

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}}, \quad (3.36)$$

где  $[p]_p$  – допускаемое наружное давление из условия прочности в центральной зоне:

$$[p]_p = \frac{2(s_1 - c)[\sigma]_1}{R + (s_1 - c)}; \quad (3.37)$$

$[p]_E$  – допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости:

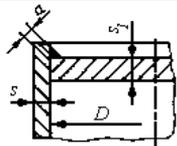
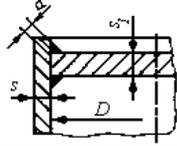
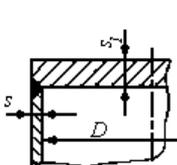
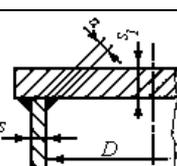
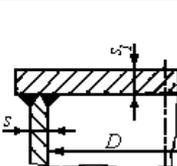
$$[p]_E = \frac{K_C}{n_y} E \left( \frac{s_1 - c}{R_C} \right)^2. \quad (3.38)$$

Коэффициент  $K_C$  определяют по ГОСТ Р 5287.2 в зависимости от параметра  $R_C / (s_1 - c)$ .

**Плоские круглые днища**

Плоские днища представляют собой круглые пластины, приваренные к обечайке. Некоторые конструкции плоских днищ и способы соединения их с обечайкой представлены в табл. 3.9.

**3.9. Конструкции плоских днищ**

Тип	Чертеж	Условия закрепления днищ и крышек	$K$
1		$a > 1,7s$ $D_R = D$	0,53
2		$a > 0,85s$ $D_R = D$	0,50
3		$\frac{s - c}{s_1 - c} < 0,25$ $\frac{s - c}{s_1 - c} \geq 0,25$ $D_R = D$	0,45 0,41
4		$a > 0,85s$ $D_R = D$	0,50
5		$\frac{s - c}{s_1 - c} < 0,5$ $\frac{s - c}{s_1 - c} \geq 0,5$ $D_R = D$	0,41 0,38

В прочностном отношении они менее совершенны, чем описанные выше типы днищ. Поэтому плоские днища применяют обычно в аппаратах, работающих под атмосферным или небольшим избыточным давлением. В аппаратах, работающих под давлением они обычно используются только в тех случаях, когда это обусловлено какими либо конструкционными особенностями, необходимостью размещения внутренних устройств (например, трубные решетки теплообменников), а также в качестве крышек люков и заглушек. Плоские днища больших диаметров при необходимости могут быть укреплены элементами жесткости (ребрами), которые привариваются по радиусу от центрально расположенного кольца или параллельно диаметру. Плоские днища, применяемые в сосудах 1, 2, 3, 4-й групп (табл. 3.5), изготавливают из поковок.

### *Расчет плоских круглых днищ*

Толщина днищ, работающих под внутренним избыточным или наружным давлением, рассчитывается по формулам:

$$s_{1R} = KK_0 D_R \sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}}; \quad s_1 \geq s_{1R} + c, \quad (3.39)$$

где  $D_R$  – расчетный диаметр днища, м.

Коэффициент  $K$  в зависимости от конструкции днища и способа его соединения с обечайкой выбирают по табл. 3.8. Для других конструкций днищ значения коэффициента  $K$  приведены в ГОСТ Р 5287.2.

Коэффициент ослабления днища отверстиями  $K_0$  для днищ, имеющих одно отверстие определяют по формуле

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_R} + \left(\frac{d}{D_R}\right)^2},$$

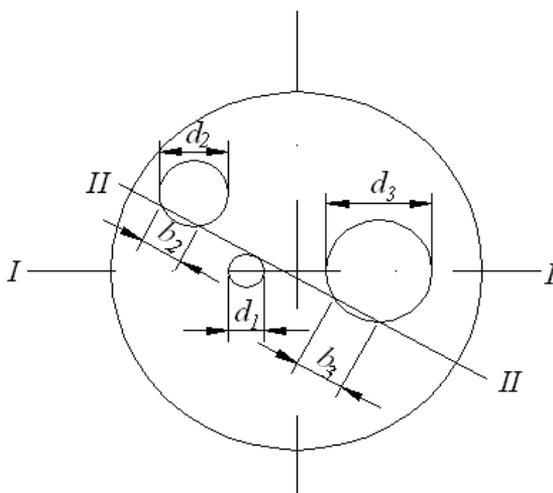
а для днищ, имеющих несколько отверстий по формуле

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \sum \left(\frac{d_i}{D_R}\right)^3}{1 - \sum \left(\frac{d_i}{D_R}\right)}}.$$

Коэффициент  $K_0$  определяют для наиболее ослабленного сечения. Максимальную сумму длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральной сечении днища определяют по рис. 3.22 по формуле  $\sum d_i = \max\{(d_1 + d_2); (b_1 + b_2)\}$ . Для днищ без отверстий значение коэффициента  $K_0$  принимают равным 1,0.

Допускаемое давление на плоское днище рассчитывают по уравнению

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{KK_0 D_R}\right)^2 [\sigma] \varphi. \quad (3.40)$$



### 3.22. Пример расположения отверстий в плоских днищах

Приведенные формулы применимы для расчета плоских днищ при условии  $(s_1 - c)/D_R \leq 0,11$ . Если данное условие не выполняется, то величина допускаемого давления, определенного по формуле (3.40), должна быть умножена на поправочный коэффициент

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \frac{s_1 - c}{D_R}\right)^2}}$$

При  $K_p[p] < p$  толщину днища следует увеличивать так, чтобы было выполнено условие  $K_p[p] > p$ . Во всех случаях присоединения днища к обечайке минимальная толщина плоского круглого днища должна быть не менее толщины обечайки.

Расчет днищ и крышек плоских круглых с радиальными ребрами жесткости подробно изложен в ГОСТ Р 5287.2.

### *Конические днища*

Конические днища представляют собой усеченные конические обечайки, приваренные расширенной частью к цилиндрической части корпуса. Днища изготавливаются вальцовкой из заготовки, состоящей из цельного или составного листа, и последующей сваркой.

Конические днища обычно применяют в конструкциях вертикальных сосудов и аппаратов, из нижней части которых необходимо выводить сыпучие материалы или вязкие среды. Конические переходы используют для соединения обечайек разных диаметров.

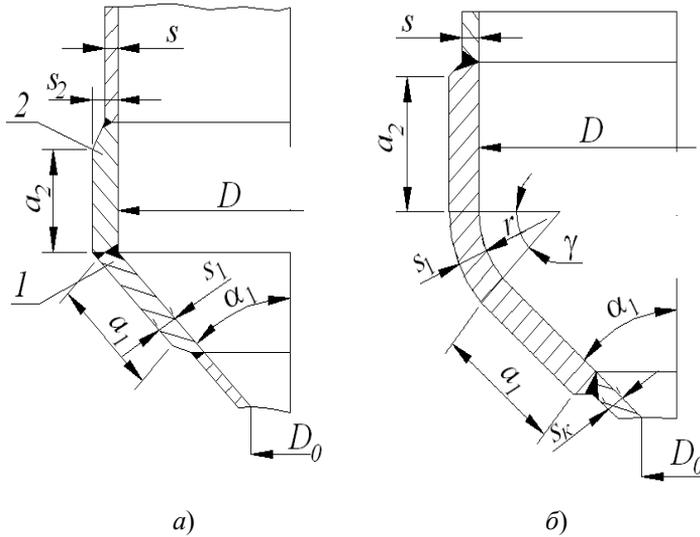


Рис. 3.23. Конические днища:

*a* – неотбортованные; *б* – с тороидальным переходом

Конструктивно конические днища выполняют неотбортованными и отбортованными с тороидальным переходом (рис. 3.23). Днища с тороидальным переходом обеспечивают меньшую концентрацию напряжений в переходной зоне, поэтому в аппаратах, работающих под давлением более 0,07 МПа используются только отбортованные конические днища с тороидальным переходом. Стандартные конические днища выпускаются с углом при вершине  $2\alpha_1 = 60, 90, 120$  и  $140^\circ$ .

*Конические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.* Толщину стенки гладкой конической обечайки определяют

$$s_{KR} = \frac{pD_K}{2\varphi_p[\sigma] - p \cos \alpha_1} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1}; \quad s_K \geq s_{KR} + c. \quad (3.41)$$

В этих формулах  $D_K$  – расчетный диаметр гладкой конической обечайки. Для днищ без тороидального перехода он определяется как  $D_K = D - 1,4a_1 \sin \alpha_1$ , а для днищ с тороидальным переходом –  $D_K = D - 2[r(1 - \cos \alpha_1) + 0,7a_1 \sin \alpha_1]$ . Расчетные длины переходных частей для конической части  $a_1 = 0,7\sqrt{D(s_1 - c)}/\cos \alpha_1$ ; для цилиндрической части при отсутствии перехода  $a_2 = 0,7\sqrt{D(s_2 - c)}$ , а при наличии тороидального перехода  $a_2 = 0,5\sqrt{D(s_1 - c)}$ .

Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_K - c)}{\frac{D_K}{\cos \alpha_1} + (s_K - c)}. \quad (3.42)$$

Данные расчетные зависимости применимы при соотношении между толщиной стенки обечайки и диаметром в пределах  $0,001 \leq \frac{s_1 \cos \alpha_1}{D} \leq 0,050$ .

Выполнение этого условия для пологого конического днища ( $\alpha_1 > 70^\circ$ ) не требуется. Исполнительные длины переходных частей обечаек должны быть не менее расчетных длин  $a_1$  и  $a_2$ . Приведенные формулы не применимы для расчета на прочность конических переходов в местах крепления рубашки к корпусу.

### **Конические днища, нагруженные наружным давлением**

Толщину стенки в первом приближении вычисляют по формуле

$$s_R = \max \left\{ 1,06 \frac{10^{-2} D_E}{B_1} \left( \frac{p}{10^{-5} E} \frac{l_E}{D_E} \right)^{0,4}; \frac{1,2 p D_k}{2[\sigma]_{\text{фп}} - p} \frac{1}{\cos \alpha_1} \right\}; \quad s_k \geq s_{kR} + c,$$

где эффективная длина и эффективный диаметр конического днища определяются соответственно

$$l_E = \frac{D - D_0}{2 \sin \alpha_1}; \quad D_E = \max \left\{ \frac{D + D_0}{2 \cos \alpha_1}; \frac{D}{\cos \alpha_1} - 0,31(D + D_0) \sqrt{\frac{D + D_0}{s_k - c}} \operatorname{tg} \alpha_1 \right\},$$

а коэффициент  $B_1$

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D_E}{l_E} \sqrt{\frac{D_E}{100(s_k - c)}} \right\}.$$

Допускаемое наружное давление для конического днища рассчитывают по формуле (3.20), где допускаемые давления из условия прочности и условия устойчивости в пределах упругости определяют соответственно по зависимостям (3.41) и (3.21).

### **Расчет толщин переходных элементов**

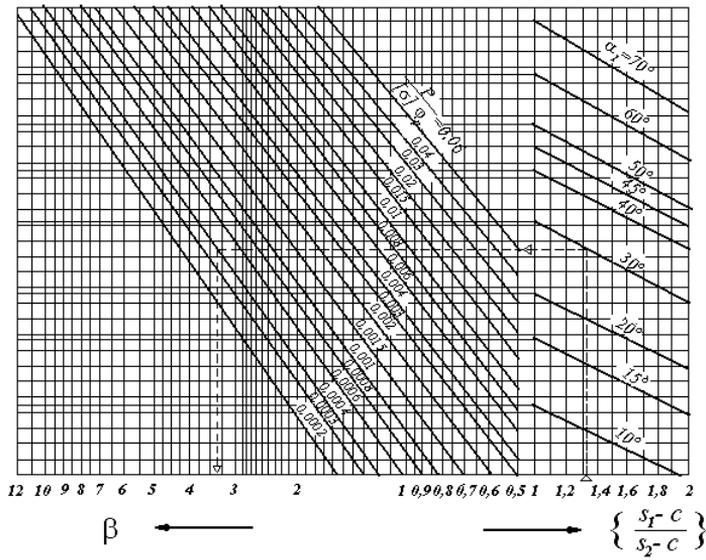
Для днищ без тороидального перехода (рис. 3.23, а) толщину стенки перехода цилиндрической части определяют по формулам

$$s_{2R} = \frac{p D \beta_1}{2[\sigma]_{\text{фп}} - p}; \quad s_2 \geq s_{2R} + c,$$

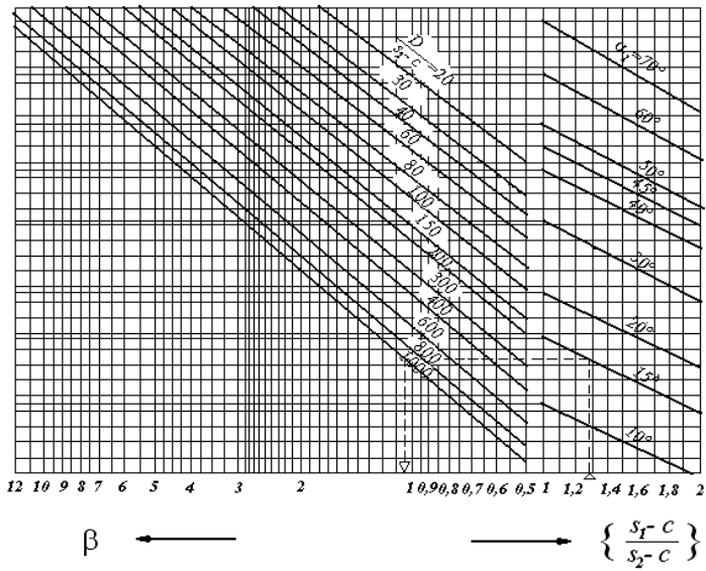
где  $\beta_1 \geq \max\{0,5; \beta\}$  – коэффициент формы.

Значение  $\beta$  может быть определено по диаграмме (рис. 3.24, а). Расчет толщины стенки перехода конического элемента проводят методом последовательных приближений на основании предварительного подбора и последующей проверки отношения

$$s_1 \geq \left\{ \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right\} s_{2R} + c.$$



a)



б)

**Рис. 3.24. Диаграмма для определения коэффициента  $\beta$ :**

*a* – при расчете толщин стенок переходов; *б* – при выполнении проверочного расчета

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части рассчитывают по зависимости

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)},$$

где коэффициент формы  $\beta_1$  определяется в зависимости от коэффициента  $\beta$  (рис. 3.24, б).

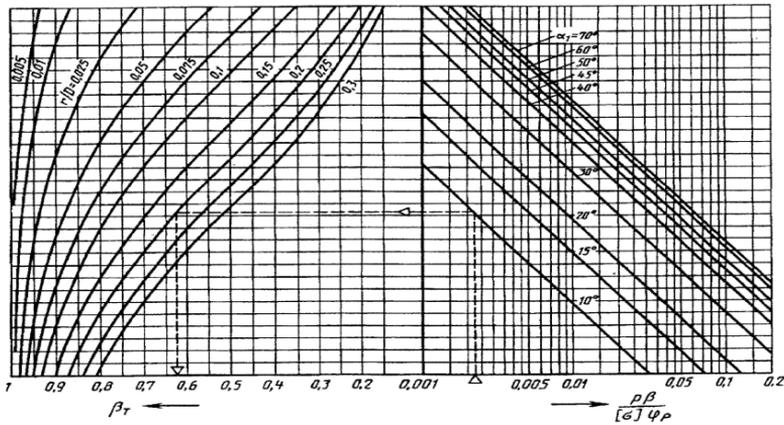
Данные расчетные зависимости применимы при условиях  $\alpha_1 \leq 70^\circ$ ;  $(s_1 - c) \geq (s_2 - c)$ . Если  $(s_1 - c) < (s_2 - c)$ , то при проверочном расчете следует принимать  $(s_1 - c) = (s_2 - c)$ .

Для днища с тороидальным переходом (рис. 3.23, б) толщину стенки перехода рассчитывают по формулам

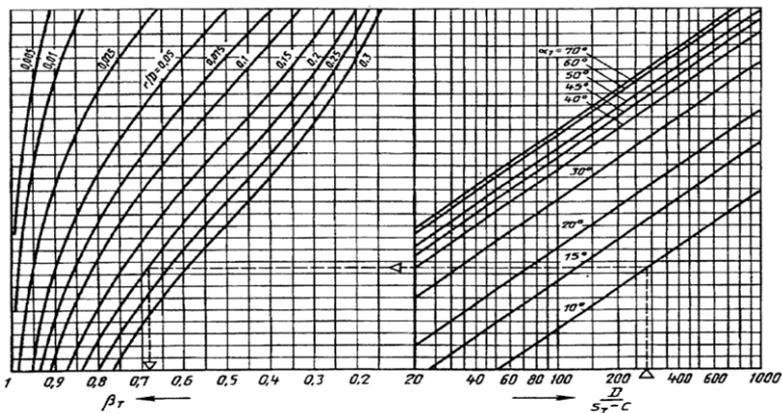
$$s_{1R} = \frac{pD\beta_3}{2\varphi_p[\sigma] - p}; \quad s_1 \geq s_{1R} + c,$$

где  $\beta_3 = \max\{0,5; \beta; \beta_T\}$ .

Коэффициент  $\beta$  определяют по диаграмме (рис. 3.24, а), а коэффициент  $\beta_T$  по диаграмме (рис. 3.25, а).



а)



б)

**Рис. 3.25. Диаграмма для определения коэффициента  $\beta$ :**

а – при расчете толщин стенок переходов; б – при выполнении проверочного расчета

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части рассчитывают по зависимости

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_1 - c)}{D\beta_3 + (s_1 - c)},$$

где коэффициент  $\beta_3$  определяется в зависимости от коэффициентов  $\beta$  (рис. 3.24, а) и  $\beta_T$  (рис. 3.25, б).

Данные расчетные зависимости применимы при условиях  $\alpha_1 \leq 70^\circ$ ,  $0 \leq r/D \leq 0,3$ .

Расчет конических обечаек и днищ с укрепляющими кольцами изложен в ГОСТ Р 5287.2.

### *Конические днища, нагруженные осевыми усилиями*

Толщину стенки гладкого конического днища, нагруженного осевой растягивающей силой определяют по формулам

$$s_{кR} = \frac{F}{\pi D_1 \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1}; \quad s_{кR} \geq s_{кR} + c,$$

а допускаемую растягивающую силу по уравнению

$$F = \pi D_1 (s_{кR} - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1.$$

В случае нагружения гладкого конического днища осевой сжимающей силой определяют ее допускаемое значение по уравнению

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_p}{[F]_E} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_p \right\},$$

где допускаемая осевая сила из условия прочности

$$[F]_p = \pi D_F (s_{кR} - c) [\sigma] \cos \alpha_1, \quad (3.43)$$

а допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости

$$[F]_E = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \left[ \frac{100(s_{кR} - c)}{D_F} \right]^{2,5}. \quad (3.44)$$

В этих уравнениях  $D_F$  – эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии

$$D_F = (0,9D + 0,1D_0) / \cos \alpha_1. \quad (3.45)$$

**Конические днища, нагруженные изгибающим моментом**

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности  $[M] = D_0[F]/4$ , а из условия устойчивости

$$[M] = \frac{[M]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_p}{[M]_E}\right)^2}},$$

где  $[M]_p = D_F[F]_p/4$ ;  $[M]_E = D_F[F]_E/3,5$ .

Значения  $D_F$ ,  $[F]_p$  и  $[F]_E$  определяют по зависимостям (3.43) – (3.45).

*Совместное действие нагрузок.* Условие устойчивости гладких конических днищ нагруженных внешним давлением, осевой силой и изгибающим моментом проверяется по формуле

$$-\frac{p}{[p]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1,$$

где  $[p]$ ,  $[F]$ ,  $[M]$  – соответственно значения допускаемого наружного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента для гладких конических днищ.

Кроме того должна быть выполнена проверка устойчивости от отдельных нагрузок  $p \leq [p]$ ;  $F \leq [F]$ ;  $M \leq [M]$ .

В случае действия внутреннего давления принимают  $p = 0$ .

Другие конструкции конических днищ и обечаек и схемы их нагружения приведены в ГОСТ Р 52857.2.

**3.1.6. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ**

Принципиальную технологическую схему разрабатывают технологи и специалисты по автоматизации на основе эскизной технологической схемы и выбранного оборудования. При этом разрабатываются способы доставки сырья в цех и отгрузки готовой продукции, обезвреживания и удаления отходов производства, обеспечения экологической безопасности и охраны труда, автоматизации производства [1, 4, 5].

Предварительный вариант технологической схемы вычерчивают с соблюдением определенных правил. Аппараты можно изображать без соблюдения масштаба, но с учетом соотношения размеров. Обязательным является распределение их по высотным отметкам. По горизонтали аппаратуру располагают последовательно в соответствии с технологическими стадиями процесса. Расстояние между аппаратами на схеме должно быть таким, чтобы она удобно читалась.

Каждый аппарат изображается упрощенно в виде эскиза, отражающего его принципиальное устройство. Можно также пользоваться условными обозначениями аппаратов. При установке на технологической стадии нескольких однотипных аппаратов, работающих параллельно, изображают один, а число их указывают в экспликации схемы. Для непрерывных процессов при использовании каскада изображают все аппараты.

Основные материальные потоки наносят четкими сплошными линиями с указанием их направления и соответствующей нумерацией, расшифровка которой приводится в правом верхнем углу схемы.

Каждый аппарат на технологической схеме должен иметь номер, который сохраняется во всех частях проекта (технологической, строительной, электротехнической и т.д.). Аппарат на схеме нумеруется слева направо с учетом технологической последовательности.

На технологической схеме обязательно отмечают, откуда и как поступают в цех сырье и вспомогательные материалы, куда и каким способом удаляются готовая продукция, отходы, сточные воды. При большом расходе сырья целесообразно организовать его прием на цеховой склад. В этом случае изображают схему приема сырья в цех (исходная тара, способ разгрузки, приемная емкость). Если для транспортировки сырья и готовой продукции предусмотрен напольный транспорт, это указывают на схеме.

На принципиальной технологической схеме изображают оборудование не только основных, но и вспомогательных технологических стадий (операций) – таких, как подготовка (измельчение, растворение, суспензирование и т.д.) и дозирование сырья, промежуточное хранение продуктов, поглощение отходящих газов и т.п.

На линиях основных и вспомогательных потоков показывают стандартными условными обозначениями арматуру. После изображения всего оборудования и материальных потоков составляется экспликация оборудования. Она содержит номер, обозначение чертежа аппарата, наименование оборудования, основную характеристику, количество аппаратов и конструкционных материалов.

Разработка принципиальной технологической схемы тесно связано с выбором методов автоматического контроля и регулирования технологического процесса. Автоматизация технологической схемы должна обеспечить контроль, регулирование и сигнализацию предельных значений параметров процесса и состояния технологического оборудования, блокировку и установку технологических машин и аппаратов в аварийных ситуациях.

Приборы и средства автоматизации при выполнении принципиальной технологической схемы могут изображаться развернуто или упрощенно [4, 18]. При развернутом изображении на схеме показывают: отборные устройства, датчики, преобразователи, вторичные приборы, исполнительные механизмы, регулирующие и запорные органы, аппаратуру управления и сигнализации, комплектные устройства (управляющие вычислительные машины, телемеханические устройства) и т.д.

При упрощенном изображении на схеме показывают отборные устройства, измерительные и регулирующие приборы, исполнительные механизмы и регулирующие органы.

Приборы, средства автоматизации, электрические, вычислительные и микропроцессорные устройства на принципиальной технологической схеме показываются в соответствии с ГОСТ 21.404–85. Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на принципиальной технологической схеме, присваиваются позиционные обозначения, сохраняющиеся во всех чертежах и материалах

проекта. Отборные устройства для всех постоянно подключенных приборов не имеют специального обозначения, а представляют собой тонкую сплошную линию, соединяющую технологический трубопровод или аппарат с первичным измерительным преобразователем.

Все оборудование (аппараты, насосы, вентиляторы и др.) на схеме необходимо изображать сплошными тонкими линиями толщиной 0,6...0,8 мм, а трубопроводы и арматуру – сплошными линиями в два раза толще, чем оборудование. Условные графические обозначения приборов и средств автоматизации на схемах выполняются линиями толщиной 0,5...0,6 мм, а линии связи – 0,2...0,3 мм (рис. 3.14).

После изображения на технологической схеме всех приборов и средств автоматизации составляется спецификация по форме ГОСТ 21.110–82. Приборы и средства автоматизации записываются в спецификацию группами: для измерения и регулирования температуры, давления и разряжения, расхода, количества, уровня, состава и качества веществ, прочие приборы.

После разработки принципиальной технологической схемы составляют полное описание ее. При описании каждой технологической стадии кратко сообщается о конструкции аппарата, способе загрузки сырья и выгрузке продуктов переработки, дается характеристика протекающего процесса (периодический, непрерывный, циклический), перечисляются основные параметры его (давление, температура и др.), методы контроля и регулирования, а также все отходы и побочные продукты. Кроме того, описываются также принятые в проекте способы внутрицеховой транспортировки сырья, вспомогательных материалов, реакционных масс, отходов и готовых продуктов.

В ходе проектирования в принципиальную технологическую схему могут вноситься изменения и дополнения. Окончательное оформление схемы производится после принятия основных проектных решений и выяснения вопросов, связанных с размещением и взаимным расположением аппаратов в цехе.

Для примера на рис. 3.26 представлен фрагмент принципиальной технологической схемы, разработанной на основе эскизной схемы (стадия ректификации).

Исходная смесь со склада подается в емкость 1, откуда центробежным насосом 2а направляется в кожухотрубчатый подогреватель исходной смеси 3, а затем в среднюю часть ректификационной колонны 4 с колпачковыми тарелками. Колонна имеет встроенный трубчатый кипятильник кубовой жидкости 5. В результате процесса ректификации в колонне получают пары, обогащенные легколетучим компонентом и кубовый остаток с тяжелолетучим компонентом. Пары направляются на конденсацию в кожухотрубчатый дефлегматор 6, затем жидкость поступает в разделитель 7, откуда часть ее (флегма) идет на орошение в колонну, а другая часть в виде целевого продукта направляется через кожухотрубчатый холодильник 8 в емкость 11 и из нее насосом 2г на склад. Кубовый остаток из колонны насосом 2б подается через холодильник 9 в приемную емкость 10, откуда центробежным насосом 2в направляется на склад.

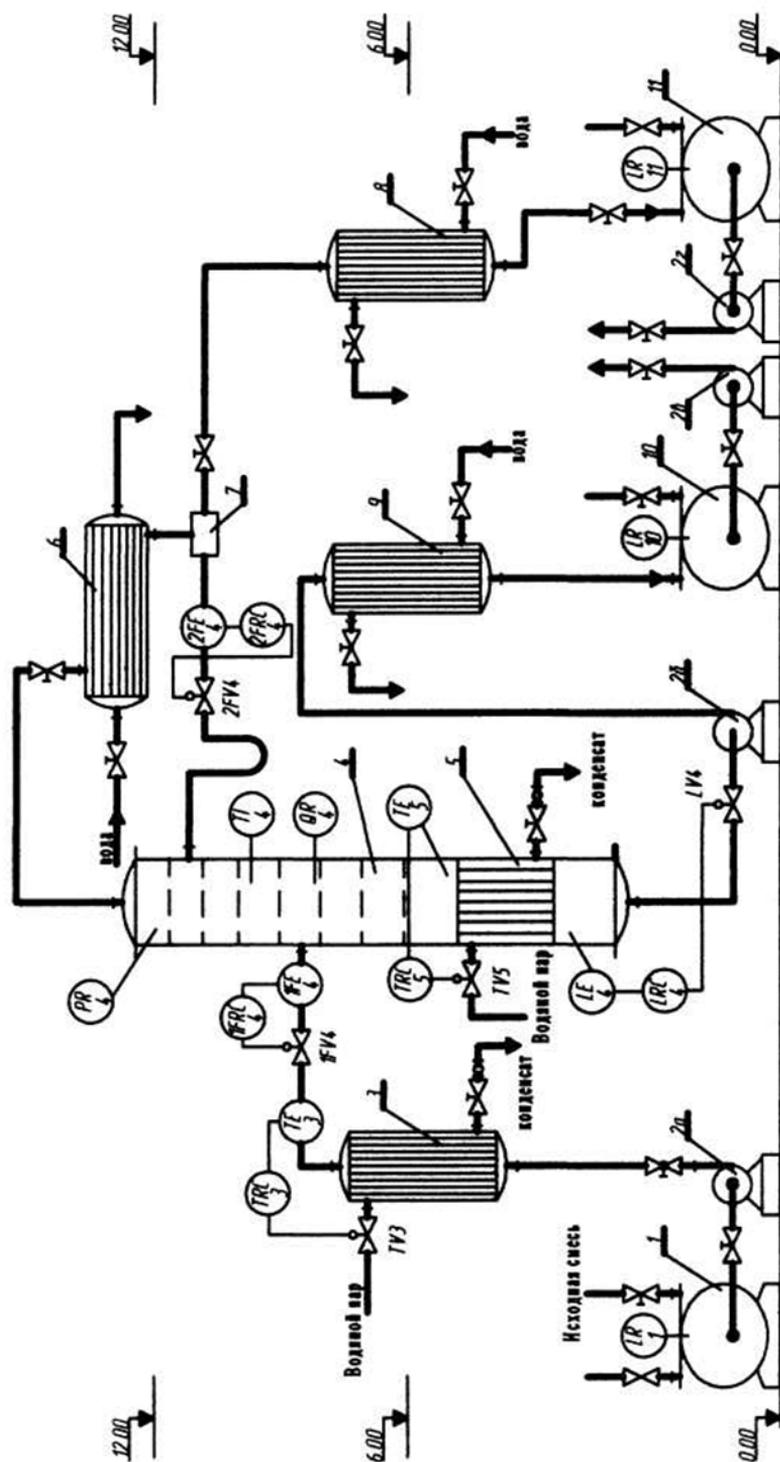


Рис. 3.26. Принципиальная технологическая схема ректификационной установки:

1 – емкость исходной смеси; 2 – насосы исходной смеси (а), кубового остатка (б) и для перекачки продуктов на склад (в, г); 3 – подогреватель исходной смеси; 4 – колонна; 5 – встроенный кипятильник; 6 – дефлегматор; 7 – разделительный стакан; 8 – холодильник кубового остатка; 9 – холодильник кубового остатка; 10 – емкость дистиллята; 11 – емкость кубового остатка

Ранее отмечалось, что при разработке принципиальной технологической схемы выбирают способы удаления отходов. Рассмотрим основные из них.

В дальнейшем под термином «отходы» будем понимать получаемые в технологическом производстве нецелевые продукты, которые не могут быть использованы на данном предприятии, и продукты, которые после соответствующей обработки можно использовать повторно.

Условно отходы технологических производств можно классифицировать следующим образом:

1. *По агрегатному состоянию:*
  - твердые;
  - пастообразные;
  - жидкие;
  - газообразные.
2. *По коррозионной активности:*
  - нейтральные;
  - слабоагрессивные;
  - агрессивные;
  - сильноагрессивные.
3. *По воздействию на живые организмы:*
  - токсичные;
  - нетоксичные.
4. *По характеру выделения:*
  - случайно выделяемые;
  - периодически выделяемые.

Как правило, отходами производства являются: отработанная охлаждающая вода, газообразные отходы, жидкие органические соединения, кислотные или щелочные стоки, условно чистые стоки, хозяйственно-фекальные стоки, пастообразные и твердые отходы.

Для удаления отходов из аппаратов и их обезвреживания необходимо учитывать следующее: во-первых, условия выгрузки необходимо предусматривать при конструировании аппаратов, а на основе агрегатного состояния отходов подбирать способ удаления.

Для выгрузки порошкообразных и гранулированных материалов следует применять пневмотранспорт. Для паст и шламов используется метод разбавления водой или дешевым растворителем. Затем полученную суспензию перекачивают на станцию очистки.

Газообразные отходы удаляются и транспортируются за счет избыточного давления, под которым они, как правило, находятся в аппаратах. Эти отходы направляются на сжигание в печи или на так называемый «факел». Если эти газы безвредны, то они выбрасываются в атмосферу.

Жидкие производственные отходы, в зависимости от их свойств, удаляются по одной из следующих линий безнапорной канализации:

*Канализация условно чистых производственных стоков.* В нее направляют отработанную воду из оросительных холодильников, охлаждающих рубашек, конденсаторов и т.п. Эти стоки часто подвергаются отстаиванию, фильтрации и поступают на охлаждение в градирни оборотного водоснабжения, либо эти стоки сбрасываются в водоемы.

*Канализация ливневых стоков.* В эту канализацию кроме атмосферных стоков сбрасывают воду из холодильников при опорожнении их перед ремонтом. Ливневая канализация в цехе состоит из системы лотков, которые имеют уклоны. Чтобы газы из заводской системы ливневой канализации не попадали в цех, имеются гидрозатворы.

*Канализации химически загрязненных стоков* предназначены для стоков, значительно загрязненных органическими и неорганическими веществами, которые требуют сложных методов очистки (механических, физико-химических, биохимических) на специальных очистных сооружениях. В эту канализацию направляют стоки и смывные воды с установок, перерабатывающих токсичные вещества. Иногда такие стоки приходится собирать в специальные сборники, затем подвергать их дегазации, и лишь потом направлять на очистные установки.

*Канализация кислотно-щелочных стоков.* Кислотные и щелочные стоки разрушительно действуют на металлические и железобетонные конструкции. Поэтому аппаратуру, из которой выводят такие стоки, группируют в одном месте, окруженном кислотоупорным барьером. Внутри этой территории имеется трап, соединенный с заводской системой кислотно-щелочных стоков. Часто кислотно-щелочные стоки нейтрализуются в цехе, а затем направляют в канализацию химически загрязненных стоков.

Переработка и очистка производственных отходов и соответствующее оборудование рассматривается в специальных курсах.

### 3.1.7. КОМПОНОВКА ПРОИЗВОДСТВА

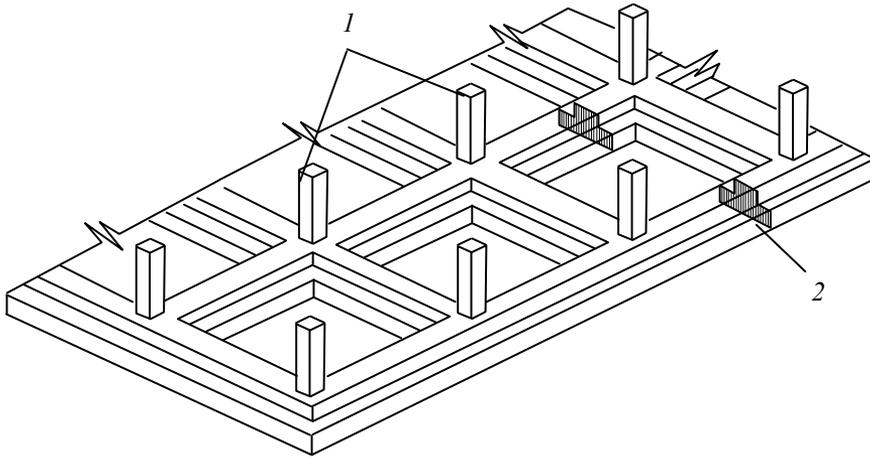
Под компоновкой производства понимают размещение технологического оборудования и сооружений, обеспечивающее нормальное течение технологического процесса, безопасность эксплуатации оборудования, нормальные условия для монтажа и ремонта аппаратуры при оптимальном объеме строительства. В целях индустриализации и кратчайшего срока строительства объекта, компоновку самого промышленного здания необходимо выполнять с учетом максимальной унификации строительных элементов, применяя современные типовые детали и конструкции [10].

Рассмотрим эти основные детали.

*Фундаменты* – это подземная часть здания, которая распределяет и передает нагрузку на грунт. Они подразделяются по конструкции в зависимости от характера действующих усилий, глубины промерзания грунта, наличия грунтовых вод, типа здания: на ленточные, столбчатые, свайные, сплошные.

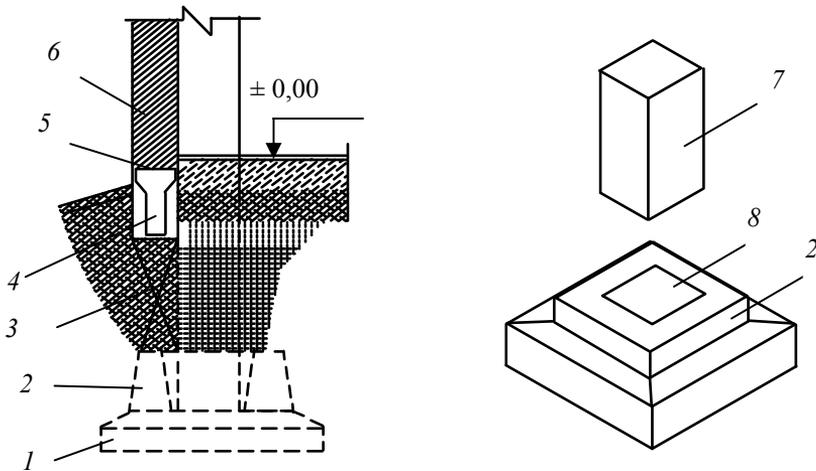
*Ленточные фундаменты* (рис. 3.27) применяются для слабых грунтов. Они выполняются из сборного или монолитного железобетона. Ленточный монолитный фундамент служит для установки колонн-стоек здания. Ширина основания фундамента обычно 1,2 м. Под несущие стены здания используют ленточный фундамент из прямоугольных блоков.

*Столбчатый фундамент* (рис. 3.28) применяют для каждой колонны здания, а стены возводят с опорой на фундаментные балки.



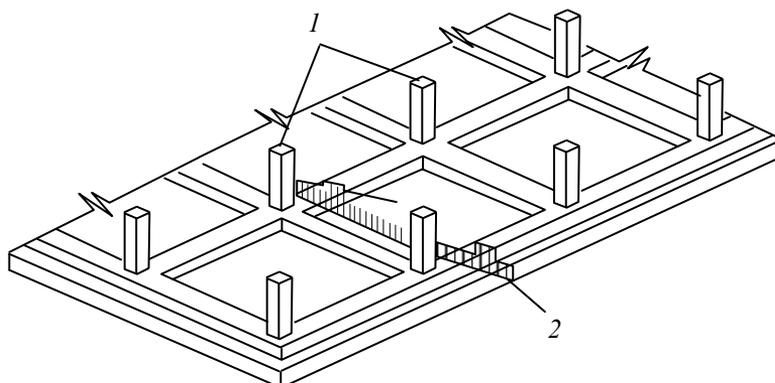
**Рис. 3.27. Ленточный фундамент:**

1 – колонна; 2 – монолитная плита



**Рис. 3.28. Столбчатый фундамент:**

1 – основание; 2 – башмак; 3 – бетонный столбик под балку; 4 – балка;  
5 – гидроизоляция; 6 – стена; 7 – колонна; 8 – стакан для колоны

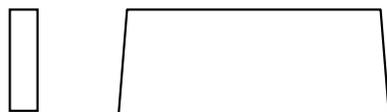


**Рис. 3.29. Сплошной фундамент:**  
1 – колонна; 2 – монолитная плита

Сплошные фундаменты (рис. 3.29) применяются при неблагоприятных геологических и гидрологических условиях строительной площадки. Фундаменты образуют сплошную железобетонную плиту под всем зданием толщиной от 500 до 1500 мм.

Ригели (рис. 3.30) предназначены для размещения плит перекрытия и имеют высоту 800 мм.

Свайные фундаменты (рис. 3.31) используются в случае слабого грунта или высокого расположения уровня грунтовых вод. Железобетонные сваи обычно выпускают квадратного или круглого сечения.



**Рис. 3.30. Ригель**

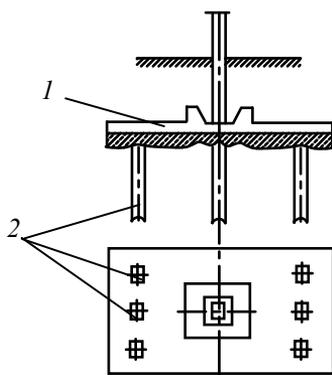
При небольшом давлении на свайные фундаменты применяют сваи длиной 4...7 м с сечением 200×250 мм, а при длине 6...10 м – 300×350 мм.

Балки и фермы (рис. 3.32 и 3.33) применяются для покрытий промышленных зданий. Железобетонные балки применяются для пролетов 6...18 м с односкатным, двухскатным и плоским профилем кровли.

В верхнем поясе балок имеются закладные стальные пластины, к которым сваркой крепят плиты покрытий. Для пролетов 18, 24, 30 м в промышленных зданиях применяют железобетонные фермы (рис. 3.21).

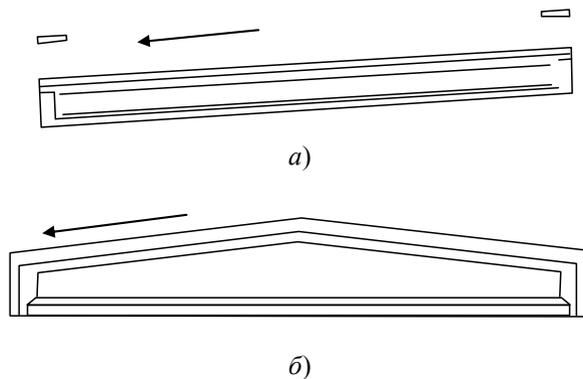
Балки и фермы крепятся к колоннам с помощью анкерных болтов и закладных пластин.

Полы. На первом этаже основанием для полов служит уплотненный верхний слой грунта, а на этажах железобетонные плиты междуэтажных перекрытий.

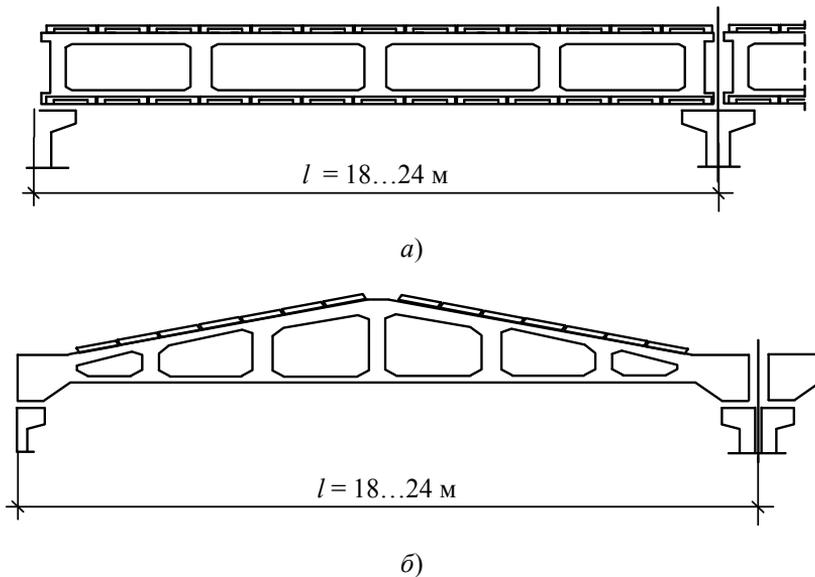


**Рис. 3.31. Свайный фундамент:**

1 – железобетонный башмак;  
2 – сваи

**Рис. 3.32. Железобетонные балки:**

*a* – для односкатных покрытий; *б* – для двускатных покрытий

**Рис. 3.33. Железобетонные фермы:**

*a* – с параллельными поясами; *б* – арочная

На основание при необходимости наносят гидроизоляцию (если пол подвергается воздействию грунтовых вод или агрессивных жидкостей). Далее располагается стяжка – выравнивающий слой с ровной поверхностью (бетон, строительный раствор). Затем на стяжку наносится прослойка из соединительного (клеявого материала). На клеевой материал стелют покрытие – верхний слой пола, так называемая одежда (линолеум, паркет и т.п.).

*Лестницы* (рис. 3.34). По назначению лестницы подразделяются на основные (входные) и второстепенные (между этажами), служебные – для обслуживания оборудования, пожарные и аварийные.

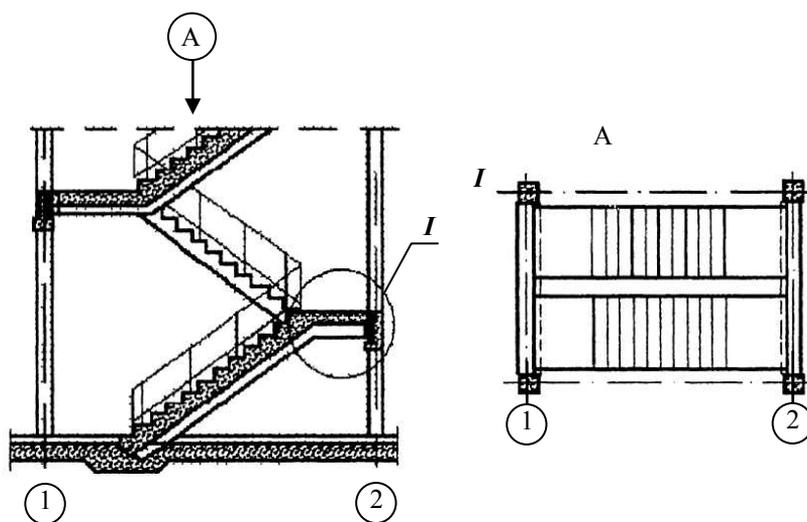


Рис. 3.34. Сборные железобетонные лестницы

Основные и второстепенные лестницы располагаются в отдельных помещениях (шахтах), огражденных стенами. По конструкции различают следующие типы лестниц: сборные железобетонные с отдельными маршами и площадками, сборные из штучных ступеней, металлические.

*Колонна* является одним из основных строительных элементов, с помощью которого нагрузка передается на фундамент и служит соединительным узлом для других элементов здания. Колонны могут иметь квадратное, прямоугольное или двухветвевое сечение (рис. 3.35).

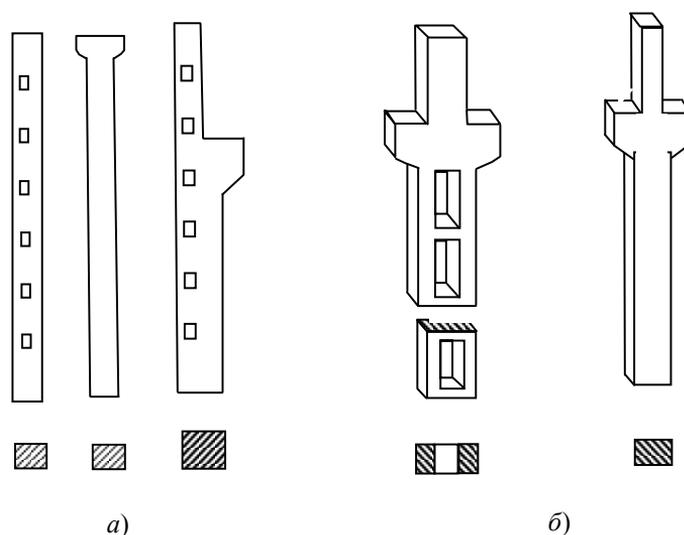


Рис. 3.35. Колонны:

*a* – квадратного сечения; *б* – колонны прямоугольного сечения

В железобетонных колоннах предусмотрены стальные закладные элементы (рис. 3.36).

Наращивание колонн производится через два этажа посредством сварки стальных оголовков и оснований.

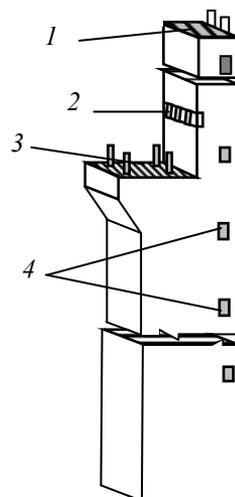
*Плиты* перекрытий бывают основными и доборными. Железобетонная плита перекрытий чаще всего имеет номинальную длину 6 м и ширину 1,5 м. Ширина доборных плит 0,75 м. Для перекрытия здания в качестве несущего настила часто применяют плиты длиной 6 и 12 м при ширине 1,5 и 3 м соответственно (рис. 3.37).

Промышленные здания классифицируют: по функциональному назначению, отношению к пожарной безопасности, этажности, методу застройки, количеству пролетов, способу освещенности естественным светом, соответствию климатическим условиям, по форме здания в плане и наличию внутрицехового подъемно-транспортного оборудования.

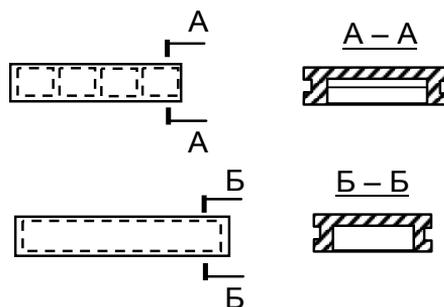
По функциональному назначению промышленные здания подразделяют на производственные (цехи, выпускающие готовую продукцию или полуфабрикаты); подсобно-производственные (экспериментальные, инструментальные, ремонтные); энергетические (котельные, ТЭЦ, компрессорные и другие станции); складские; транспортные; санитарно-технические (насосные станции, очистные сооружения и др.); вспомогательные (заводоуправления, КБ, медпункт, помещения для учебных занятий).

Все здания и сооружения по огнестойкости подразделяют на пять степеней. Каждая степень огнестойкости здания или сооружения определяется двумя показателями: 1) группой возгораемости применяемых строительных материалов конструкций (все строительные материалы и конструкции по степени возгораемости делятся на негорючие, трудногорючие и горючие); 2) пределом огнестойкости отдельных конструктивных элементов зданий или сооружений. Предел огнестойкости – это время в часах, в течение которого конструкция способна сопротивляться действию огня до потери устойчивости и несущих возможностей.

Промышленные здания и сооружения химических предприятий проектируют обычно не ниже третьей степени огнестойкости.



**Рис. 3.36. Закладные элементы колонны**  
1 – оголовок; 2 – упор подкрановой балки;  
3 – опора подкрановой балки;  
4 – элемент крепления стеновых панелей



**Рис. 3.37. Плиты перекрытий**

По взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности все производства в соответствии со СНиП подразделяют на шесть категорий. А, Б, В, Г, Д, Е.

К категории А относят производства, в которых технологический процесс наиболее пожаро- и взрывоопасен (т.е. возможно образование воздушных взрывоопасных смесей). Взрыв таких смесей может последовать от возникшей искры, резкого удара, детонации и может привести к частичному или полному разрушению конструкций здания (в производстве взрывчатых веществ, цехах многих химических и нефтехимических отраслей и др.).

К категории Б относят такие производства, где в воздухе возможно накопление горючей или взрывоопасной пыли, горючих жидкостей с температурой вспышки паров до 120 °С, взрыв которых не разрушает конструкции зданий (производства пылеугольного топлива, муки, сахарной пудры и др.).

К категории В относят производства, в которых применяют твердые сгораемые материалы и вещества, жидкости с температурой вспышки паров более 61 °С; вещества, способные гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом (деревобделочные, столярные, мебельные, хлопкообработывающие, трикотажные и текстильные фабрики и др.).

К категориям Г, Д и Е относят производства, связанные с обработкой несгораемых материалов (литейные, плавильные и кузнечные цехи, тепловые электростанции, механические, инструментальные цехи).

По этажности промышленные здания и сооружения подразделяют на одноэтажные, многоэтажные и комбинированные. На практике значительное распространение получили одноэтажные промышленные здания, как более экономичные, ввиду того, что горизонтальное перемещение сырья и полуфабрикатов значительно дешевле и проще многоэтажного вертикального. Кроме того, отпадает необходимость в проектировании дорогостоящих лестниц и подъемников, стоимость стен и фундаментов ниже, чем в многоэтажных зданиях, облегчается оздоровление воздушной среды посредством максимального использования естественной вентиляции. Однако при одноэтажной застройке дороже стоимость отопления за счет увеличения площади теплопотерь и занимаемой территории.

Многоэтажные здания (до шести, семи этажей) проектируют с вертикальной схемой технологического процесса. В этом случае средства затрачиваются только на поднятие сырья или материалов наверх, так как вниз они опускаются самотеком. Многоэтажная застройка может быть вызвана размещением предприятий на стесненных земельных участках, в районах сложившихся населенных мест или реконструкцией действующих производств без перспективы на их расширение. Следовательно, этажность промышленного предприятия выбирают в зависимости от конкретных условий, характера производства и технико-экономических данных.

По способу освещенности естественным светом промышленные здания проектируют с боковым светом, проникающим через окна, и с комбинированным. По температурному режиму промышленные здания делят на теплые и холодные.

В отапливаемых зданиях стены и покрытия подлежат теплотехническому расчету в соответствии с климатическим районом и должны обеспечивать возможность поддержания необходимой температуры внутри цеха в холодный период года.

Промышленные здания могут быть любой формы. Наиболее распространены здания, имеющие прямоугольное очертание или в виде сочетания нескольких прямоугольников.

По наличию внутрицехового кранового оборудования различают промышленные здания, оборудованные кранами и бескрановые. К внутрицеховому подъемно-транспортному оборудованию относят: мостовые краны, кран-балки, консольные краны, монорельсы, тельферы, конвейеры, подвесные транспортеры.

Объемно-планировочное решение промышленного здания – это целесообразные по функционально-техническим, технологическим, архитектурно-художественным и экономическим требованиям расположения отдельных помещений в общем строительном комплексе.

Одноэтажные здания проектируют с фонарями или окнами [10]. Многоэтажные промышленные здания проектируют по требованиям технологического процесса, при наличии вертикальных технологических потоков, в случае строительства на территории действующих заводов. Если эти здания сооружают на одной площадке, то, как правило, они имеют единую сетку колонн. В зависимости от полезных нагрузок (массы оборудования и людей) на междуэтажные перекрытия рекомендуется применять сетки колонн 12×6 м при нагрузке до 100 МПа, 9×6 м – до 150 МПа и 6×6 м – при 200...250 МПа.

Многоэтажные производственные здания проектируют шириной 18 м и более, но при необходимости допускается ширина менее 18 м. Количество этажей обычно принимают от 2 до 6 с высотой, кратной 0,6 м и равной 3,6; 4,8 и 6 м. Для первого этажа предусмотрена дополнительная высота 7,2 м.

В случае применения обычного или провисающего оборудования верхних этажей допускается применять кран-балки, электротали, монорельсы грузоподъемностью 5 т. Для зданий с провисающим оборудованием имеется также схема с укрупненной сеткой колонн 18×6 м, с мостовым краном грузоподъемностью 10 т и высотой этого этажа 8,4 или 10,8 м.

При проектировании внутрицехового транспорта следует ограничивать применение мостовых кранов, используя напольный (автокраны, автопогрузчики, электрокары, транспортеры и др.) и подвесной транспорт. Монтаж и демонтаж оборудования необходимо выполнять самоходными безрельсовыми кранами и такелажными приспособлениями. Транспортировать и укладывать грузы (материалы и полуфабрикаты) в складских зданиях следует с применением экипажного оборудования в виде авто- и электрокар, вильчатых погрузчиков, штабелеукладчиков и т.п. Сыпучие материалы транспортируют пневмотранспортерами, шнеками, элеваторами и другими закрытыми устройствами.

Внутреннее пространство здания на предприятиях складывается из строительных конструкций, технологического оборудования, подъемно-транспортных устройств, коммуникаций. Строительные конструкции создают объемно-планировочное решение здания, а остальные элементы составляют его эксплуатируемый объем.

Типизация и унификация объемно-планировочных решений промышленных зданий снижает стоимость промышленного строительства, способствует индустриализации, ускоряет ввод промышленных комплексов в эксплуатацию, повышает темпы строительного производства и экономическую эффективность, сокращает сроки проектирования и т.д.

Для предприятий химической промышленности разработаны и утверждены габаритные схемы и унифицированные типовые секции и типовые пролеты промышленных зданий [10]. На основе габаритных схем разработаны следующие конструкции заводского исполнения: железобетонные фундаментные блоки, колонны, балки, фермы, плиты перекрытий и покрытий, стеновые панели и другие элементы.

Основным материалом для несущих конструкций одно- и многоэтажных промышленных зданий является сборный железобетон. Стальные конструкции могут быть запроектированы лишь для высоких многоярусных зданий, в которых необходимо смонтировать тяжеловесное технологическое оборудование, а также для разборных этажерок в зданиях *павильонного* типа. Для химических предприятий с очень агрессивной средой (заводы серной и соляной кислоты, производства по переработке калийных солей, минеральных удобрений и др.) целесообразно применять в качестве несущих элементов зданий деревянные клеенные конструкции. Их масса в пять раз меньше железобетонных, а приведенные затраты на изготовление на 30...40% сокращаются по сравнению с железобетонными и стальными конструкциями. При этом срок службы клеенных конструкций в 4–5 раз больше, чем у сборного железобетона.

При размещении самого химического оборудования различают три варианта компоновки: *закрытый* (в промышленных зданиях), *открытый* (на открытых железобетонных постаментях) и *смешанный*.

В закрытом варианте большое значение имеют правильно запроектированные объемно-планировочные и конструктивные решения промышленных зданий, так как от них в значительной степени зависят возможности расположения технологического оборудования, уровень организации технологических процессов, комплексной механизации и автоматизации производства. При проектировании необходимо предвидеть развитие предприятия (совершенствование технологических процессов и оборудования) на достаточно длительную перспективу.

Для гибких химических производств рекомендуются для строительства высокие одноэтажные корпуса павильонного типа. В таком цехе технологическое оборудование располагают на сборно-разборных этажерках, не связанных с не-

сущим каркасом здания, а в случае производственной необходимости аппараты легко переместить или заменить.

В зависимости от характера оборудования и климатических условий технологическое, энергетическое и санитарно-техническое оборудование рекомендуется размещать на открытых площадках, применяя при необходимости местные укрытия. Перечень технологического оборудования химической промышленности, устанавливаемого на открытых площадках, приведен в литературе [10].

В закрытом варианте компоновки производства важной задачей является обеспечение в промышленных зданиях необходимых климатических, светотехнических и акустических условий, которые отвечали бы характеру производства. На предприятиях таких отраслей промышленности как производство сверхчистых веществ, искусственного волокна, пленок, оргстекла и других технология производства требует постоянно поддерживать на заданном уровне температуру, влажность, чистоту воздуха внутри помещений и достаточную освещенность. Промышленные здания таких производств проектируют бесфонарными (в отдельных случаях без окон), с герметизацией и искусственным освещением. Поддержание требуемых параметров (температуры, влажности, давления, чистоты воздуха) обеспечивается вентиляцией и кондиционированием воздуха, созданием искусственного климата. Производственные помещения (с постоянным пребыванием работающих) без естественного освещения должны быть оборудованы установками ультрафиолетового излучения и фотариями.

Большое влияние на компоновку оказывают требования ремонта:

- чистка реакторов, колонн, сборников шлама и смол, а также теплопередающих поверхностей от накипи связано со снятием крышек, открытием люков, что требует дополнительной рабочей площади вокруг этих аппаратов и установки кран-балок, монорельсов с талями;

- устранение неплотностей фланцевых соединений, подтяжка сальников и замена их набивки и тому подобные требуют соответствующие площадки для выполнения данных работ;

- замена изношенных деталей компрессоров, дробилок, мельниц, транспортеров требует также дополнительной площади и установки упомянутых выше подъемно-транспортных механизмов;

- восстановление футеровки, изоляции, покраски связано с устройством приспособлений для подъема изоляции, плитки, а также со строительством лесов, что требует дополнительных производственных объемов.

Размещая технологическое оборудование, стремятся снизить капитальные вложения за счет уменьшения объема строительных сооружений, сокращения трубопроводных коммуникаций. Это можно достичь, располагая оборудование на минимальном расстоянии друг от друга. Минимальное расстояние между аппаратами, а также между аппаратами и строительными элементами – 0,8 м. При этом основные проходы по фронту обслуживания и между рядами машин (ком-

прессоры, насосы и аппараты с местным контрольно-измерительными приборами) должны быть шириной 2 м.

Однако минимизация трубопроводных коммуникаций вступает в противоречие с другими требованиями компоновки оборудования. Например, со стремлением сгруппировать аппараты по определенным признакам, допустим, выполняющим сходные операции: выпарные установки, сульфаторы и т.п. Могут реализоваться и другие принципы группировки: оборудование с большим выделением пыли, вибрирующие агрегаты. Объединение подобных аппаратов в отдельном помещении дает определенные выгоды. Например, сгруппированное пылящее оборудование позволяет свести к минимуму количество вентиляционных камер.

Большое внимание уделяется вибрирующему оборудованию: компрессоры, дробилки, вентиляторы, насосы и другие машины. Это оборудование размещают на массивных фундаментах, изолированных от основной конструкции здания.

Прицеховые емкости сырья, тяжелое и крупногабаритное оборудование – размещают на первом этаже, поскольку расположение его на верхних этажах вызовет необходимость усложнения строительных конструкций. Следует также помнить, что тяжелое оборудование, обслуживаемое подъемными кранами, необходимо размещать в зоне приближения крюка крана.

Итак, суть вышеизложенных положений сводится к следующему: исходной базой для компоновки служат общие виды оборудования; принципиальная технологическая схема, которая указывает на размещение оборудования по различным высотным отметкам.

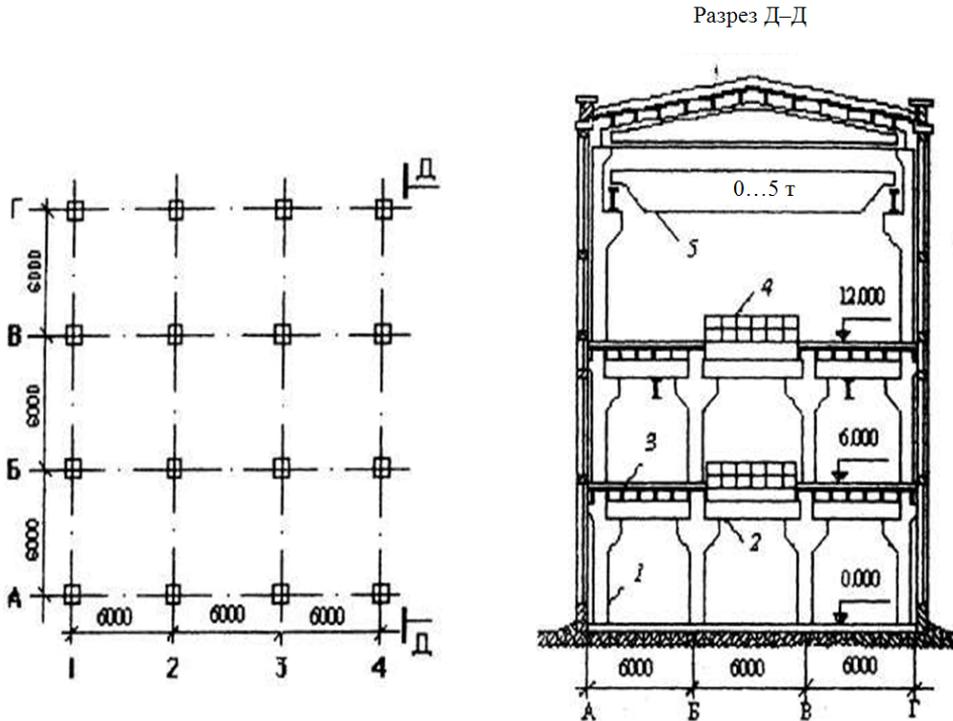
Выбрав вариант компоновки (открытый, закрытый или смешанный) и учитывая изложенные рекомендации, приступают непосредственно к проектному размещению основного и вспомогательного оборудования.

Для поиска оптимального варианта компоновки привлекаются специалисты различных отделов проектной организации: технологи, монтажники, электрики и т.д. Целесообразно к этой работе привлекать и специалистов заказчика.

Вначале определяют с учетом технологии производства и условий застройки этажность здания или железобетонного постамент. После этого группируют аппараты по сходным признакам. Затем на чертежах в масштабе 1:100 изображают планы каждого этажа с нанесением сетки колонн и наружных контуров аппаратов.

На строительных планах колонны обозначают пересечением двух взаимно перпендикулярных продольных и поперечных разбивочных осевых линий. Систему продольных и поперечных осей по рядам колонн называют *сеткой колонн*. Расстояние между опорами (по продольным осям), перекрываемое балками или фермами называется пролетом.

Продольные разбивочные оси обозначаются прописными буквами русского алфавита, за исключением букв З, Й, Х, О, Ц, Ч, Ы, Ъ, Ь (рис. 3.38).



**Рис. 3.38. Строительный план и разрез промышленного здания:**

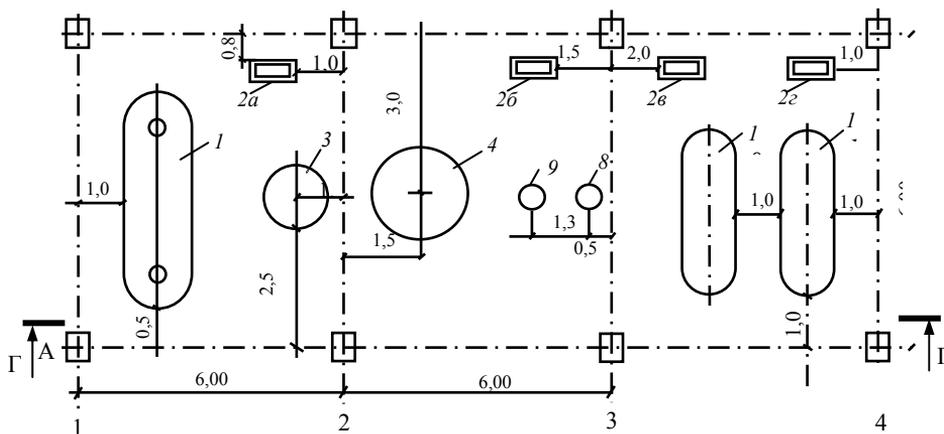
1 – колонна; 2 – ригель; 3 – плита перекрытия; 4 – ограждение; 5 – мостовой кран; б – балка

Рассмотрим в качестве примера варианты компоновки ректификационной установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 3.26.

Аппараты ориентируют и привязывают по двум взаимно перпендикулярным направлениям к осям колонн и к уже нанесенным на план аппаратам.

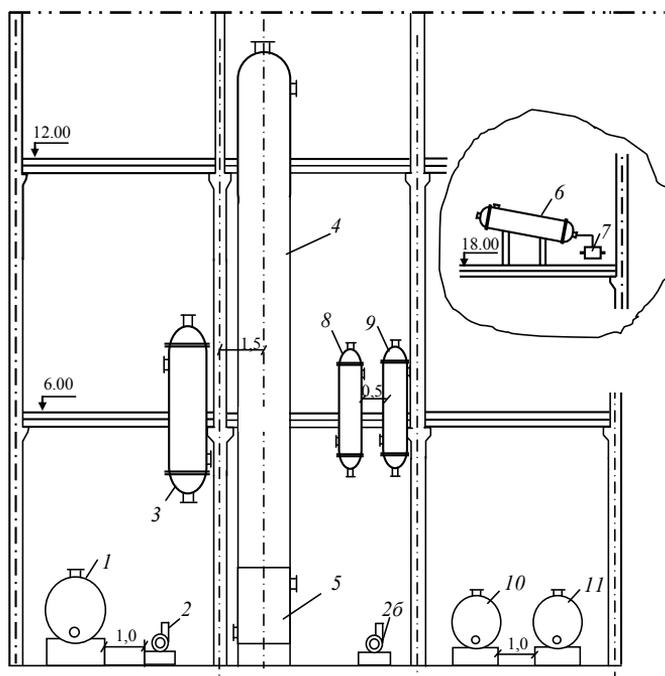
Кроме изображения оборудования в плане (рис. 3.39) по этажам делают поперечные и продольные разрезы цеха (рис. 3.40), на которых стараются показать все аппараты. Как и на планах, в разрезах оборудование изображается контурно и показывают способ его установки: на фундаменте, на консолях и т.д. К планам и разрезам цеха дается экспликация, номера аппаратов в которой обязательно должны совпадать с номерами на технологической схеме. В экспликации указывается наименование аппарата, его конструкционный материал, характеристика, количество таких аппаратов и масса аппарата. Цеховой напольный транспорт не изображается на планах при компоновке.

При определении общей производственной площади следует учитывать, что 40...50% ее занимает трубопроводная обвязка. Различные варианты компоновки оборудования отличаются друг от друга длиной трубопроводов, транспортеров, линий пневмотранспорта, количеством и типом газодувок, насосов, промежуточных емкостей, этажностью строительных сооружений и т.д.



**Рис. 39. Фрагмент плана на отметке 0.000:**

1 – емкость исходной смеси; 2а – насос исходной смеси; 2б – насос кубового остатка;  
 2в – насос дистиллята; 2г – насос; 3 – подогреватель исходной смеси; 4 – колонна;  
 8 – холодильник дистиллята; 9 – холодильник кубового остатка;  
 10 – емкость дистиллята; 11 – емкость кубового остатка



**Рис. 3.40. Разрез Г-Г:**

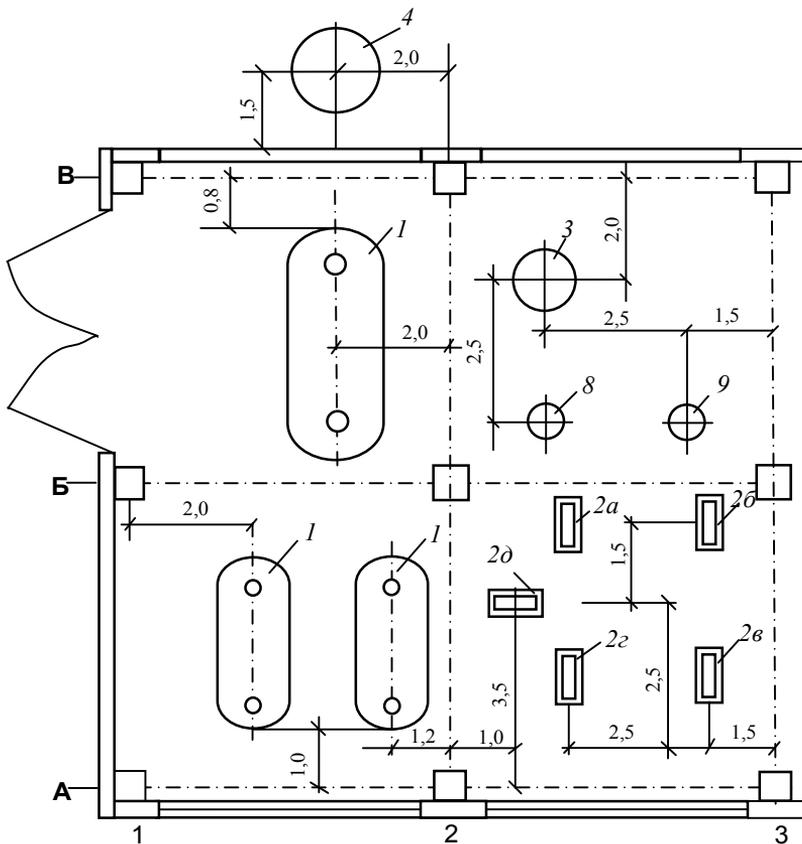
1 – емкость исходной смеси; 2а – насос исходной смеси; 2б – насос кубового остатка;  
 2в – насос дистиллята; 2г – насос; 3 – подогреватель исходной смеси; 4 – колонна;  
 5 – встроенный кипятыльник; 6 – дефлегматор; 7 – разделительный стакан;  
 8 – холодильник дистиллята; 9 – холодильник кубового остатка;  
 10 – емкость дистиллята; 11 – емкость кубового остатка

При открытом варианте компоновки оборудование данной установки располагается на железобетонной этажерке в соответствии с правилами, изложенными выше.

Достоинство этого варианта компоновки только в том, что предусмотрена самотечная подача флегмы в колонну и длина трубопроводов минимальна.

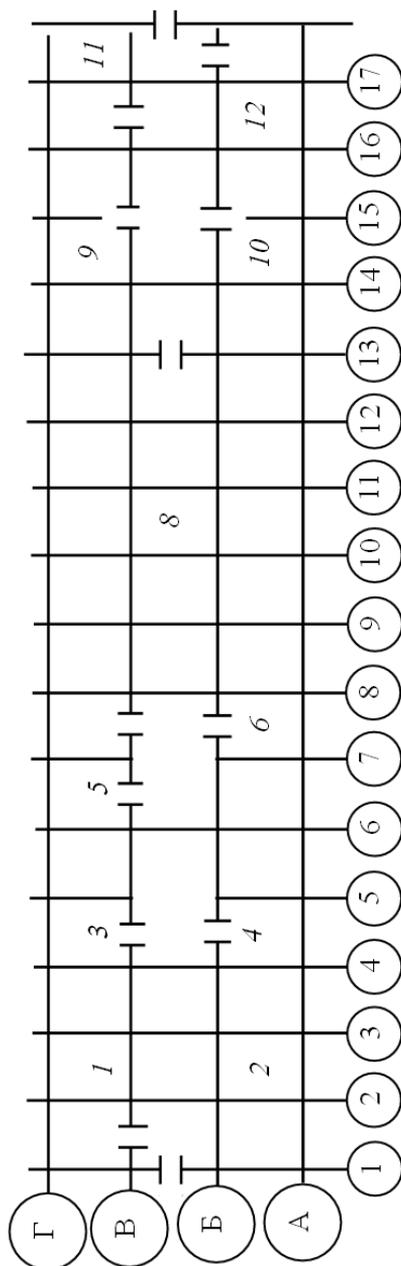
Недостатки такой компоновки заключаются в следующем: оборудование не сгруппировано по отделениям (насосное, емкостей). Кроме того, необходимость четвертого этажа обусловлена лишь размещением дефлегматора *б* для обеспечения самотека флегмы.

Самым рациональным в данном случае следует считать смешанный вариант компоновки. При этом колонна располагается на открытой площадке, а остальное оборудование – в двухэтажном здании (рис. 3.41).



**Рис. 3.41. Модернизация варианта компоновки (разрез Г–Г):**

- 1* – емкость исходной смеси; *2а* – насос исходной смеси; *2б* – насос кубового остатка;
- 2в* – насос дистиллята; *2г* – насос; *3* – подогреватель исходной смеси; *4* – колонна;
- 5* – встроенный кипятильник; *6* – дефлегматор; *7* – разделительный стакан;
- 8* – холодильник дистиллята; *9* – холодильник кубового остатка;
- 10* – емкость дистиллята; *11* – емкость кубового остатка



**Рис. 3.42.** Схема распределения площади цеха по помещениям:

1 – электростанция; 2 – теплопункт; 3, 4 – бытовые помещения; 5 – кладовая;  
 6 – операторное отделение; 7 – цеховая лаборатория; 8 – аппаратное отделение; 9 – насосное отделение;  
 10 – административные помещения; 11 – венткамера; 12 – цеховые склады

Такое размещение ректификационной колонны позволит снизить этажность строительной конструкции.

Сгруппированное и размещенное оборудование вместе со строительными конструкциями (объем и площадь их определяется компоновкой) образующих производственные помещения.

В общем случае в цехе различают три вида производственных помещений:

- 1) основные производственные;
- 2) вспомогательные производственные;
- 3) обслуживающие.

Имея эти помещения, приступают к компоновке производства в целом (рис. 3.42).

В заключение этого раздела еще раз отметим, что проектирование – итерационный процесс принятия решений, при реализации которого приходится многократно возвращаться с последующих этапов разработки проекта на предыдущие для пересмотра документации, улучшения ее и доработки. Так разрабатывая принципиальную технологическую схему производства, предварительно распределяют оборудование по высотным отметкам. Затем на этапе компоновки оборудования выясняется, что решения, принятые при разработке принципиальной технологической схемы, невозможно реализовать или их реализация приведет к значительному удорожанию строительной конструкции.

Например, на стадии рассмотрения принципиальной схемы ректификационного отделения производства было принято решение располагать дефлегматор выше шлема колонны с целью экономии энергии (самотек флегмы). Но при компоновке оказалось, что это решение влечет необходимость возведения еще одного этажа. Поэтому проектировщики вынуждены вернуться на этап разработки принципиальной технологической схемы и отказаться от самотечной подачи флегмы.

Такие возвраты могут иметь место и при *монтажной проработке*, когда оказывается что реализация решений, принятых на этапах разработки принципиальной технологической схемы и компоновки оборудования приводит к неизбежным гидравлическим «мешкам», невозможности использования намеченных пространств для теплоносителей и т.п. Поэтому приходится вновь возвращаться на предыдущие этапы проектирования с целью корректировки принципиальной технологической схемы и компоновки производства.

Технолог должен сделать анализ и оценить результат компоновки производства по сравнению с показателями аналогичных объектов. При этом сравнивают доли стоимости оборудования в общей смете, площади, приходящиеся на один аппарат, строительные объемы зданий на единицу площади.

Разработанные проекты важных объектов рассматриваются и утверждаются техническим советом проектной организации. Проект с разработанными сметами передается заказчику для согласования с генеральной строительной-монтажной организацией. После всех согласований приступают к подготовке рабочей документации.

### Вопросы для самоконтроля

1. В каких случаях производится разработка проектной документации в одну стадию?

- повышенной сейсмической опасности в районе строительства проектируемого объекта;
- для предприятий пищевой промышленности;
- для предприятий технически несложных, а также для тех, которые можно сооружать по типовым проектам.

2. Каким документом в настоящее время определяется состав проекта?

- Федеральным законом 116-ФЗ;
- Уголовным кодексом РФ;
- инструкцией СНиП 11–01–95.

3. Как определяется стоимость проектируемого объекта?

- составляется полное описание рельефа местности, в которой будет строиться объект;
- используется «роза ветров»;
- для определения стоимости строительства предприятий, зданий и сооружений (или их очередей) составляется сметная документация.

4. Что является первоочередной задачей анализа исходных данных?

- проверка обоснованности рекомендованного метода производства;
- проверка правильности выбора площадки строительства;
- проверка материальных и тепловых балансов проектируемого производства.

5. Что изображают на ситуационном плане?

- план определенного района населенного пункта или окружающей территории, на котором указывают расположение будущего объекта и существующие объекты, а также транспортные и инженерные коммуникации;
- только план зеленых насаждений и свободных территорий в районе строительства проектируемого объекта;
- расположение цехов, вспомогательных сооружений на территории проектируемого объекта.

6. Как рассчитывают нестандартное оборудование?

- расчет нестандартного оборудования принципиально отличается от расчета стандартного;
- по специальным таблицам в отличие от стандартного оборудования;
- расчет нестандартного оборудования производится аналогично расчету стандартного оборудования: выбрав тип оборудования и определив его размеры, технологи с привлечением специалистов других профилей (механиков, теплотехников, электриков и др.) составляют задание на разработку чертежей нестандартного оборудования.

7. *Какие конструкционные материалы используют для изготовления химического оборудования?*

- любые;
- только чугун;
- стойкие и весьма стойкие в агрессивных средах, а материалы пониженной стойкости применяют в исключительных случаях.

8. *Что является основой для разработки принципиальной технологической схемы?*

- эскизная технологическая схема и выбор оборудования;
- ситуационный план;
- утвержденное обоснование инвестиций.

9. *Что понимают под компоновкой производства?*

- проектное размещение магистральных трубопроводов;
- кооперирование производств;
- проектное размещение технологического оборудования и производств;

10. *Какие варианты компоновки применяют при проектировании и сооружении промышленного объекта?*

- сплошной, плоский, вертикальный;
- открытый, закрытый, смешанный;
- кубический, шаровой, пирамидный.

# 4

глава

## ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СОСТАВЕ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Проектирование является одним из видов инженерной деятельности в области промышленной безопасности. Это положение отмечается в Федеральном законе № 116-ФЗ от 21.07.1997 года «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». В составе проектной документации раздел «Промышленная безопасность» включает следующее:

- общий раздел, где приводятся: реквизиты организации, сведения о площадке строительства, кадрах и населении;
- сведения о технологии, где дается краткое описание технологии, свойства опасных веществ, характеристики применяемого оборудования и планы его размещения;
- описание технических решений по обеспечению безопасности, где приводятся решения по обеспечению герметизации аппаратов, в которых перерабатываются опасные вещества;
- сведения о решениях, направленных на предупреждение аварий и локализацию выбросов опасных веществ, описание систем блокировок, сигнализации и других средств обеспечения безопасности;
- оценка опасностей аварий, где приводятся: сведения об авариях, имевших место на аналогичных действующих предприятиях; описание сценариев развития возможных аварий и расчет вероятных зон действия поражающих факторов;
- категорирование технологических блоков по взрывоопасности, где дается описание этих блоков, расчет энергетических потенциалов;
- обеспечение требований промышленной безопасности, где приводятся сведения: о выполнении требований промышленной безопасности к эксплуатации проектируемого объекта; перечень необходимых лицензий на виды деятельности, связанные с эксплуатацией проектируемого объекта; о профессиональной подготовке персонала с указанием регулярности проверки знаний в области промышленной безопасности и порядка допуска персонала к работе; о системе управления

промышленной безопасностью; о сборе и анализе информации о произошедших инцидентах и авариях; о мероприятиях по локализации и ликвидации последствий аварий на проектируемом объекте; о системе оповещения в случае возникновения аварий на проектируемом объекте и указанием порядка действий.

#### 4.1. РАЗРАБОТКА ДЕКЛАРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В приложениях к закону № 116-ФЗ указаны признаки опасных производственных объектов и предельные количества опасных веществ, наличие которых на производственном объекте является основанием для лицензирования и обязательной разработки декларации промышленной безопасности.

Опасными производственными объектами являются те, на которых:

1) получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества:

а) воспламеняющиеся – газы, которые при нормальном давлении и в смеси с воздухом становятся воспламеняющимися и температура кипения которых при нормальном давлении составляет 20 °С или ниже;

б) окисляющие – вещества, поддерживающие горение, вызывающие воспламенение и (или) способствующие воспламенению других веществ в результате окислительно-восстановительной экзотермической реакции;

в) горючие – жидкости, газы, пыли, способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самопроизвольно гореть после его удаления;

г) взрывоопасные – вещества, которые при определенных видах внешнего воздействия способны на очень быстрое самораспространяющееся химическое превращение с выделением тепла и образованием газов;

д) токсичные – вещества, способные при воздействии на живые организмы приводить их к гибели и имеющие следующие характеристики:

– средняя смертельная доза при введении в желудок от 15 мг на 1 кг до 200 мг на 1 кг включительно;

– средняя смертельная доза при нанесении на кожу от 50 мг на 1 кг до 400 мг на 1 кг включительно;

– средняя смертельная концентрация в воздухе от 0,5 мг на литр до 2 мг на литр включительно;

е) высокотоксичные – вещества, способные при воздействии на живые организмы приводить их к гибели и имеющие следующие характеристики:

– средняя смертельная доза при введении в желудок не более 15 мг на килограмм;

– средняя смертельная доза при нанесении на кожу не более 50 мг на 1 кг;

– средняя смертельная концентрация в воздухе не более 0,5 мг на литр;

ж) представляющие опасность для окружающей среды – вещества, характеризующиеся в водной среде следующими показателями острой токсичности:

– средняя смертельная доза при ингаляционном воздействии на рыбу в течение 96 ч не более 10 мг на литр;

– средняя концентрация яда, вызывающая определенный эффект при воздействии на дафнии в течение 48 ч, не более 10 мг на литр;

– средняя ингибирующая концентрация при воздействии на водоросли в течение 72 ч не более 10 мг на литр;

2) используется оборудование, работающее под давлением более 0, 07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С;

3) используются грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры;

4) получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов;

5) ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

Как отмечалось выше, в приложении к рассматриваемому закону № 116-ФЗ дан список (табл. 4.1) опасных веществ и их предельные количества, которые являются основанием для обязательной разработки декларации промышленной безопасности. При этом указывается, что в случае если расстояние между опасными производственными объектами при проектировании окажется менее 500 м, тогда необходимо учитывать суммарное количество опасного вещества. Также если на предприятии применяется несколько видов опасных веществ одной и той же категории, то их суммарное пороговое количество определяется уравнением

$$\left\{ \sum_1^n [m(i)] / [M(i)] \right\} \geq 1,$$

где  $m(i)$  – количество применяемого вещества;  $M(i)$  – пороговое количество того же вещества в соответствии с указанным перечнем приложения к закону № 116-ФЗ для  $i$  веществ от 1 до  $n$ .

Кроме приведенного выше списка необходимо отметить «Перечень технических устройств, применяемых на опасных производственных объектах и подлежащих сертификации» (М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Ростехнадзора России»)

Опасные производственные объекты регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов (РД 03-294–99) и декларируются в соответствии с Положением о порядке оформления декларации промышленной безопасности (РД 03-315–99) и Правилами экспертизы декларации промышленной безопасности (ПБ 03-314–99).

Как отмечалось выше, основным нормативным документом по проектированию промышленных объектов является инструкция СНиП 11-01–95. Данный нормативный документ устанавливает порядок разработки, согласования, утверждения и состав проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений на территории Российской Федерации. Под строительством понимают как возведение нового объекта, так и реконструкцию старого или его перевооружение.

#### 4.1. Опасные вещества и их предельные количества на опасном производственном объекте

Наименование опасного вещества	Предельное количество опасного вещества, т
Аммиак	500
Нитрат аммония (нитрат аммония и смеси аммония, в которых содержание азота из нитрита аммония составляет более 28% массы, а также водные растворы нитрата аммония, в которых концентрация нитрата аммония превышает 90% массы)	2500
Нитрат аммония в форме удобрений (простые удобрения на основе нитрата аммония, а также сложные удобрения, в которых содержание азота из нитрата аммония составляет более 28% массы; сложные удобрения содержат нитрат аммония вместе с фосфатом и (или) с калием)	10 000
Акрилонитрил	200
Хлор	25
Оксид этилена	50
Цианистый водород	20
Фтористый водород	50
Сернистый водород	50
Диоксид серы	250
Триоксид серы	75
Алкилы	50
Фосген	0,75
Метилизоцианат	0,15
Виды опасных веществ	Предельное количество, т
Воспламеняющиеся газы	200
Горючие жидкости, находящиеся на товарно-сырьевых складах и базах	50 000
Горючие жидкости, используемые в технологическом процессе или транспортируемые по магистральному трубопроводу	200
Токсичные вещества	200
Высокотоксичные вещества	20
Окисляющие вещества	200
Взрывчатые вещества	50
Вещества, представляющие опасность для окружающей среды	200

Рассматриваемая инструкция предназначена для участников инвестиционного процесса и органов Госуправления и надзора. Ее положения являются обязательными в части соблюдения нормативных требований по обеспечению безопасности жизни и здоровья людей, охраны окружающей среды, надежности создаваемых объектов.

При проектировании объектов под промышленной безопасностью понимают состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий аварий. Авария – разрушение сооружений или технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, а также неконтролируемые взрывы и выбросы опасных веществ. Промышленная безопасность обеспечивается выполнением определенных запретов, ограничений и условий, которые содержатся в рассматриваемом законе, а также в нормативных технических документах и государственных стандартах.

Закон №116-ФЗ устанавливает обязательность разработки деклараций промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются вещества в количествах, указанных в приложении 2 к настоящему Федеральному закону.

Декларация промышленной безопасности разрабатывается в составе проектной документации на строительство, расширение, реконструкцию, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию опасного производственного объекта. Она уточняется или разрабатывается вновь в случае обращения за лицензией на эксплуатацию опасного производственного объекта, изменения сведений, содержащихся в декларации промышленной безопасности, или в случае изменения требований промышленной безопасности.

Содержание и порядок разработки декларации промышленной безопасности (нормативного документа) определяет ст. 14 Федерального закона № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Разработка декларации промышленной безопасности предполагает:

- всестороннюю оценку риска аварии и связанной с ней угрозы;
- анализ достаточности принятых мер по предупреждению аварий, по обеспечению готовности организации к эксплуатации опасного производственного объекта в соответствии с требованиями промышленной безопасности, а также к локализации и ликвидации последствий аварии на опасном производственном объекте;
- разработку мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварии и размера ущерба, нанесенного в случае аварии на опасном производственном объекте.

Перечень сведений, содержащихся в декларации промышленной безопасности, и порядок ее оформления определяются федеральным органом исполнительной власти, специально уполномоченным в области промышленной безопасности.

В настоящее время органом, контролирующим работу предприятий по составлению деклараций промышленной безопасности, является Ростехнадзор.

Декларация промышленной безопасности утверждается руководителем организации, эксплуатирующей опасный производственный объект. Он несет ответственность за полноту и достоверность сведений, содержащихся в декларации промышленной безопасности, в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Декларация промышленной безопасности проходит экспертизу промышленной безопасности в установленном порядке. Декларацию промышленной безопасности представляют органам государственной власти, органам местного самоуправления, общественным объединениям и гражданам в порядке, который установлен Правительством Российской Федерации.

Положение о порядке оформления декларации безопасности и перечне сведений, содержащихся в ней, утверждено Постановлением Госгортехнадзора России.

Наиболее значимыми с позиции промышленной безопасности в декларации являются следующие структурные элементы:

Раздел 1. Общие сведения.

Раздел 2. Результаты анализа безопасности.

Раздел 3. Обеспечение требований промышленной безопасности.

Раздел 4. Выводы.

Раздел 5. Ситуационный план.

Раздел 1 должен содержать: 1) реквизиты организации; 2) обоснование декларации; 3) сведения о месторасположении объекта; 4) сведения о персонале; 5) страховые сведения (для деклараций, действующих объектов).

В разделе 2 приводятся сведения об опасных веществах, обращающихся на декларируемом объекте; сведения о технологии и основные результаты анализа риска. Последние включают результаты анализа условий возникновения и развития аварий, результаты оценки риска аварий.

Результаты анализа условий возникновения и развития аварий должны включать перечень факторов и основных возможных причин, способствующих возникновению и развитию аварий, краткое описание сценариев наиболее крупных и наиболее вероятных аварий.

Результаты оценки риска аварий должны включать:

1) перечень моделей и методов расчета, применяемых при оценке риска;

2) данные о количестве опасных веществ, участвующих в аварии;

3) данные о размерах вероятных зон действия поражающих факторов;

4) данные о возможном числе пострадавших;

5) данные о возможном ущербе;

6) данные о вероятности причинения вреда персоналу, населению и ущербу имуществу и окружающей среде.

Раздел 3 должен содержать сведения об обеспечении требований промышленной безопасности к эксплуатации декларируемого объекта и к действиям по локализации и ликвидации последствий аварий.

Раздел 4 должен содержать:

1) обобщенную оценку условий безопасности с указанием наиболее опасных составляющих декларируемого объекта и наиболее значимых факторов, влияющих на показатели риска;

2) перечень планируемых мер, направленных на уменьшение риска аварий.

Раздел 5 должен включать графическое отображение максимальных зон возможного поражения для наиболее опасного по своим последствиям и для наиболее вероятного (типичного) сценария аварии на декларируемом объекте.

В Положении о порядке оформления декларации содержатся также «Дополнительные требования по оформлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта, аварии на котором создают угрозу возникновения чрезвычайной ситуации техногенного характера».

#### **4.2. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ПЛАНА ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ**

Федеральный закон № 116-ФЗ обязывает организацию, эксплуатирующую опасный производственный объект, осуществлять мероприятия в соответствии с планом локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химических предприятиях, поскольку они практически все являются опасными производственными объектами. Руководящим документом при разработке этого плана для химико-технологических объектов являются методические указания РД 09-536–03 [19], в которых отмечается, что главными целями разработки ПЛАС являются:

- определение возможных сценариев возникновения аварийной ситуации и ее развития;
- определение готовности организации к локализации и ликвидации аварийных ситуаций на опасном производственном объекте;
- планирование действий производственного персонала и аварийно-спасательных служб (формирований) по локализации и ликвидации аварийных ситуаций на объекте;
- разработка мероприятий, направленных на повышение противоаварийной защиты и снижение масштабов последствий аварий;
- выявление достаточности принятых мер по предупреждению аварийных ситуаций на объекте.

В методических указаниях отмечается, что разработка ПЛАС может также выполняться сотрудниками промышленного предприятия (цеха) или с привлечением специалистов, имеющих опыт разработки деклараций промышленной безопасности опасных производственных объектов. По нашему мнению, ПЛАС должны разрабатывать проектные организации (технологи) при подготовке проектной документации.

Согласно [19], план локализации и ликвидации аварийной ситуации должен содержать:

- титульный лист;
- оперативная часть, в которой даются краткая характеристика опасности объекта (технологического блока, установки и т.д.), мероприятия по защите персонала и действиям по локализации и ликвидации аварийных ситуаций;
- расчетно-пояснительную записку, в которой содержится подробный анализ опасности возможных аварийных ситуаций на объекте.

В методических указаниях отмечается, что ПЛАС основывается на:

- прогнозировании сценариев возникновения аварийных ситуаций;

- поэтапном анализе сценариев развития аварийных ситуаций;
- оценке достаточности принятых или планируемых мер, препятствующих возникновению и развитию аварийных ситуаций;
- анализе действий производственного персонала и аварийно-спасательных служб (формирований) по локализации и ликвидации аварийных ситуаций на соответствующих стадиях их развития.

ПЛАС не реже чем один раз в пять лет пересматривается и уточняется в случаях изменения в технологии, аппаратном оформлении, аварий, метрологического обеспечения технологических процессов.

ПЛАС предусматривает обучение производственного персонала и проведение учебных тревог в соответствии с графиком и уровнем аварийной ситуации: «А», «Б» или «В».

На уровне «А» аварийная ситуация характеризуется развитием в пределах одного объекта (цеха, установки, производственного участка), являющегося структурным подразделением организации.

На уровне «Б» аварийная ситуация характеризуется переходом за пределы одного объекта и развитием ее в пределах организации.

На уровне «В» аварийная ситуация характеризуется развитием и выходом за пределы территории организации, возможностью воздействия поражающих факторов на население близлежащих населенных пунктов и других организаций, а также окружающую среду.

В зависимости от уровня аварийной ситуации ПЛАС разрабатывается для руководства действиями:

- производственного персонала технологического блока, членов нештатных аварийно-спасательных формирований и привлекаемых, в случае необходимости, профессиональных аварийно-спасательных формирований (уровень «А»);
- производственного персонала цеха (установки, производства и т.д.), членов аварийно-спасательных формирований, пожарных и медицинских подразделений, а также для персонала смежных или технологически связанных цехов (уровень «Б»).

Для аварийных ситуаций «А» и «Б» ПЛАС предусматривает согласованность действий персонала организации и аварийно-спасательных служб и устанавливает перечень должностных лиц, ответственных за выполнение конкретных действий и т.д.

Для обеспечения согласованности действий персонала организации и соответствующих служб должны быть предусмотрены на базе ЭВМ тренажеры для обучения и приобретения навыков выполнения работ по локализации и ликвидации аварийных ситуаций, также проводятся учебные тревоги по ПЛАС. Для допуска к самостоятельной работе обслуживающего персонала технологического оборудования и руководящих работников проводятся квалификационные экзамены.

Перед разработкой ПЛАС проводится анализ опасности объекта, который включает: характеристику перерабатываемых опасных веществ; анализ извест-

ных аварий на аналогичных производствах; оценку количества опасного вещества, участвующего в аварии; расчет вероятных зон действия поражающих факторов; план возможных аварийных ситуаций; оценку уровня опасности технологического блока; предложения по реализации мер, направленных на уменьшение риска аварий.

Состав расчетно-пояснительной записки ПЛАС, примеры расчетов к нему приведены в приложениях к [20] и методиках оценки последствий аварий на опасных производственных объектах [20].

ПЛАС состоит из следующих разделов:

Раздел 1. Технология и аппаратурное оформление блока.

Раздел 2. Анализ опасности технологического блока.

Раздел 3. Выводы и предложения.

Раздел 4. Список использованных методических материалов и справочной литературы.

Исходными данными для разработки ПЛАС служат: характеристика объекта (цеха, установки и т.п.) принципиальные технологические схемы блоков; компоновки оборудования цехов и производства в целом. В краткой характеристике опасности технологического блока должны быть представлены:

- наименование опасных веществ, их молекулярные формулы и физико-химические параметры;
- данные о взрывопожароопасности;
- реакционная способность;
- коррозионная активность;
- токсичная опасность;
- характер воздействия опасных веществ на организм человека и индивидуальные средства защиты;
- поражающие факторы аварийной ситуации (ударная волна, тепловое излучение, токсическое поражение и т.д.);
- меры первой помощи пострадавшим и методы нейтрализации опасных веществ.

Возникновение и развитие возможных сценариев аварийных ситуаций проводится с помощью типовой схемы, приведенной в приложении к [19]. Анализируя условия возникновения и пути развития аварий, необходимо установить возможность перехода аварийной ситуации с уровня «А» на уровень «Б».

На принципиальной технологической схеме, прилагаемой к ПЛАС, должны быть указаны направления потоков веществ, границы технологических блоков с необходимой характеристикой. На компоновочных чертежах, также прилагаемых к ПЛАС, должны быть указаны места расположения:

- технологического оборудования и отдельных цехов предприятия;
- границы технологических блоков (автоматические отсекатели, запорная арматура, герметизирующие устройства на пылящем оборудовании);
- маршруты эвакуации и эвакуационные выходы;
- пути подъезда, места установки и маневрирования спецтехники;

- убежища и места укрытия;
- места скопления опасных продуктов с указанием наименования и их массы;
- места установки межпроизводственной отсекающей арматуры;
- места расположения средств противоаварийной защиты, пунктов оповещения и связи;
- зоны возможного поражения обслуживающего персонала.

Кроме технической стороны в ПЛАС указываются обязанности ответственного руководителя работ, исполнителей и других должностных лиц по локализации и ликвидации аварийных ситуаций. Приложения к ПЛАС содержат:

- список и схему оповещения должностных лиц, аварийно-спасательных формирований, организаций и служб, ответственных за выполнение мероприятий по локализации и ликвидации аварийной ситуации, с указанием адресов и телефонов;

- перечень инструментов, материалов, допустимых к применению в конкретных условиях, средств индивидуальной защиты с указанием количества и места их хранения;

- обязанности ответственного руководителя и других должностных лиц по организации работ по локализации ликвидации аварийных ситуаций;

- инструкцию по безопасной остановке входящих в состав объекта.

В указаниях для персонала следует особо подчеркнуть те действия, которые не допускают промедления и требуют немедленного исполнения, а при описании действий аварийно-спасательных формирований следует указать время их прибытия и развертывания.

Работники цеха (мастера, аппаратчики, операторы), в котором сложилась аварийная ситуация, должны:

- немедленно сообщить об аварии непосредственному руководителю, а при его отсутствии – диспетчеру организации;

- принять меры по выводу людей из опасной зоны в соответствии с ПЛАС;

- при необходимости в соответствии с ПЛАС или по указанию ответственного руководителя отключить аппараты, установки, коммуникации и т.д.

Ответственным руководителем на уровне «А» развития аварийной ситуации является начальник цеха (установки), а до его прибытия на место аварии – начальник смены или сменный мастер. На уровне «Б» ответственным руководителем является технический руководитель организации, а до его прибытия на место аварии – диспетчер организации (начальник производства).

Ответственный руководитель создает командный пункт, функциями которого являются:

- сбор и регистрация информации о ходе развития аварийной ситуации и принятых мерах по ее локализации и ликвидации;

- текущая оценка информации и принятие решений по оперативным действиям в зоне аварии и за ее пределами;

- координация действий персонала объекта и всех привлеченных подразделений, участвующих в локализации и ликвидации аварийной ситуации.

Ответственный руководитель должен на уровне «А» развития аварийной ситуации:

- принять меры по оповещению работников организации и населения об аварийной ситуации;
- выявить количество и место нахождения людей застигнутых аварией;
- принять меры по оцеплению района аварии и опасной зоны;
- принять неотложные меры по спасению людей;
- обеспечить вывод из опасной зоны людей, которые не принимают непосредственного участия в локализации и ликвидации аварийной ситуации;
- ограничить допуск людей и транспортных средств в опасную зону.

На уровне «Б» развития аварийной ситуации ответственный руководитель дополнительно должен:

- в случае изменения места расположения командного пункта оповестить об этом всех привлекаемых к работам по ПЛАС лиц;
- контролировать выполнение своих распоряжений.

Диспетчер организации при получении сообщения об аварийной ситуации должен немедленно прекратить переговоры, не имеющие отношения к аварии и известить о ней должностных лиц и соответствующие организации. Руководители пожарной части организации и медицинского пункта должны организовать работу с учетом конкретной обстановки.

### **4.3. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.02 № 7-ФЗ (с изменениями от 22 августа, 29 декабря 2004 г., 9 мая, 31 декабря 2005 г., 18 декабря 2006 г., 5 февраля 2007 г.) требует при разработке проектной документации проведение оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) проектируемого объекта. Эта оценка проводится на стадии обоснования инвестиций в строительство объекта и основывается на материалах инженерно-экологических изысканий.

Целью разработки ОВОС является предотвращение или смягчение воздействия будущего объекта на окружающую среду и связанные с деятельностью этого объекта социальных, экономических и иных последствий. При проведении ОВОС используется информация о природных условиях площадки строительства и ее отдельных компонентов: воздушной среды, поверхностных и подземных вод, геологии, природных ландшафтов, животного и растительного мира, культурно-исторических памятников и мест.

Разработка ОВОС основана на принципе предполагаемой потенциальной экологической опасности объекта и решает следующие задачи:

- оценка состояния окружающей среды до реализации проектных решений;
- выявление основных факторов и видов негативного воздействия проектируемого объекта: загрязнение атмосферного воздуха, акустическое воздействие,

загрязнение поверхностных и подземных вод, загрязнение почв, общее экологическое воздействие;

– обоснование показателей предельно допустимого воздействия и правил природопользования, исходя из лимитирующих экологических факторов;

– разработка рекомендаций и мероприятий по ограничению или нейтрализации всех основных видов воздействия с учетом современных достижений (использование ресурсосберегающих технологий и систем защиты окружающей среды).

Министерство экологии и природопользования утвердило 1 января 1992 г. «Руководство по проведению оценки воздействия на окружающую среду при выборе площадки, разработке технико-экономического обоснования и проектов строительства (реконструкции, расширения и технического перевооружения) хозяйственных объектов и комплексов». Это Руководство разработано для методического обеспечения проведения ОВОС и в развитие ранее применяемых нормативных документов, например, ОВОСхимпром.

Данное Руководство предназначено для:

– организаций-заказчиков проектной документации, представляющих гарантии обществу по предотвращению (смягчению) отрицательных экологических воздействий;

– организаций-разработчиков проектной документации, представляющих гарантии заказчикам по обеспечению экологической безопасности реализации намечаемой деятельности;

– организаций и специалистов, привлекаемых к проведению ОВОС;

– органов государственного контроля в области экологии;

– общественных организаций и лиц, принимающих участие в обсуждении проектных решений и результатов ОВОС на всех стадиях проектирования.

В рассматриваемом Руководстве определены обязанности участников проведения ОВОС. Так заказчик несет ответственность за:

– организацию и проведение ОВОС в процессе проектирования;

– представление результатов ОВОС и проектной документации в органы государственного контроля;

– реализацию проектных решений;

– финансирование всех процедур ОВОС;

– организацию общественных слушаний проектных решений.

Вся документация по ОВОС подготавливается заказчиком, проектировщиком и организацией или специалистами по проведению ОВОС. Следует отметить, что Руководство (п. 10) предусматривает проведение ОВОС для различных случаев разработки проектов.

Разработчики обоснования инвестиций и проектной документации несут ответственность перед заказчиком за: соблюдение всех процедур ОВОС; достоверность, полноту, качество полученных результатов проведения ОВОС.

Общий порядок проведения ОВОС включает следующие основные мероприятия:

1) заказчик перед проектированием и проведением ОВОС подготавливает для получения согласия государственных органов власти и управления «Уведомление о намерениях» о намечаемой деятельности;

2) разработку проекта «Заявление о воздействии на окружающую среду» («проект ЗВОС»);

3) представление проекта ЗВОС в государственные органы власти, управления и контроля;

4) разработку задания на проектирование, изыскания и исследования в соответствии с требованиями, выдвинутыми по результатам рассмотрения проекта ЗВОС;

5) разработку ЗВОС на основе проекта ЗВОС по результатам изысканий и исследований;

6) организацию и проведение общественных слушаний ЗВОС;

7) доработку технико-экономического обоснования или принятие заказчиком решения о возможности и целесообразности реализации проекта.

При составлении проекта ЗВОС собирают и анализируют информацию об основных особенностях окружающей среды в районе площадки строительства, делают экспертные прогнозы и оценки изменения окружающей среды по основным вариантам проектных решений, разрабатывают предложения по мероприятиям для предотвращения или смягчения возможных неблагоприятных воздействий. Особое внимание при этом уделяют: существующим источникам антропогенного воздействия; состояниям воздуха, поверхностных и подземных вод, почв, недр, растительного и животного мира, визуальным качествам ландшафта, культурно-исторических памятников; социально-экономическим аспектам, инфраструктуре, занятости населения, демографии.

Затем по принятым проектным решениям делают описание и даются характеристики основных источников воздействия на окружающую среду:

– элементы технологий, которые являются причиной изменения окружающей среды;

– новые материальные объекты (сооружения), размещаемые в окружающей среде;

– следы деятельности (отвалы, накопители, свалки и т.д.);

– удаление существующих объектов;

– химические вещества;

– радиоактивные вещества;

– шум и вибрация;

– тепловыделения;

– электромагнитные излучения;

– визуальные доминанты;

– изъятие из окружающей среды земельных, водных и других природных ресурсов.

Воздействия будущего объекта на окружающую среду определяются через следующие показатели:

- 1) характер (прямое, косвенное, кумулятивное, синергическое);
- 2) интенсивность (величина воздействия в единицу времени);
- 3) уровень (величина воздействия на единицу площади или объема);
- 4) продолжительность;
- 5) временная динамика (непрерывное, периодическое, кратковременное, только при авариях и т.д.);
- 6) пространственный охват (площадь распространения);
- 7) степень опасности (по действующему классификатору опасных производств).

Следующим этапом проекта ЗВОС являются объекты воздействия:

- персонал предприятия (включая рабочую и санитарно-защитную зону);
- население, попадающее в зону воздействия;
- воздух, вода, почва, флора, фауна, климат, исторические памятники;
- социально-экономические условия жизни населения (занятость, демография, этнические особенности и т.д.).

Затем делают экспертные оценки и прогноз изменений окружающей среды как результат деятельности будущего объекта. Главными объектами при этом считаются воздух, поверхностные и подземные воды, почва, недра, растительный и животный мир, ландшафт, включая доминанты, материальные и культурно-исторические памятники. Далее дают предложения по мероприятиям (инженерным, технологическим и т.д.) для предотвращения или смягчения выявленных возможных неблагоприятных воздействий и составляются программы изысканий и исследований для проектирования в конкретных районах строительства. Проект ЗВОС подписывается всеми участниками проведения ОВОС, а заказчик представляет проект для рассмотрения в соответствующих органах в порядке согласно указанному выше Руководству.

После рассмотрения проекта на его основе разрабатывается ЗВОС, который состоит из разделов, аналогичных проекту ЗВОС. При этом имеются и принципиальные отличия (не приводится обоснование выбора площадки строительства, так как имеется в виду одна площадка; анализируются возможные аварийные ситуации и степень их риска; приводятся результаты прогнозирования и моделирования процессов для существенно затрагиваемых компонентов окружающей среды). Затем проводятся общественные слушания ЗВОС; доработка с учетом замечаний технико-экономического обоснования строительства объекта; оформление заказчиком акта выбора площадки.

Следует отметить, что порядок оформления результатов ОВОС определяется [20] (п. 11), в котором также отмечаются основные результаты исследований, выполненные на всех этапах проведения ОВОС:

- цель и необходимость реализации намечаемой проектом деятельности;
- технологический анализ проектных предложений;
- анализ природных условий площадки строительства и существующей антропогенной нагрузки;
- анализ и оценка источников и видов воздействия;

- выявление экологически значимых общественных позиций;
- прогноз изменений окружающей среды по экологически значимым позициям.

Все материалы, подготовленные в процессе проведения ОВОС, оформляются в самостоятельном разделе технико-экономического обоснования или проекта и подвергаются вместе с ними государственной экспертизе в соответствии с требованиями Руководства.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. *Каким основным Федеральным законом должен руководствоваться проектировщик в своей деятельности?*

- Федеральный закон 116-ФЗ;
- Уголовный кодекс Российской Федерации.

2. *Каковы признаки опасных производственных объектов?*

- список и предельные количества опасных веществ, применяемых на проектируемом объекте и указанных в Федеральном законе 116-ФЗ;
- наличие строительных конструкций;
- использование металлопроката.

3. *Что следует понимать под промышленной безопасностью?*

- состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий аварий;
- состояние неработающего предприятия;
- состояние экономической стабильности общества.

4. *Входит ли декларация промышленной безопасности в состав проектной документации?*

- входит;
- не входит.

5. *Какова периодичность пересмотра ПЛАС?*

- каждые 10 лет;
- не реже одного раза в 3 года;
- не реже чем один раз в 5 лет пересматривается и уточняется в случаях изменения в технологии, аппаратурном оформлении, аварий, метрологического обеспечения технологических процессов.

6. *На какой стадии проектирования делается оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) проектируемого объекта?*

- на стадии разработки рабочей документации;
- на стадии составления сметной документации;
- на стадии предпроектного обоснования инвестиций в строительство объекта.

# 5

## глава

### РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

При двухстадийном проектировании после разработки и утверждения проекта, а также подтверждения поставки запланированного оборудования разрабатывается рабочая документация. Эта документация готовится в составе и объеме, обеспечивающими по ней производство строительных и монтажных работ. Вся эта документация разрабатывается в соответствии с требованиями государственных стандартов и установленных норм.

Рабочая документация должна включать:

- рабочие чертежи объекта;
- сметы;
- ведомости объемов строительных и монтажных работ;
- ведомости потребности в материалах;
- расчеты показателей изменения сметной стоимости работ и затрат при применении в проектах достижений науки, техники и передового опыта;
- спецификации на оборудование, опросные листы и габаритные чертежи;
- паспорт строительных рабочих чертежей зданий и сооружений.

В состав рабочих чертежей входят строительно-монтажные чертежи, планы и разрезы размещения оборудования и трубопроводов. Также чертежи элементов нетиповых строительных конструкций, общие виды нетипового технологического оборудования в объеме, необходимом для выполнения конструкторской документации.

В процессе подготовки рабочей документации проектная организация дорабатывает и конкретизирует принципиальные решения, принятые при разработке проекта и его утверждении. При необходимости технологический отдел проектной организации вносит изменения в технологическую схему производства, а затем выполняет все недостающие расчеты, производит доработку компоновки оборудования, корректирует и выдает задания проектировщикам других отделов.

Одним из важных этапов подготовки рабочей документации объекта является монтажная проработка. *Монтажная проработка* – это процесс, конечным результатом которого будут чертежи трубопроводной обвязки технологического оборудования проектируемого производства и объекта в целом.

Основой для проведения монтажной проработки служат:

- принципиальная технологическая схема производства;
- компоновочные чертежи;
- чертежи общих видов оборудования;
- фрагмент генерального плана предприятия с указанием места расположения проектируемого объекта и направлением эстакад этого предприятия и подземных сетей.
- сортаменты труб и их деталей.

Монтажная проработка заключается в трассировке основных технологических магистралей и трубопроводной обвязке каждого узла схемы.

Вначале производят трассировку межцеховых магистралей и внутрицеховых, а затем делают обвязку каждого узла технологической схемы.

В отличие от машиностроительных чертежей здесь допускается некоторая условность изображения отдельных элементов.

В работе [21] представлены условные обозначения, применяемые при вычерчивании трубопроводных коммуникаций и арматуры (табл. 5.1).

При выполнении монтажных чертежей наиболее употребителен масштаб 1:50. Чертежи трассировки магистральных трубопроводов можно выполнять в масштабе 1:100. Сложные узлы с большим количеством мелких деталей следует вычерчивать в масштабах 1:20 и 1:10.

В зависимости от свойств транспортируемых веществ, а также требований, предъявляемых к качеству материала труб, и методов сварки, технологические трубопроводы делятся на три категории:

**I** – трубопроводы для огне- и взрывоопасных, агрессивных и токсичных продуктов вне зависимости от величины давления в них и температуры;

**II** – трубопроводы для продуктов, обладающих слабовыраженными коррозионными, огнеопасными и токсичными свойствами, а также трубопроводы для щелочей;

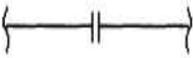
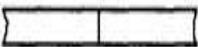
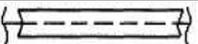
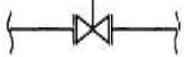
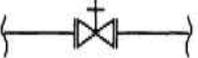
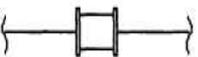
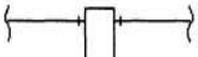
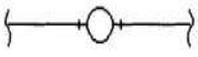
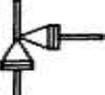
**III** – все остальные трубопроводы.

Кроме того, по типу материала, из которого они изготавливаются, трубопроводы делятся на металлические, металлические защищенные изнутри неметаллическими материалами и неметаллические.

Составными частями отдельного трубопровода являются цилиндрические тубы, детали для соединения труб между собой (фланцы, муфты), фасонные части для изменения направления и сечения (отводы, колена, переходные патрубки, тройники), трубопроводная арматура.

Трубопроводные детали рассчитывают на определенное «условное» давление, т.е. наибольшее рабочее давление, допускаемое в трубопроводе. Расчетное давление трубопроводов для агрессивных жидкостей принимают выше максимально возможного в трубопроводе по условиям технологического процесса.

### 5.1. Условные обозначения трубопроводной арматуры

Условное обозначение	Название трубопроводной арматуры
	Труба диаметром до 100 мм с фланцевым соединением участков
	Труба диаметром более 100 мм со сварным соединением
	Трубопровод с теплоизоляцией
	Трубопровод с тепловым спутником и теплоизоляцией
	Вентиль с фланцевым соединением
	Кран
	Обратный клапан
	Задвижка
	Клапан регулирующий
	Диафрагма расходомера
	Конденсатоотводчики
	
	Клапан предохранительный

Выбор труб и определение их диаметра проводится в такой последовательности. Вначале анализируются исходные данные: температура и давление транспортируемой среды, расход, вязкость, сведения о коррозионных, токсических и пожароопасных свойствах, удельный вес, а также назначение рассчитываемого участка трубопровода и технологические требования, предъявляемые к материалу труб. Затем выбирают материал труб. Выбор зависит от условного давления, химической агрессивности транспортируемой среды, требования к надежности и долговечности рассматриваемого участка трубопровода. Для защиты стальных труб от коррозии, а также для изготовления неметаллических труб применяют: винипласт, бутилкаучук, полиэтилен, полиизобутилен, резину, бутадиен-стирольный каучук, стекло, текстолит, фаолит, фарфор, хлоропреновый каучук.

После выбора материала труб переходят к гидравлическому расчету. Основной целью такого расчета является определение диаметра трубопровода. Одновременно определяют потери напора на отдельных участках.

Приблизительно внутренний диаметр трубопровода (м) определяют, задаваясь допустимой скоростью или допустимыми потерями напора:

$$d = \sqrt{\frac{4V_{\text{сек}}}{\pi w}},$$

где  $V_{\text{сек}}$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $w$  – средняя скорость жидкости, м/с.

Чем выше выбранная скорость  $w$ , тем меньше диаметр трубопровода, тем меньше затраты материала на его изготовление, а значит, его стоимость, а также стоимость монтажа и ремонта трубопровода. Вместе с тем, при увеличении скорости растут потери напора в трубопроводе, т.е. увеличивается перепад давлений, требуемый для перемещения жидкости, и, следовательно, затраты энергии на ее перемещение возрастают. Оптимальное значение диаметра трубопровода выбирают из условия минимума суммарных годовых расходов на эксплуатацию трубопровода.

Тщательно следует подбирать и трубопроводную арматуру. Под этим понятием объединены все механизмы и устройства, предназначенные для полного или частичного отключения отдельных участков трубопровода, предотвращения обратного тока жидкости или газа, а также опасного повышения давления.

По конструкции корпуса, и особенно запорного органа, а также по назначению арматура делится на несколько групп [21].

*Вентили* являются основными запорными устройствами трубопроводов для жидкостей и газов при любых давлениях и весьма высоких температурах. Они изготавливаются из чугуна, стали, пластмасс, цветных металлов. Вентили отличаются надежностью в работе, герметичностью, а также плавной регулировкой величины расхода, но имеют относительно высокое сопротивление (коэффициент сопротивления достигает семи) и большие габариты. Они непригодны для загрязненных и легко кристаллизующихся растворов. Следует помнить, что максимальный условный проход вентиля – 250 мм.

*Задвижки* служат запорными устройствами на трубопроводах среднего и большого диаметра (от 50 мм и выше). Основными преимуществами задвижек по сравнению с вентилями является малое сопротивление (коэффициент сопротивления не более двух) и небольшие габариты. Они могут применяться для загрязненных потоков. Однако герметичность задвижек ниже герметичности вентиляей соответственного диаметра.

*Краны* применяют в качестве запорной арматуры на трубопроводах диаметром до 200 мм, предназначенных для транспортирования жидкостей, легко застывающих продуктов и взвесей при температуре до 100 °С и давлении до 10 кг·с/см<sup>2</sup>.

Работа кранов в качестве запорной аппаратуры имеет некоторые особенности. Быстрое открывание проходного отверстия может привести к гидравлическому удару в трубопроводах, где протекают жидкости под давлением. В то же время краны обладают определенными преимуществами: они дают возможность пропускать жидкости, содержащие взвеси и кристаллы, создают небольшое гидравлическое сопротивление.

Корпус и пробка крана могут быть выполнены из чугуна, стали бронзы, латуни, а также из фарфора, стекла, фаянса.

*Предохранительные клапаны* предназначены для защиты трубопроводной системы от повышения давления выше предельно допустимого. Максимальный условный проход предохранительных клапанов 150 мм. Конструктивно предохранительные устройства делятся на пружинные, рычажные и на предохранительные пластины (мембраны).

*Обратные клапаны* устанавливаются на трубопроводах с целью предотвращения обратного хода жидкости или газа (например, при внезапной остановке насоса или компрессора). По конструкции запорного органа различают клапаны подъемные и поворотные.

К обратным клапанам можно также отнести и приемные клапаны, устанавливаемые на всасывающих трубах насосов для предотвращения опорожнения при кратковременной остановке. Приемные клапаны снабжаются фильтрами.

*Редукционные клапаны* применяются для понижения давления газа в трубопроводах, когда применение более точных и дорогих автоматических устройств нецелесообразно.

*Конденсатоотводчики* – это устройства, предупреждающие проскок водяного пара в линию сбора конденсата.

Трубопроводная арматура (вентили, задвижки, краны) может иметь различные приводы.

*Пневмопривод* обеспечивает надежность, плавную работу и полную взрывобезопасность, благодаря чему он широко распространен на химических предприятиях. Пневмоприводом в виде гибкой мембраны, прогибающейся под действием сжатого воздуха, оснащены регулирующие клапаны.

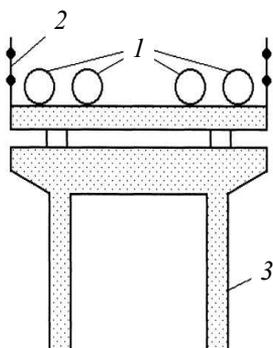
*Электропривод* состоит из асинхронного электродвигателя и редуктора. Устанавливается на задвижках, управление которыми требует больших усилий. Электродвигатели выпускаются как в нормальном, так и во взрывобезопасном исполнении.

Другим видом электропривода является электромагнит, сердечник которого связан со шпинделем вентиля (соленоидный вентиль). Усилие, развиваемое такими электроприводами, относительно невелико. Поэтому они устанавливаются на арматуре небольших размеров ( $D_y = 80...100$  мм).

Преимуществом соленоидного электропривода является быстродействие, благодаря которому такую арматуру можно применять в качестве отсекающего устройства, заблокировав ее электропитание с соответствующим датчиком.

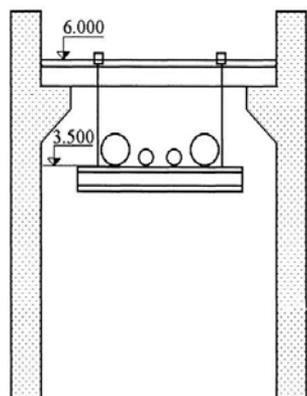
Как отмечалось выше, монтажная проработка заключается в трассировке магистралей и обвязке каждого узла схемы. Магистральные трубопроводы условно можно разделить на межцеховые и внутрицеховые. Межцеховые трубопроводы, относящиеся к магистральным коммуникациям, проектируются в виде прямолинейных участков вдоль магистральных проездов, параллельно линиям застройки цехов. Запрещается прокладывать магистральные трубопроводы для газов, легковоспламеняющихся и горючих веществ под зданиями, автомобильными и железными дорогами [21].

Для прокладки магистральных межцеховых трубопроводов используются эстакады (рис. 5.1), основными элементами которых являются железобетонные или металлические стойки с настилом и ограждениями для безопасного обслуживания и ремонта трубопроводных схем.



**Рис. 5.1. Межцеховая эстакада:**

- 1 – трубопровод;
- 2 – ограждение;
- 3 – железобетонная стойка



**Рис. 5.2. Внутрицеховая подвесная эстакада**

Места вводов в цех межцеховых трубопроводов намечаются в процессе компоновки технологического оборудования. Но при большой протяженности цеха иногда приходится предусматривать два ввода и более.

Для прокладки внутрицеховых трубопроводов можно использовать междуэтажные перекрытия, металлические этажерки и стены производственных помещений. Если количество магистральных трубопроводов велико, строят внутрицеховые эстакады (рис. 5.2).

Одновременно с уточнением мест ввода определяется характер прокладки магистральных трубопроводов. Трубопроводы большого диаметра (от 200 мм и выше) размещают как можно ближе к железобетонным колоннам с целью передачи нагрузки. Трубопроводы диаметром 150 мм и менее лучше располагать под перекрытиями.

На вводах и выводах трубопроводов с горючими газами устанавливается отключающая запорная арматура с дистанционным управлением на расстоянии 3...50 м от стены здания или аппарата, расположенного на открытой площадке. На вводах пара, инертного газа, сжатого воздуха должны быть предусмотрены предохранительные клапаны и редукторы.

Внутрицеховые трубопроводы прокладывают параллельно строительным осям, что облегчает в дальнейшем крепление трубопроводов и придает производству организованный и стройный вид.

Прокладку труб прямыми участками между аппаратами от штуцера к штуцеру следует допускать только в исключительных случаях, когда появление поворотов вызывает вибрацию выпадение твердой фазы из суспензий и т.п.

При трассировке магистральных трубопроводов, как внутрицеховых, так и межцеховых, придерживаются следующих правил.

Трубопроводы располагают одним пучком, сечение которого должно иметь простую форму (обычно это горизонтальные или вертикальные ряды), на таком расстоянии друг от друга и строительных конструкций, а также аппаратов, чтобы имелась возможность обслуживания фланцевых соединений, устройства опор, нанесения изоляции и краски.

При использовании неметаллических трубопроводов необходимо учитывать их невысокую механическую прочность. Поэтому при совместной прокладке металлических и неметаллических труб последние необходимо располагать так, чтобы исключить повреждения их при эксплуатации и монтаже.

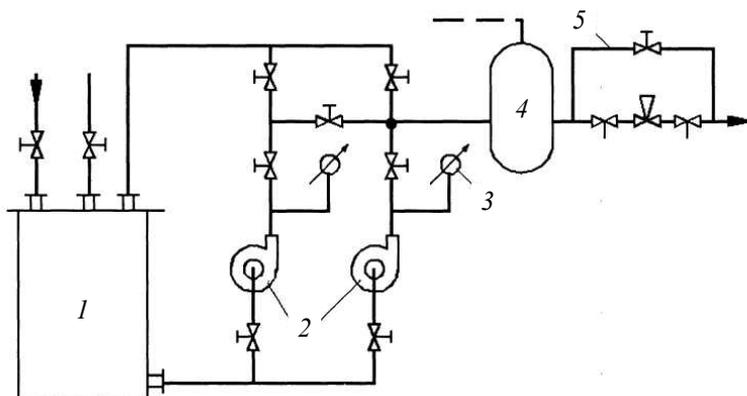
Горячие трубопроводы размещают на расстоянии 3 – 5 собственных диаметров от других труб. Если трубопровод работает при температуре выше 20 °С и имеет большую длину, то необходимо предусматривать на нем П-образные участки для компенсации температурных удлинений.

Трубопроводы должны обязательно иметь уклон в сторону аппаратов, служащих сборником жидкости, сливаемой при остановке технологического процесса. Уклон для безнапорных трубопроводов должен быть больше, чем для напорных. Безнапорные трубопроводы должны иметь на поворотах люки для чистки.

Рассмотрим далее трубопроводную обвязку некоторых технологических узлов [21].

*Узел насос–емкость.* В химической промышленности чаще всего применяют центробежные и поршневые насосы с электрическим приводом. Как правило, для одной емкости предусматривают два насоса: рабочий и резервный.

Схема обвязки такого узла представлена на рис. 5.3.



**Рис. 5.3. Схема обвязки узла «насос–емкость»:**

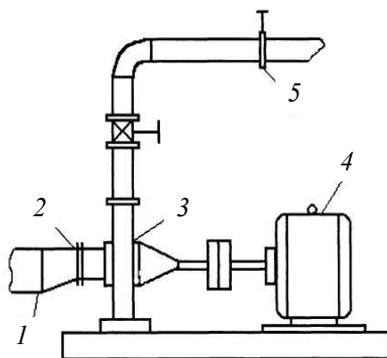
1 – сборник; 2 – рабочие или резервные насосы;  
3 – манометры; 4 – сосуд; 5 – гребенка регулирующая клапана

Если в технологической схеме предусматриваются два рабочих насоса, то на нагнетательных трубопроводах устанавливают обратные клапаны, предотвращающие вращение рабочего колеса насоса в обратную сторону при выходе его из строя. Для уменьшения пульсации потока жидкости в трубопроводе, особенно в случае использования плунжерных насосов, на нагнетательном трубопроводе устанавливают сосуд (на схеме указан под номером 4), в который подается газ из баллона (пунктирная линия).

К особенностям трубопроводной обвязки данного технологического узла необходимо отнести следующее. При различии диаметров всасывающего трубопровода и штуцера насоса, переходной патрубков между ними устанавливается эксцентрично, что предупреждает образование газовых пробок (рис. 5.4).

Для снятия нагрузки с нагнетательного штуцера насоса трубопровод желательно закрепить (за колонны, за стену и т.п.) Арматуру и трубопроводы следует устанавливать так, чтобы они не мешали обслуживать сальники, проводить операции по смазке и выверке соосности агрегата. При этом сам насос, соединенный с трубопроводами, как правило, крепится жестко на станине и служит базой, по которой центрируется его электродвигатель.

Гребенки регулирующих клапанов могут располагаться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Вертикальные гребенки крепятся на стенах, а сами трубопроводы крепят за колонны, стены и другие строительные элементы. Трубопроводы могут прокладываться в закрытых каналах, проходящих в полу цеха, что имеет ряд преимуществ: устраняются помехи передвижению внутрицехового транспорта и мостового крана. Насос при необходимости может обвязываться трубопроводами для подачи воды или другой жидкости в уплотнительное кольцо сальника или в его охлаждающий элемент.



**Рис. 5.4. Схема узла обвязки центробежного насоса:**

- 1 – всасывающий трубопровод;
- 2 – патрубок; 3 – насос;
- 4 – электродвигатель;
- 5 – крепление нагнетательного трубопровод

Если предусмотрен небольшой сток жидкости из сальникового уплотнения, необходимо оформить отвод этой жидкости – установить приемную воронку с отводящим трубопроводом.

*Узел компримирования.* Наибольшее распространение в химической промышленности нашли поршневые, центробежные, винтовые компрессоры. Трубопроводная обвязка одноступенчатых компрессоров проста и аналогична трубопроводной обвязке соответствующих насосов.

Общая система трубопроводов компрессора включает: системы газопроводов (всасывающие и нагнетательные трубопроводы с запорным вентилем или задвижкой), трубопроводные системы водяного охлаждения и смазки. В многоступенчатых компрессорах сжи-

маемый газ охлаждается в межступенчатых водяных холодильниках. Так же водой охлаждаются цилиндры компрессоров. Для этой цели в компрессорном отделении прокладывается коллектор промышленного трубопровода, от которого предусматривают отводы к каждому компрессору. После отработки вода направляется в закрытую воронку, а затем в коллектор ливневой канализации или в сборник. Из сборника вода насосом перекачивается в систему оборотного водоснабжения.

Система смазки компрессора часто имеет несколько схем. В поршневых и ротационных компрессорах имеется две схемы: смазка механизмов движения (подшипники, шейки коленчатого вала) и смазка цилиндров и гидравлического уплотнения. Для смазки механизмов движения компрессор снабжается масляным насосом. Смазка цилиндров и сальников осуществляется многоплунжерным насосом, приводимым в движение от коленчатого вала компрессора.

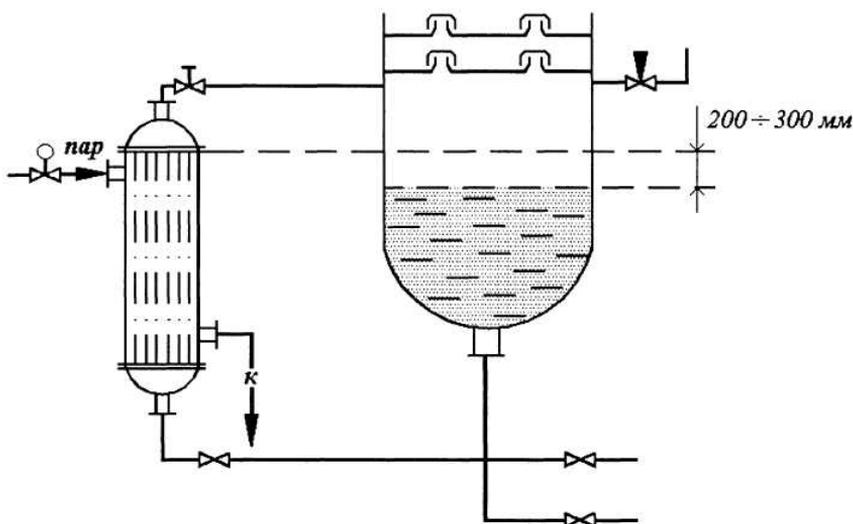
Если компрессорное отделение имеет большое число машин, то предусматривается централизованная система маслоснабжения [21]. Как правило, используется масло двух сортов: для смазки механизмов движения и для смазки цилиндров.

Конкретизируя изложенное выше, следует отметить, что перед монтажной проработкой компрессорного отделения намечают трассы коллекторов, связанных с нагнетательными и всасывающими патрубками прямой и оборотной охлаждающей воды, свежего и отработанного масла. Эти коллекторы желательно располагать у глухих стен один под другим. Если всасывающий и нагнетательные коллекторы имеют диаметры более 200 мм, то они прокладываются вне помещения.

Компрессоры требуют постоянного обслуживания и поэтому в компрессорных отделениях необходимо создавать оптимальные условия труда. В первую очередь это касается разработки мероприятий по борьбе с шумом. Неверный расчет диаметров трубопроводов и ошибки при их трассировке – основные причины превышения допустимых пределов шума. При этом источником шума является завышение диаметров газопроводов и местные сопротивления газовому потоку, когда радиус изгиба трубы менее  $3d$  ( $d$  – диаметр этой трубы). Трубопроводную обвязку компрессоров следует делать с учетом требований ремонта. Как правило, при ремонте крупных компрессоров используют мостовые краны.

*Ректификационная колонна.* Колонная аппаратура (абсорберы, адсорберы, ректификационные установки) широко распространена в химической промышленности. С точки зрения монтажной проработки ректификационная установка является наиболее сложной, поэтому рассмотрим особенности ее трубопроводной обвязки.

Все оборудование, входящее в ректификационную установку: колонна, кипятильник, подогреватель, дефлегматор, холодильники, емкости, насосы располагаются на различных высотных отметках, поэтому монтажные проработки ведутся для нескольких планов (план на отметке 0 м, план на отметке 6 м и т.д.). Монтажную проработку рекомендуют выполнять в масштабе 1:50. Особенности монтажной проработки ректификационной установки сводятся к следующему.



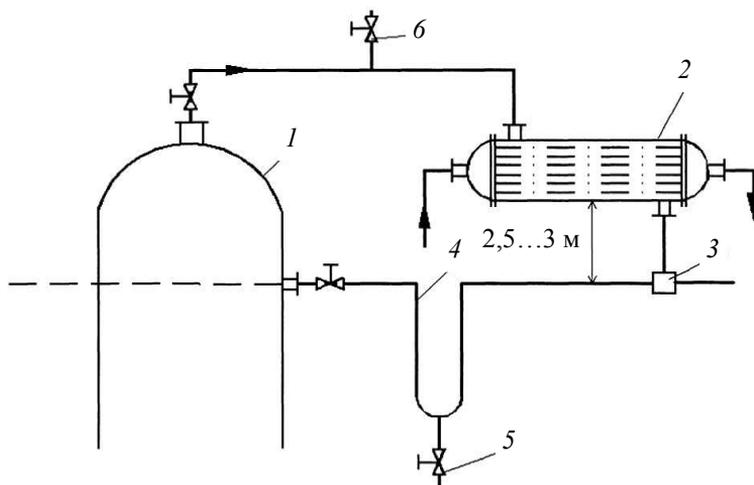
**Рис. 5.5. Схема обвязки куба колонны с выносным кипятильником**

*Куб колонны.* Кипятильник может быть выносным или встроенным. Трубопроводы, соединяющие выносной кипятильник кубового остатка с колонной, не должны нарушать естественную циркуляцию. Эта циркуляция обеспечивается тем, что кипятильник, обычно установленный вертикально, располагается так, чтобы его верхняя трубная доска была на 200...300 мм выше уровня жидкости в колонне (рис. 5.5).

При монтажной проработке этого узла ректификационной колонны также предусматривают трубопроводы для опорожнения, продувки аппарата азотом или воздухом. Кроме того, в жидкостной трубопровод врезают штуцер диаметром 6...10 мм с вентилем для отбора проб. Для защиты колонны от аварийного повышенного давления в газовое пространство нижней части колонны предусматривают штуцер установки предохранительного клапана.

*Дефлегматор колонны* может быть встроенным (парциальным) или выносным. Трубопроводная обвязка выносного дефлегматора зависит от способа подачи флегмы в колонну: самотек или с помощью насоса. В случае самотечной подачи дефлегматор устанавливается на 2...2,5 м выше точки ввода флегмы в колонну (рис. 5.6).

Трубопровод подачи флегмы должен иметь гидрозатвор (4) со спуском (5). Гидрозатвор обычно выполняется в виде петли. Он препятствует проскоку паров из колонны в нижнюю часть дефлегматора. В верхней точке паровой трубы колонны предусматривается воздушник (6), который необходим при опорожении колонны и гидравлическом испытании ее. В случае подачи флегмы с помощью насоса, создающего напор 6...8 атмосфер, дефлегматор устанавливается на высоте, обеспечивающей необходимый напор на всасывающем патрубке насоса.



**Рис. 5.6. Схема обвязки дефлегматора:**

1 – колонна; 2 – дефлегматор; 3 – разделительный стакан;  
4 – гидрозатвор; 5 – спуск; 6 – воздушник

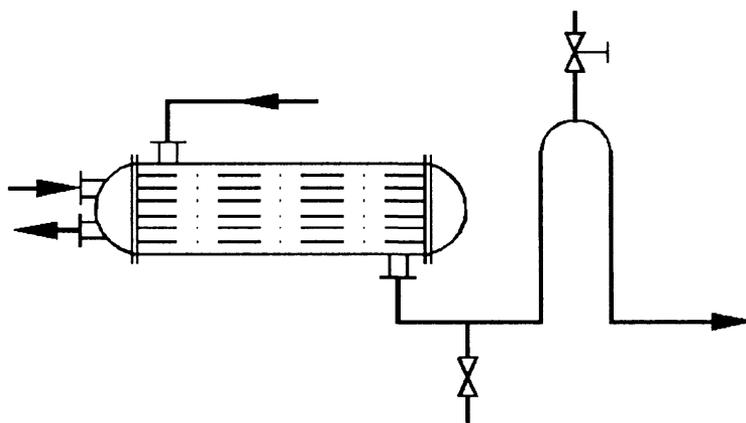
*Узел теплообмена.* Широкое распространение в промышленности получили кожухотрубчатые теплообменники, особенности трубопроводной обвязки которых мы и рассмотрим. Теплообменник должен обвязываться трубопроводами в соответствии с расчетной схемой потоков (противоток или прямоток). Отклонение трубопроводной обвязки от расчетной схемы может привести к снижению коэффициента теплопередачи.

Выбор рабочих пространств для теплоносителей производится с учетом следующих рекомендаций. Если аппарат предназначен для теплообмена между газом и жидкостью, то газ желательно вводить в межтрубное пространство, а жидкость – в трубное. Такое распределение пространств позволяет увеличить скорость движения газа за счет установки перегородок. Это увеличение скорости приводит к росту коэффициента теплоотдачи со стороны газа и увеличению общего коэффициента теплопередачи.

Загрязняющие поверхность продукты желательно вводить в трубное пространство, которое легче поддается чистке. Коррозионно-активные продукты также желательно направлять в трубное пространство, так как в этом случае кожух теплообменника можно изготовить из черного металла.

Продукты, обрабатываемые под значительным давлением, направляют в трубное пространство, так как обечайка при этом будет иметь незначительную толщину стенки.

Для случая передачи тепла от жидкости к жидкости расположение и обвязка должны обеспечивать заполнение всего объема как трубного, так и межтрубного пространств. Поэтому жидкие продукты вводят в аппарат через нижние штуцеры, а выводят через верхние. Такая обвязка способствует отводу из аппарата газов, накопление которых может резко снизить эффективность работы теплообменника.



**Рис. 5.7.** Схема трубопроводной обвязки теплообменника

Иногда не удается расположить и обвязать теплообменник, как рекомендовано выше. В этом случае на отводящих трубопроводах следует предусмотреть гидравлические затворы в виде вертикальных петель, в верхней части которых врезан патрубок-воздушник с вентилем для отвода газов. В нижней части такой петли предусматривают патрубок с вентилем для опорожнения теплообменника, как указано на рис. 5.7.

Ошибки, допущенные при трубопроводной обвязке, приводят к вибрации трубопроводов, температурным деформациям и гидравлическим ударам, что, в свою очередь, ведет к разрушению строительных конструкций, технологического оборудования, самих трубопроводов и их креплений.

*Источниками вибраций трубопроводов являются:*

- неравномерная подача газа или жидкости с помощью поршневых компрессоров и насосов;
- жидкостные и газовые пробки, возникающие из-за гидравлических мешков, заниженных диаметров трубопроводов;
- неравномерная работа плохо смонтированной мешалки и барботера;
- свободное истечение струи газа из «воздушки» от предохранительного клапана;
- неуравновешенность масс движущихся частей машин (дробилок, грохотов и т.п.).

Перечисленные источники вибрации необходимо исключать на стадии разработки технологической схемы. Поэтому вместо поршневых компрессоров и насосов закладывают в схему центробежные. Гидравлический расчет трубопроводов делают тщательно с учетом возможного падения давления, которое может привести к вскипанию жидкости и образованию газовых пробок, а гидравлические «мешки», которые не удастся избежать, снабжают дренажными патрубками. Выхлопная труба от предохранительного клапана должна иметь наконечник (отрезок трубы, расположенный перпендикулярно к основной).

Для исключения влияния неуравновешенных масс движущихся частей дробилок, грохотов и других факторов их располагают на нулевой отметке и на автономных фундаментах. При необходимости такое оборудование как насосы и вентиляторы могут устанавливаться на железобетонных перекрытиях, но под таким оборудованием должны быть вибропоглощающие подкладки из толстой резины. Кроме того, патрубки вентиляторов и воздухопроводы соединяются рукавами из мягкого материала, например, бельтинга.

Источниками температурных деформаций труб являются их температурные расширения или сжатия. Возникающие при этом напряжения могут превысить прочность труб и опор под них. При большой длине трубопровода, и когда разность между рабочей температурой трубы и температурой при монтаже ее превышает 30...40 °С, в конструкции трубопровода необходимо предусмотреть компенсаторы температурных удлинений.

Если давление в трубопроводе до 6 атм. и температурные удлинения его небольшие, то применяют линзовые и волнообразные компенсаторы. Следует отметить, что их применение ограничено существенными недостатками: невысокая прочность и большие осевые усилия, передаваемые на неподвижные опоры труб. Чаще всего для компенсации температурных удлинений используют включение в трубопровод изогнутых участков П, Г и Z-образной формы. При температурных удлинениях конфигурация такого изогнутого участка изменяется. Этот процесс называется самокомпенсацией.

*Источниками гидравлических ударов являются:*

- гидравлические «мешки» без дренажных устройств;
- разрывы потока жидкости в трубопроводах с заниженным диаметром при неправильном расчете его;
- скопление инертных газов в тупиковых участках и вскипание жидкости в трубопроводе;
- конденсация паров в трубопроводе;
- отсутствие влагоотделителей на всасывающих линиях компрессоров;
- неправильный выбор запорной арматуры для трубопровода (вместо вентилей – кран).

Для предотвращения гидравлических ударов рекомендуются следующие мероприятия. Поскольку длинные трубопроводы трудно проложить без гидравлических «мешков», то необходимо обеспечить непрерывный отвод жидкости из этих «мешков». На газопроводах предусматривают дренажные трубы диаметром 20...40 мм для отвода скопившегося конденсата.

Трубопроводы при необходимости теплоизолируются и снабжаются тепловыми спутниками для предотвращения изменения агрегатного состояния транспортируемого вещества, так как это изменение может привести к скоплению газа или образованию жидкостной пробки. Для обеспечения нормальной работы компрессора следует устанавливать эффективные сепараторы, а цилиндры компрессора должны располагаться выше обвязывающих его трубопроводов.

Следует отметить, что гидравлический удар может быть вызван провисанием газового трубопровода. В таком трубопроводе скапливается жидкость, скорость газа растет и возможен выброс жидкостной пробки. Поэтому необходимо опоры трубопроводов располагать согласно расчету. Длина пролета между опорами определяется в зависимости от допустимого напряжения на изгиб:

$$l = \sqrt{\frac{12 \sigma_{\text{и}} W}{100 q}},$$

где  $\sigma_{\text{и}}$  – допустимое напряжение на изгиб;  $W$  – момент сопротивления;  $q$  – вес 1 м трубы с материалом и изоляцией.

Сами опоры для трубопроводов бывают подвижными и неподвижными. К подвижным относят скользящие и катковые, а к неподвижным – хомутовые и приварные. Подвижные опоры применяют для трубопроводов с большими температурными удлинениями.

В заключение этого раздела следует отметить, что для исключения рутинной работы при подготовке этой документации, как и в течение всего процесса проектирования, следует использовать современные программные комплексы.

Одним из таких комплексов является *Auto Plant*, предназначенный для автоматизированного выполнения проектных работ. Он учитывает стиль проектирования традиционно принятый в России.

Следующим этапом подготовки рабочей документации является разработка монтажно-технологической схемы [21], основой для разработки которой служит принципиальная технологическая схема, документы монтажной проработки и чертежи технологического оборудования. Монтажно-технологическая схема показывает через трубопроводную обвязку особенности проектируемого процесса и двухстороннюю связь всех технологических узлов со схемой контроля и автоматизации. Кроме того, она указывает на возможности применения индивидуальных приемов монтажа оборудования и облегчает чтение монтажных чертежей.

При разработке монтажно-технологической схемы аппараты изображаются по высотным отметкам в масштабе и в строгом соответствии с их чертежами. На схеме показываются все штуцеры, люки и пунктиром внутренние устройства. Трубопроводы маркируют в соответствии с принятыми обозначениями и указывают их характеристики (диаметр, толщину стенки, материал).

В нижней части чертежа вычерчивают условно приборы контроля и автоматизации, которые связывают тонкими линиями с аппаратами, отображая таким способом весь комплекс взаимосвязанных процессов проектируемого производства.

После разработки монтажно-технологической схемы приступают к выполнению монтажных чертежей. Они представляют собой изображения в ортогональных проекциях трубопроводов и химического оборудования проектируемого предприятия. Основой для подготовки монтажных чертежей являются: чертежи монтажной проработки и монтажно-технической схемы, строительные чертежи и

чертежи отопительной и вентиляционной системы. На данном этапе проектирования делают чертежи разрезов и планов в масштабе 1:50. Количество разрезов должно быть таким, чтобы каждый аппарат хотя бы один раз попал в разрез. Необходимо помнить, что на монтажных чертежах в начале должны изображаться все строительные конструкции (колонны, ригели, балки, фундаменты, плиты) и все другие конструкции, которые будут определять места прокладки трубопроводов.

### Вопросы для самоконтроля

1. *Какой самый важный этап подготовки рабочей документации?*
  - разработка сметной документации;
  - монтажная проработка;
  - компоновка оборудования.
2. *Что является конечным результатом монтажной проработки?*
  - сметная документация;
  - чертежи трубопроводной обвязки технологического оборудования и объекта в целом;
  - ситуационный план.
3. *Какое запорное устройство обеспечивает плавную регулировку расхода газа или жидкости в трубопроводе?*
  - кран;
  - вентиль.

# 6

глава

## **ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, АППАРАТОВ И СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

### **6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПРОЦЕССА ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХТС**

Проблема интегрированного (совместного) проектирования химико-технологических процессов (ХТП), аппаратов, систем (ХТС) и систем автоматического управления (САУ) режимами их функционирования ставилась и частично решалась на протяжении многих десятилетий в работах В. В. Кафарова, Б. Н. Девятова, I. E. Grossmann, E. N. Pistikopoulos, M. Morari, Г. М. Островского, В. И. Бодрова, А. Ф. Егорова, Н. Н. Зиятдинова и др. [22 – 34].

Однако до настоящего времени нет законченной теории и сравнительно простых (инженерных) вычислительных алгоритмов для комплексного решения этой сложной многокритериальной проблемы.

Целью интегрированного проектирования ХТП, аппаратов, ХТС и САУ является обеспечение устойчивого и безопасного производства качественной конкурентоспособной химической продукции. Для этого необходимо обеспечить выполнение заданных регламентом производства технологических условий осуществления ХТП, норм технико-экономической эффективности функционирования технологического оборудования производства, норм экологической безопасности и безопасности жизнедеятельности обслуживающего персонала.

Достижение цели интегрированного проектирования возможно только при создании работоспособных (гибких) ХТП, аппаратов, ХТС и САУ. Под гибкостью ХТС здесь понимается ее способность к управлению и сохранению своего функционального назначения при случайном изменении внутренних и внешних неопределенных параметров. На стадии эксплуатации гибкого ХТП условия его осуществления, задаваемые технологическим регламентом производства, должны выполняться независимо от случайного изменения неопределенных парамет-

ров в заданной области за счет соответствующего выбора управляющих воздействий (режимов функционирования ХТС), реализуемых в САУ [24].

Анализ традиционных подходов к проектированию ХТС показывает, что стремление добиться максимальной эффективности функционирования ХТС в статических режимах (в статике) с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, как правило, приводит к выбору таких конструктивных параметров технологических аппаратов ХТС, при которых ухудшаются их динамические характеристики. В этом случае для обеспечения гибкости ХТС требуется использование сложных, а следовательно, дорогостоящих САУ. В то же время для улучшения динамических свойств ХТС и снижения общей стоимости проекта часто оказывается достаточно небольших изменений в конструкции технологического оборудования ХТП или конструктивных параметров его аппаратурно-технологического оформления [25].

Таким образом, при интегрированном проектировании гибких ХТП, аппаратов, ХТС и САУ оптимальные конструктивные параметры аппаратурного оформления ХТП, режимы функционирования ХТС и настроечные параметры САУ должны выбираться из условия разумного компромисса между эффективной работой ХТС с точки зрения энерго- и ресурсосбережения (в статике) и качеством управления режимами ее функционирования в динамике.

Особо следует выделить вопросы, касающиеся условий эксплуатации гибких ХТС и требований к технико-экономическим показателям производства, качеству выпускаемой продукции, интересующих потребителя. Наряду с качественными характеристиками (представленными в вербальной форме) можно выделить числовые показатели, для которых указаны области допустимых значений.

Требования к переменным состояния ХТС выражаются, как правило, в виде условий работоспособности:

$$y_i R y_i^H,$$

где  $y_i$  –  $i$ -я переменная состояния ХТС;  $R$  – вид отношения ( $=, <, >, \leq, \geq$ );  $y_i^H$  – норма  $i$ -й переменной состояния.

Фактически условия работоспособности ХТС представляют собой ограничения по спецификации качества производимой продукции, производительности, экологической безопасности производства и др. Проблема выполнения условий работоспособности ХТС сильно осложняется наличием неопределенности в физической, химической и экономической информации, используемой при ее проектировании.

В связи с этим принципиально важно рассматривать на стадии проектирования влияние неопределенных параметров на работоспособность и оптимальность функционирования ХТС.

Традиционно при проектировании ХТС решается задача оптимизации в статике: для заданных структуры производства и типов аппаратурно-технологиче-

ческого оформления требуется определить конструктивные и режимные (управляющие) переменные, при которых достигается минимум целевой функции проектирования при связях в форме уравнений материального и теплового балансов и ограничениях, связанных с безопасностью ХТС и экологической безопасностью, обеспечением заданных значений производительности, качественных и технико-экономических показателей выпускаемой продукции и ХТС, соответственно.

Учет неопределенности при традиционном проектировании ХТС осуществляется введением эмпирического коэффициента запаса  $\gamma_{\text{зап}}$  (обычно принимают  $\gamma_{\text{зап}} = 1,25$ ) к размерам оборудования, полученным в результате решения сформулированной задачи нелинейного программирования. Понятно, что традиционная процедура не имеет рациональной основы для выбора коэффициента запаса  $\gamma_{\text{зап}}$ , что зачастую приводит к неработоспособности спроектированной ХТС, например, неустойчивости найденных оптимальных режимов функционирования ХТС в статике, и необходимости ее перепроектирования, а это сопряжено с дополнительными затратами.

Таким образом, задача интегрированного проектирования ХТП, аппаратов, ХТС и САУ режимами их функционирования должна ставиться с учетом наличия неопределенности в исходной информации, триаде «модель–алгоритм–программа» ХТС, устойчивости оптимальных статических режимов функционирования, оптимального уровня необходимой экспериментальной информации, гибкости и управляемости ХТС.

Химическое производство представляет последовательность трех основных переделов: подготовки сырья, собственно химического превращения и выделения целевых продуктов. Эта последовательность переделов воплощается в единую сложную ХТС. Под ХТС (объектом) далее в книге понимается либо химико-технологический аппарат, либо отдельный агрегат или технологическая схема химического производства, а также физико-химические процессы, осуществляемые в конкретном объекте.

Современное химическое предприятие как ХТС большого масштаба состоит из большого числа взаимосвязанных подсистем (производств, цехов, отделений, отдельных агрегатов, реакторов, технологических машин и аппаратов, систем автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами и производством), между которыми существуют отношения соподчиненности в виде иерархической структуры с тремя уровнями (рис. 6.1).

Отдельная подсистема химического предприятия представляет собой совокупность технологических процессов, аппаратов и систем автоматического управления, действующих как одно целое для достижения заданной цели.

Первую низшую ступень иерархической структуры химического предприятия как сложной ХТС образуют типовые процессы химической технологии, осуществляемые в определенном аппаратурном оформлении (механические, гидродинамические, тепловые, диффузионные и химические процессы), и локальные системы управления (стабилизации) ими.

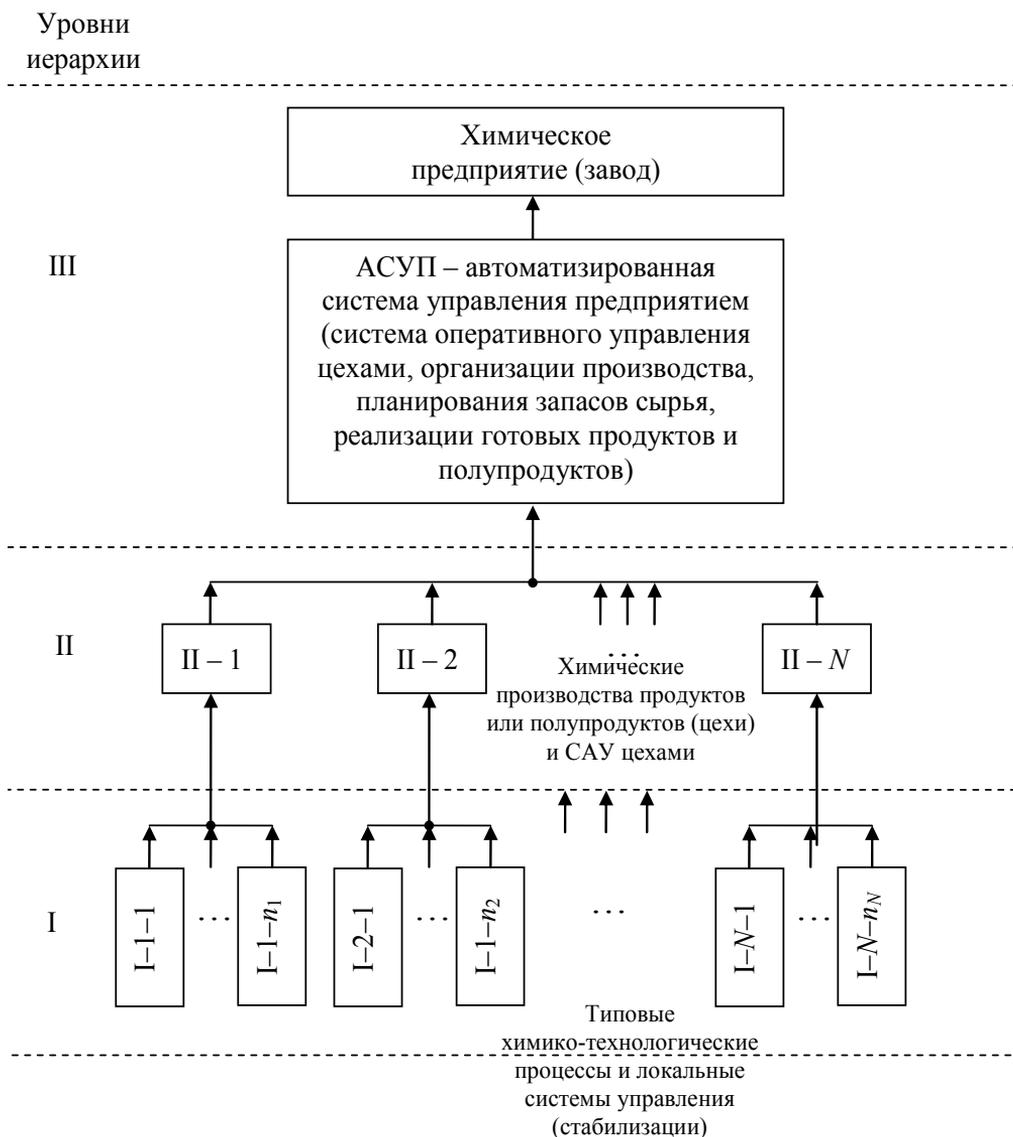


Рис. 6.1. Иерархическая структура химического производства

Каждый типовой ХТП, осуществляемый в том или ином аппаратном оформлении, или определенную взаимосвязанную совокупность типовых ХТП рассматривают как ХТС или ее подсистему, имеющую некоторые определенные входы (количественные характеристики потоков сырья и полупродуктов, конструктивные и режимные параметры, возмущающие воздействия) и выходы (переменные состояния ХТС, количественные характеристики потока готовой продукции, технико-экономические показатели ХТС, показатели энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности ХТС и т.п.).

Введем обозначения:  $C(\bullet)$  или  $I(\bullet)$  – критерий эффективности проектируемой ХТС;  $\omega \in \Omega$  – ассортимент выпускаемой продукции;  $\mathfrak{R}$  – структура ХТС (совокупность технологических стадий химического производства и связей между ними);  $a \in A$  – тип аппаратурного оформления технологических стадий производства;  $z \in Z$  – вектор режимных (управляющих) переменных функционирования технологических стадий производства;  $d \in D$  – вектор конструктивных параметров технологического оборудования производства;  $b \in B$  – класс системы автоматического управления (автоматические системы регулирования, системы статической оптимизации, системы динамической оптимизации и т.п.);  $h \in H$  – структура системы управления;  $s \in S$  – вектор настроечных параметров системы управления;  $\xi \in \Xi$  – вектор внешних и внутренних неопределенных параметров ХТС.

Операторы математических моделей технологических процессов химического производства и системы управления имеют вид

$$\mathfrak{I} : \Omega \times \mathfrak{R} \times A \times D \times Z \times U \times X \times \Xi \rightarrow Y$$

или

$$Y = \mathfrak{I}(\omega, a, d, z, u, x, \xi),$$

$$\psi : B \times Y \times X \times Z \times S \times \Xi \rightarrow U$$

или

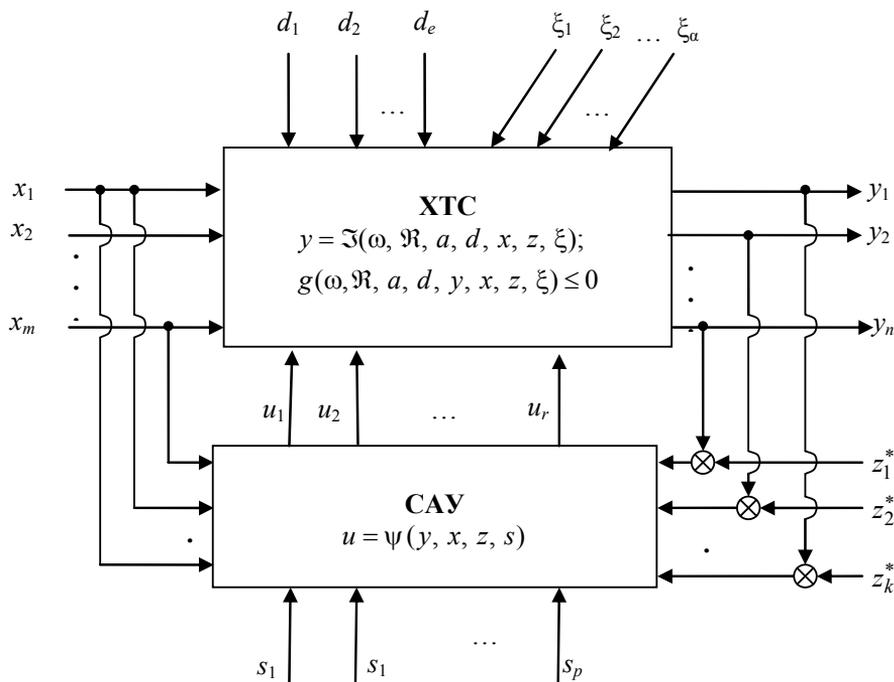
$$U = \Psi(b, y, x, z, s, \xi).$$

Структурная схема ХТС представлена на рис. 6.2.

При анализе функционирования ХТС входные переменные разделяют на возмущающие и режимные (управляющие) переменные (воздействия). Возмущающие переменные, являющиеся количественной характеристикой внешних и внутренних возмущений, которым всегда подвержена любая ХТС (изменение расхода и состава сырья, изменение температуры в аппаратах и т.д.), стремятся противодействовать целенаправленному осуществлению ХТП, отклоняя их от заданного направления. Для того чтобы при функционировании ХТС выходные переменные соответствовали заданным (целевым) значениям и не отклонялись от них под влиянием возмущающих переменных, на ХТС необходимо воздействовать управляющими переменными, являющимися количественной характеристикой управляющих воздействий ХТС (изменение расхода, состава или других характеристик исходного сырья).

Типовые ХТП, осуществляемые в определенном аппаратурном оформлении, чаще всего представляют собой детерминированные системы, для которых выходные и все входные переменные заранее известны и между ними существует однозначная функциональная зависимость.

На нижней ступени иерархии химического предприятия происходит структурное обогащение информации, характеризующей функционирование подсистем, а задачу управления подсистемами в основном сводят к локальной стабилизации технологических параметров типовых ХТП.



**Рис. 6.2. Структурная схема автоматизированной ХТС:**

$\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\alpha)$  – вектор неопределенных параметров (возмущающих воздействий) объекта;  $z = (z_1, z_2, \dots, z_k)$  – вектор режимных переменных состояния ХТС (оптимальных заданий регуляторам);

$u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$  – вектор управляющих переменных (управлений) объекта;

$s = (s_1, s_2, \dots, s_p)$  – вектор настроечных параметров системы автоматического управления;

$Z(\bullet)$  – оператор модели ХТС;  $\Psi(\bullet)$  – оператор системы управления ХТС;

$g(\bullet)$  – оператор технологических ограничений функционирования объекта;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  – вектор входных переменных объекта;

$y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектор выходных переменных объекта;

$d = (d_1, d_2, \dots, d_l)$  – вектор конструктивных параметров объекта

Основу второго уровня иерархии химического предприятия составляют производственные цеха и системы автоматического управления цехами. Цех – это взаимосвязанная совокупность отдельных типовых технологических процессов, систем, машин и аппаратов, при взаимодействии которых возникают статистические распределенные по времени возмущения, т.е. существуют стохастические взаимосвязи между входными и выходными переменными подсистем. Для анализа функционирования подсистем второго уровня иерархии необходимо использовать статистико-вероятностные математические методы. На этой ступени иерархии происходит статистическое обогащение информации, а при управлении подсистемами возникают задачи оптимизации и программирования для оптимальной координации работы аппаратов и оптимального распределения нагрузок между ними.

Третий, высший уровень иерархической структуры химического предприятия – это системы оперативного управления совокупностью цехов, системы организации производства, планирования запасов сырья и реализации готовых продуктов. На этой ступени иерархии происходит семантическое обогащение информации и возникают задачи ситуационного анализа и оптимального управления всем предприятием, для решения которых применяют математические модели системотехники – теории игр, исследования операций, теории массового обслуживания и др., требующие привлечения различных специалистов в области экономики, организации производства и управления.

Современные химические производства отличаются многостадийностью получения целевых продуктов, сложностью технологических решений, высокой энергонасыщенностью и материалоемкостью, большой протяженностью и сложностью трубопроводных и кабельных коммуникаций, глубокой функциональной взаимозависимостью по материальным, энергетическим и информационным потокам отдельных стадий. Для размещения таких сложных производств, коммуникаций и всех служб возникает необходимость в создании специализированных зданий, подземных сооружений и эстакад.

Строительство и пуск промышленных производств связаны со значительными затратами денежных средств, материальных и трудовых ресурсов и поэтому они должны вестись по проектам, обеспечивающим:

- реализацию последних достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта;
- внедрение высокопроизводительного энергосберегающего оборудования, установок и агрегатов большой единичной мощности;
- рациональное использование природных ресурсов, комплексное использование сырья и материалов, организацию малоотходной энергосберегающей технологии производства;
- автоматизацию и механизацию ХТП, отдельных технологических машин и аппаратов.

Развитие современных химических производств сопровождается значительным усложнением их структуры, созданием энерготехнологических циклов, машин и аппаратов сложных конструкций, работающих в условиях агрессивных сред, высоких температур и давлений. В связи с этим при интегрированном проектировании необходимо решать также и проблемы охраны окружающей среды, обоснованного применения конструкционных материалов, обеспечения надежности технологического оборудования, безопасности производства. Все это требует совершенствования процесса интегрированного проектирования, повышения качества рабочей документации, четкого определения совокупности нормативных документов по отдельным стадиям проекта.

Структурно-параметрическое описание химического производства изображено на рис. 6.3. В зависимости от производимого ассортимента  $\omega$  оно включает в себя различные совокупности технологий (технологических стадий производства), может иметь альтернативные варианты аппаратурно-технологического

оформления стадий  $a_1, a_2, a_3, \dots$ , которые фиксируются на уровне параметрического описания множествами  $D_1, D_2, D_3, \dots$  конструктивных параметров, и характеризуется множеством режимных (управляющих) переменных  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$  ( $U_1, U_2, U_3, \dots$ ). Для управления технологическими процессами (аппаратами) могут быть выбраны различные классы систем автоматического управления  $b_1, b_2, b_3, \dots$ , фиксация параметров которых осуществляется на уровне множеств настроечных параметров  $S_1, S_2, S_3, \dots$ .

Помимо структурно-параметрического описания, представляющего собой множество проектных параметров и ограничений, при проектировании ХТС необходимо иметь в наличии математические модели (статики и динамики) технологических процессов (аппаратов), отражающие связи показателей эффективности функционирования проектируемого производства, конструктивных и режимных (управляющих) переменных с входными переменными ХТС и исходными данными для проектирования.

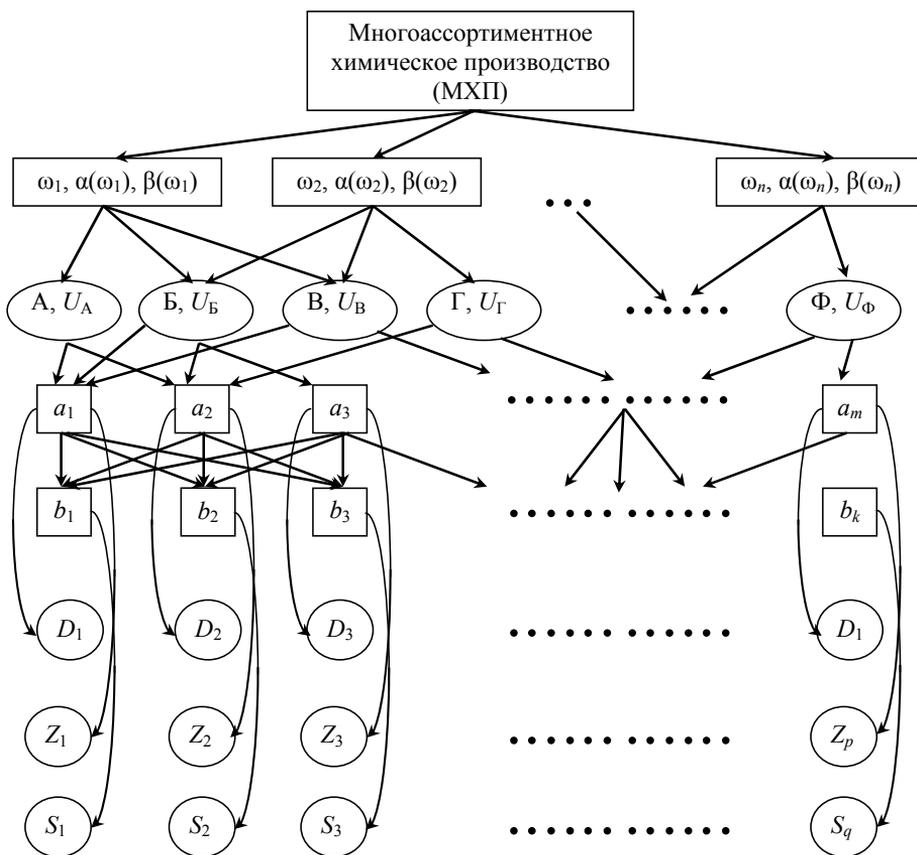


Рис. 6.3. Структурно-параметрическое описание ХТС, функционирующих в составе МХП

Структурно-параметрическое описание проектируемого многоассортиментного химического производства удобно интерпретировать И/ИЛИ графом, в котором множество вершин разбито на два класса (рис. 6.3): И-вершины (изображенные в виде квадратов) и ИЛИ-вершины (изображенные в виде кругов).

Первый ярус – И-вершины ( $\omega$ ,  $\alpha(\omega)$ ,  $\beta(\omega)$ ) интерпретируются как исходные данные для проектирования; здесь задаются ассортимент, спецификация качества выпускаемой продукции и требования к проектируемому производству в соответствии с техническим заданием.

Второй ярус – ИЛИ-вершины содержательно интерпретируются как совокупность технологий (технологических стадий) проектируемого химического производства и структур управления производством.

Третий ярус – также ИЛИ-вершины соответствуют альтернативным вариантам аппаратного оформления технологических стадий и систем автоматизации (управления) этими стадиями. Конкретный вариант структурно-параметрического описания дается деревом и получается отождествлением каждой И-вершины с одной из ее подвершин (фиксация параметрического описания), выделением из каждой группы ИЛИ-вершин, имеющих И-вершину (родителя), одной ИЛИ-вершины и отождествлением последней с одной из ее подвершин (фиксация структурного описания). Формализацию структурно-параметрического описания завершает его отождествление с вершинами конструктивных  $d \in D$  и настроечных параметров  $s \in S$  системы управления химическим производством.

С использованием графа, оценочных функций  $I(\bullet)$  эффективности функционирования проектируемого химического производства, эвристических и экспертных оценок выбирается наиболее перспективный вариант аппаратного оформления и системы управления технологическими процессами химического производства.

## 6.2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХТС

Общим для задач принятия оптимальных решений, которые возникают на разных стадиях и этапах интегрированного проектирования ХТС, является то, что они могут быть сформулированы математически в форме задач нелинейного или стохастического программирования. К сожалению, среди численных методов оптимизации не существует универсального. Как правило, решение задач оптимизации на различных этапах проектирования требует индивидуального подхода и связано с применением нескольких методов поиска оптимальных решений, и даже в этом случае успех во многом будет зависеть от квалификации и опыта проектировщика. В связи с этим в интегрированных САПР ХТС большое внимание отводится вопросам принятия оптимальных решений в интерактивном режиме, когда проектировщик имеет возможность оперативно взаимодействовать с ЭВМ на любом этапе решения задачи. При этом в результате диалога он

может изменять как число, так и тип варьируемых (оптимизируемых) переменных, выбирать наиболее эффективный в сложившейся ситуации метод поиска, подстраивать численные параметры методов к конкретным особенностям целевой функции (критерия эффективности) оптимального проектирования ХТС.

Такой подход к принятию оптимальных решений в интегрированных САПР ХТС позволяет осуществлять адаптацию методов оптимизации к особенностям и трудностям конкретной практической задачи, но для этого проектировщик должен понимать, в каких случаях и какие методы оптимизации необходимо применять для того или иного класса экстремальных задач, возникающих на различных этапах проектирования ХТС.

Количественную информацию об эффективности функционирования и о характеристиках свойств проектируемой ХТС можно получить методом компьютерного моделирования. Для этого многомерные массивы количественной информации о состоянии ХТС в различные моменты времени и при различных условиях должны быть сведены к ограниченному числу некоторых агрегированных переменных (обобщенных оценок эффективности функционирования и характеристических свойств проектируемой ХТС). Указанные обобщенные оценки представляют собой числовые функциональные характеристики химического производства.

Критерий эффективности (целевая функция) функционирования ХТС – это числовая функциональная характеристика, оценивающая степень приспособления ХТС к выполнению поставленных перед нею задач. Критерии эффективности широко используют для сравнительной оценки альтернативных вариантов при проектировании ХТС, оптимизации конструктивных и режимных переменных ХТС, сравнительной оценки алгоритмов управления технологическими режимами функционирования ХТС. В общем случае критерий эффективности функционирования ХТС зависит от конструктивных и режимных переменных, структуры ХТС и управления ею, внешних и внутренних случайных или неопределенных факторов (параметров)  $\xi \in \Xi$ . Пусть критерий эффективности  $I(\bullet)$  химического производства представляет собой векторную целевую функцию. Введем также множества  $I \in E^p$  показателей эффективности функционирования производства и  $Q \in E^q$  показателей технологических условий (ограничений), соответствующих технологическому регламенту эксплуатации производства и определяющих наряду с критерием  $I(\bullet)$  достижение целей, указанных в техническом задании на проектирование ХТС. Будем считать, что на множествах  $I$  и  $Q$  заданы функциональные зависимости  $\alpha : \Omega \rightarrow I$ ,  $\beta : \Omega \rightarrow Q$ .

Заметим, что вектор  $\xi \in \Xi$  помимо части входных переменных (расходов, концентраций, температуры, гранулометрического состава и т.п.) включает также известные с некоторой степенью неопределенности физико-химические и термодинамические характеристики перерабатываемых веществ, свойства конструкционных материалов технологического оборудования, коэффициенты тепло-

и массопереноса, кинетические константы химических реакций и т.п. Неопределенные параметры могут быть заданы некоторыми априори известными интервалами значений, что необходимо учитывать при расчете процессов и аппаратов проектируемой ХТС.

Решение задачи оптимального проектирования сложной ХТС невозможно простым перебором возможных структур (технологий) получения заданных ассортиментов продукции, типов аппаратурно-технологического оформления процессов, классов и структур систем управления, векторов конструктивных и режимных переменных из-за высокой размерности задачи (см. рис. 1.3), нелинейности технологических процессов, сложности алгоритмов вычисления компонент векторной целевой функции  $I(\bullet)$ . Требуется декомпозиция задачи, разработка стратегии применения методов автоматизированного проектирования, поскольку допустимая область проектных параметров  $\Omega \times \mathfrak{R} \times A \times D \times Z \times X \times \Xi$  строится в ходе самого процесса проектирования.

Сформулируем в общем виде задачу проектирования энерго- и ресурсосберегающей ХТС в статике. Требуется определить такие  $\mathfrak{R}^*$ ,  $a^* \in A$ ,  $b^* \in B$ ,  $d^* \in D$ ,  $z^* \in Z$ , при которых для заданного  $\omega \in \Omega$  выполняются соотношения

$$M_{\xi} \left\{ I(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, z^*, \xi) \right\} \succ \alpha(\omega); \quad (6.1)$$

$$Pr_{\xi} \left\{ g(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, z^*, \xi) \leq \beta(\omega) \right\} \geq \rho_{\text{зад}}, \quad (6.2)$$

где  $\succ$  – знак частичного упорядочения на множестве  $I$  показателей эффективности функционирования ХТС;  $M_{\xi} \{ \bullet \}$  – математическое ожидание величины  $\{ \bullet \}$  на множестве  $\Xi$ ,  $\Xi = \left\{ \xi \mid \xi_k^{\min} \leq \xi_k \leq \xi_k^{\max}, k = \overline{1, n} \right\}$ ;  $Pr_{\xi} \{ \bullet \}$  – вероятность выполнения технологических условий (ограничений)  $g(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, z^*, \xi) \leq \beta(\omega)$ ;  $\rho_{\text{зад}}$  – значение гарантированной вероятности выполнения технологических условий (ограничений).

Сформулированная задача (6.1), (6.2) заключается в определении такой структуры  $\mathfrak{R}^*$  ХТС, системы машин и аппаратов, технологических трубопроводов  $a^*$  и автоматического управления технологическими процессами  $b^*$ ,  $z^*$ , вектора конструктивных  $d^*$  параметров ХТС, варианта компоновки технологического оборудования и т.п., для которых усредненные показатели эффективности производства  $M_{\xi} \{ I(\bullet) \}$  для заданного ассортимента  $\omega$  не хуже заданных  $\alpha(\omega)$ , а технологические условия (ограничения)  $g(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, z^*, \xi) \leq \beta(\omega)$  выполняются с заданной (гарантированной) вероятностью  $\rho_{\text{зад}}$ . При  $\rho_{\text{зад}} < 1$  получаем задачу с мягкими (вероятностными) ограничениями, при  $\rho_{\text{зад}} = 1$  – задачу с жесткими ограничениями.

Используя системный подход, нами предложена декомпозиция задачи стохастического программирования (6.1), (6.2) в виде последовательности итерационно детерминированных задач нелинейного программирования и оптимального управления, решаемых высокоэффективными традиционными методами. При этом обеспечивается поэтапное сужение множеств  $A$ ,  $D$ ,  $B$  и  $Z$ . Блок-схема многостадийной стратегии интегрированного проектирования химических производств и систем автоматического управления показана на рис. 6.4.

В соответствии с разработанной методологией интегрированного проектирования итерационно решаются три основные задачи: 1) генерирование альтернативных вариантов ХТС, удовлетворяющих условиям гибкости (в жесткой, мягкой или смешанной форме); 2) выбор альтернативных классов и структур САУ ХТС, удовлетворяющих условиям структурной наблюдаемости и управляемости ХТС с заданными динамическими свойствами по каналам управления; 3) решение одно- или двухэтапной задач оптимизации конструктивных и режимных (управляющих) переменных комплекса «ХТС–САУ» в условиях неопределенности по векторному критерию, включающему показатели качества производимой продукции, энерго- и ресурсосбережения, а также технико-экономические показатели производства.

В качестве альтернативных классов систем автоматического управления будем рассматривать замкнутые (с обратной отрицательной связью) и разомкнутые системы, предназначенные для решения задач стабилизации режимов, адаптивной статической оптимизации, динамической оптимизации (определение программы управления), программного управления (реализации известной программы управления) и оптимального управления нестационарными режимами ХТС (для полунепрерывных и периодических процессов).

Выбор класса и структуры САУ осуществляется с использованием множества регулируемых (наблюдаемых) переменных и управляющих воздействий, полученных из анализа структурной матрицы уравнений динамики ХТС. При этом учитываются наблюдаемость выходных переменных ХТС, оценка затрат на разработку необходимых датчиков, приборов, возможность и точность прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемость ХТС с той или иной комбинацией управляющих воздействий. Альтернативные классы и структуры САУ исследуются методом имитационного моделирования в порядке их ранжирования по критерию экономической целесообразности. Для допустимых структур САУ проводится исследование динамических показателей (регулируемости, инерционности и др.) ХТС по каналам управления (регулирования). В том случае, если управляемые в статике ХТС имеют неудовлетворительные динамические характеристики, то производится коррекция конструктивных и режимных параметров ХТС (найденных на первом этапе), либо выбираются новые типы аппаратурного оформления ХТС.

Для решения задач синтеза энерго- и ресурсосберегающего управления нелинейными (по фазовым координатам) ХТС в замкнутой САУ применяются высокоэффективные методы АКОР по критерию обобщенной работы академика А. А. Красовского [35, 36].

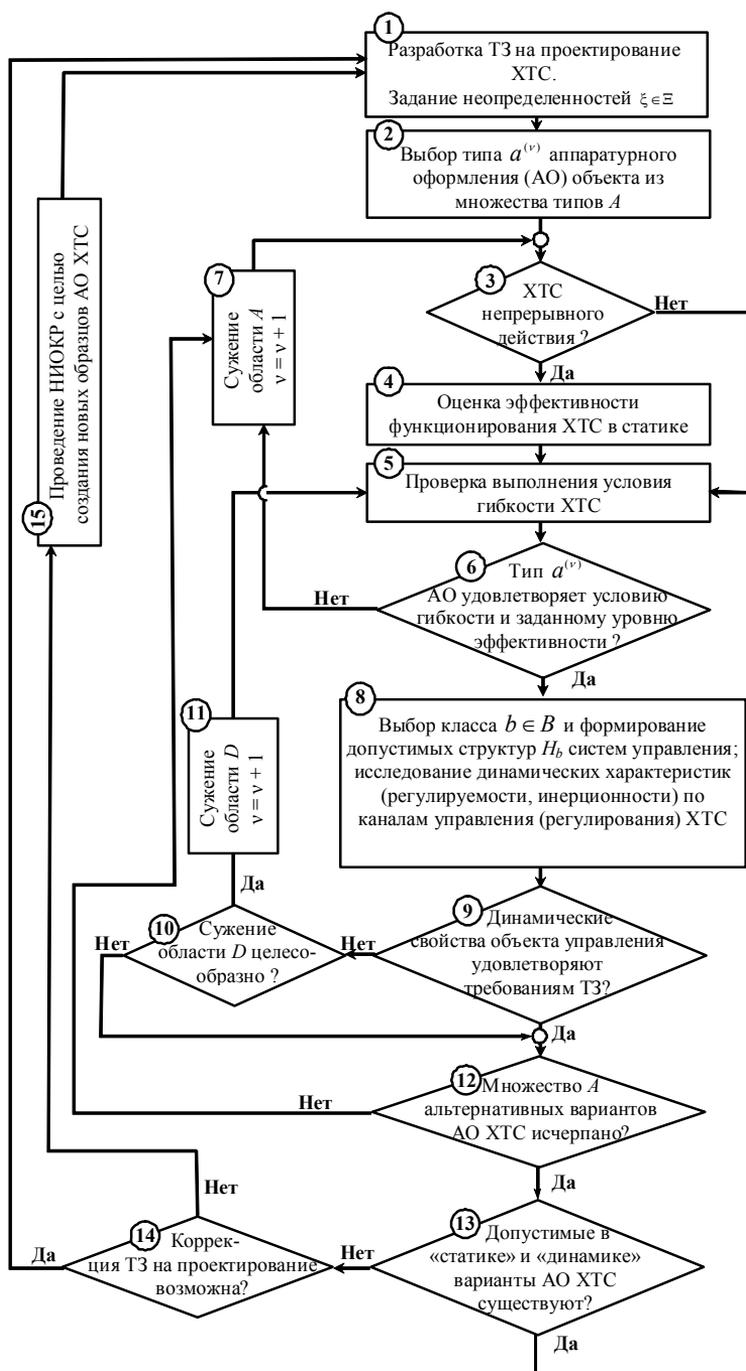


Рис. 6.4. Блок-схема принятия решений при интегрированном проектировании автоматизированных ХТС:

ТЗ – техническое задание; АО – аппаратное оформление;  
САУ – система автоматического управления

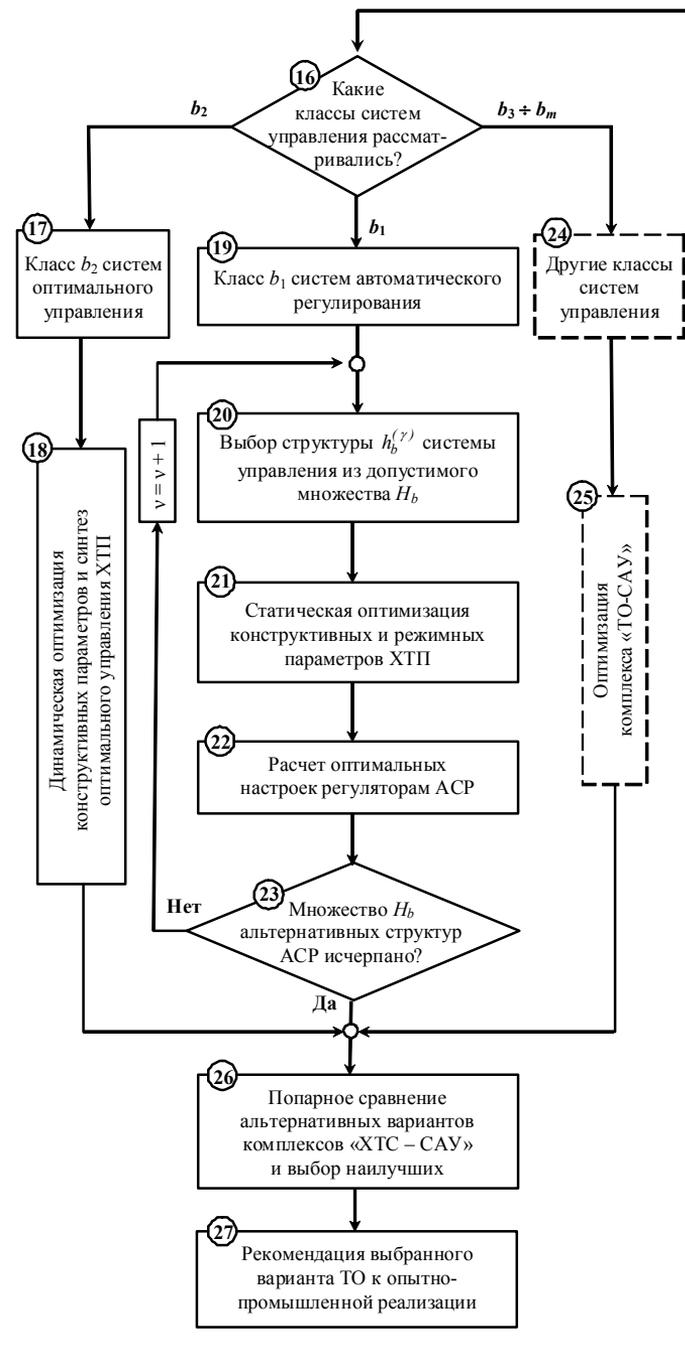


Рис. 6.4. Окончание

На завершающем этапе интегрированного проектирования осуществляется решение многокритериальной задачи оптимизации для альтернативных комплексов «ХТС–САУ». В ходе имитационных исследований помимо вычисления оценок показателей энерго- и ресурсосбережения, экономической целесообразности также определяется техническое задание на точность и быстродействие информационно-измерительной подсистемы, алгоритмов оптимального управления, исполнительных механизмов и устройств управления, на разработку подсистем адаптации моделей и алгоритмов управления. По результатам имитационных исследований проверяется достижимость поставленных целей функционирования ХТС и осуществимость требований технического задания. В том случае, если эти требования не достижимы, осуществляется переход к новым обликам аппаратного оформления ХТС или выбору новой структуры ХТС.

Из рисунка 6.4 следует, что при проектировании автоматизированной ХТС решается комплекс сложнейших задач: выбор способа (технологии) и структуры ХТС, расчет и выбор технологического оборудования с заданными статическими и динамическими характеристиками, определение оптимальных режимов его функционирования, разработка системы автоматического управления (регулирования) и(или) автоматизированного управления отдельными технологическими стадиями (процессами) и производством в целом, составление оперативно-производственных планов и др. Проектирование ХТС включает в себя разработку технического задания (ТЗ), отражающего потребности общества в продукции этого производства, и реализацию ТЗ в виде проектной документации. Обычно ТЗ представляют в виде некоторых документов и оно является исходным (первичным) описанием проектируемого химического производства. Результатом проектирования служит полный комплект документации, соединяющий достаточные сведения для воспроизводства (реализации объекта проектирования). Эта документация и есть проект, точнее окончательное описание проектируемой ХТС.

В техническом задании на проектирование ХТС указывают следующие сведения:

- назначение ХТС;
- литературные данные о технологии производства и сведения об аналогичных ХТС за рубежом;
- обзор научно-исследовательских работ по отдельным технологическим стадиям производства; описание технологических схем опытных и полупромышленных установок, на которых отрабатывался технологический процесс;
- основные технико-экономические показатели объекта, в том числе мощность, производительность, производственная программа (план);
- требования к качеству, конкурентной способности и экологическим параметрам продукции;
- требования к технологии;
- технические характеристики исходного сырья, основных продуктов и вспомогательных материалов (включая воду, азот для технических целей, теплоносители и хладагенты); области применения основных продуктов;

- физико-химические свойства исходных, получаемых промежуточных и конечных продуктов;
- химизм процесса по стадиям; физико-химические основы процесса, предварительная (эскизная) технологическая схема производства;
- рабочие (номинальные) технологические параметры (режимы) производства;
- материальный баланс производства по стадиям процесса;
- характеристики побочных продуктов и отходов; рекомендации по их утилизации;
- математическое описание технологических стадий;
- рекомендации по автоматизации производства;
- методы очистки сточных вод и обезвреживания газовых выбросов;
- экономическое обоснование производства, включающее прогнозы потребности в товарном продукте и обеспечение производства сырьем на перспективу.

Из приведенного перечня требований (рекомендаций) ТЗ следует особо выделить вопросы, касающиеся условий эксплуатации химического производства и требований к выходным переменным производства (химико-технологических процессов и аппаратов), интересующим потребителя. Наряду с качественными характеристиками (представленными в вербальной форме) можно выделить числовые параметры, для которых указаны области допустимых значений.

### **6.3. МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХТС**

Методология интегрированного проектирования сложных ХТС, как следует из вышестоящих разделов книги, отражает характерную для сложных систем невозможность полной централизации в одном звене обработки информации и принятия решений по управлению процессом проектирования. Это приводит к необходимости формирования иерархической структуры системы автоматизированного проектирования, соответствующей уровневой декомпозиции объекта проектирования и этапной декомпозиции самого процесса проектирования.

Процесс интегрированного проектирования сложного химико-технологического объекта протекает преимущественно «сверху вниз», т.е. имеет нисходящий характер. При этом по мере «проработки» проекта «сверху вниз» увеличивается подробность описания (детализации) проектируемой ХТС. Цель выполняемых на различных этапах проектирования расчетных и экспериментальных исследований – уточнить параметры и характеристики проектируемого объекта, принять наиболее рациональные проектно-конструкторские решения. Отсюда следует итерационно-циклический характер процесса проектирования, выражающийся в чередовании процедур синтеза и анализа проектно-конструкторских решений.

Проектно-конструкторские решения принимаются в условиях неопределенности (противоречий), связанных с неполнотой имеющейся информации на ранних этапах проектирования, с грубым (неточным) описанием (моделированием) отдельных стадий проектируемой ХТС, использованием упрощенных методик оценки его показателей и т.п. Таким образом, весь ход разработки проекта ХТС

можно интерпретировать как последовательный процесс снятия неопределенностей (разрешения противоречий).

Интегрированное проектирование занимает особое место среди информационных технологий. Во-первых, интегрированное проектирование – синтетическая дисциплина, ее составными частями являются многие другие современные информационные технологии. Так, техническое обеспечение интегрированных САПР основано на использовании вычислительных сетей и телекоммуникационных технологий, в интегрированных САПР используются персональные компьютеры и рабочие станции. Математическое обеспечение интегрированных САПР отличается богатством и разнообразием используемых методов вычислительной математики, статистики, математического программирования, дискретной математики, искусственного интеллекта. Программные комплексы интегрированных САПР относятся к числу наиболее сложных современных программных систем, основанных на операционных системах *Unix*, *Windows-95NT*, языках программирования *C*, *C<sup>++</sup>*, *Java* и других современных CASE-технологиях, реляционных и объектно-ориентированных системах управления базами данных (СУБД), стандартах открытых систем и обмена данными в компьютерных средах.

Во-вторых, знание основ интегрированного проектирования и умение работать со средствами интегрированных САПР требуется практически любому инженеру-разработчику сложных технических объектов. Компьютерами насыщены проектные фирмы, конструкторские бюро и офисы. Предприятия, ведущие разработки без интегрированных САПР или лишь с малой степенью их использования, оказываются неконкурентоспособными как вследствие больших материальных и временных затрат на проектирование, так и из-за невысокого качества проектов.

Принципиально важно при интегрированном проектировании рассматривать влияние неопределенных параметров на работоспособность и оптимальность функционирования ХТС [22 – 24].

При проектировании ХТС всегда присутствуют неопределенности двух родов. Одни из них, такие как параметры сырья и температура окружающей среды, могут изменяться во время их работы, оставаясь в пределах некоторого диапазона изменений. Для них принципиально невозможно указать единственное значение. Другие могут быть в реальности постоянными для данного промышленного аппарата, но их значения известны с точностью до определенного интервала, например некоторые коэффициенты в кинетических уравнениях и уравнениях тепло- и массопереноса. Чтобы учесть неопределенности в математическом описании проектируемого объекта, достаточно их выделить в зависимостях для целевой функции (критерия оптимальности)  $I$  и функций-ограничений  $g_j$  задачи оптимального проектирования, считая, что  $I = I(a, d, z, \xi)$ ,  $g_j = g_j(a, d, z, \xi)$ ,  $j = 1, \dots, m$ , где  $\xi$  – вектор неопределенных параметров, принимающих любые значения из заданной области  $\Xi$ .

Все переменные в задаче оптимального проектирования ХТС в условиях неопределенности параметров могут быть разделены на следующие категории. Вектор  $a$  проектных параметров ассоциируется со структурой ХТС и типом тех-

нологического оборудования, а вектор  $d$  – размерами оборудования. Эти переменные, как правило, считаются неизменными, когда проект реализован, и не меняются в процессе функционирования ХТС.

Вектор  $z$  ассоциируется с режимами функционирования ХТС и обозначает управляющие переменные, точнее оптимальные задания регуляторам САУ, которыми можно манипулировать в процессе функционирования химико-технологического объекта таким образом, чтобы, во-первых, выполнялись требования ТЗ и обеспечивалась работоспособность о объекта, и, во вторых, минимизировались эксплуатационные затраты.

Вектор  $\xi$  задает неопределенные параметры. Предположим, что нам задано номинальное значение вектора неопределенных параметров  $\xi^N$  и ожидаемые отклонения  $\Delta\xi^+$ ,  $\Delta\xi^-$  от номинального значения  $\xi^L = \xi^N - \Delta\xi^-$ ,  $\xi^U = \xi^N + \Delta\xi^+$ . Тогда область  $\Xi$ , содержащую все возможные значения неопределенных параметров, можно представить в виде

$$\Xi = \{\xi \mid \xi^L \leq \xi \leq \xi^U\}.$$

Традиционно при проектировании ХТС решается более простая, в отличие от (6.1), (6.2), задача оптимизации

$$\min_{d,z} \bar{I}(d, y, z, \xi^N), \quad (6.3)$$

при связях и ограничениях

$$y = \mathfrak{Z}(d, z, \xi); \quad (6.4)$$

$$\bar{g}_j(d, z, \xi) \equiv y_{j\text{зад}} - y_j \leq 0, \quad j=1, \dots, m, \quad (6.5)$$

где  $\bar{I}(\bullet)$  – критерий оптимального проектирования;  $y, d, z, \xi$  – векторы выходных, конструктивных, режимных (управляющих) переменных и неопределенных параметров проектируемого объекта соответственно;  $y = \mathfrak{Z}(d, z, \xi)$  – оператор математической модели химико-технологического объекта;  $y_{j\text{зад}}$  – предельно допустимое значение  $j$ -й выходной переменной химико-технологического объекта;  $\bar{g}_j(d, z, \xi) \leq 0, \quad j=1, \dots, m$  – функции ограничений;  $\xi^N$  – номинальное значение вектора неопределенных параметров.

Если вектор выходных переменных (или переменных состояния)  $y$  выразить (может быть неявно) как функцию  $d, z, \xi^N$  из уравнений материального и теплового балансов  $Q(d, z, y, \xi) = 0 \Rightarrow y = \mathfrak{Z}(d, z, \xi)$  и подставить в зависимости  $\bar{I}(d, y, z, \xi^N)$  и  $\bar{g}(d, y, z, \xi^N)$ , то получим известную «приведенную» постановку задачи оптимизации конструктивных и режимных переменных химико-технологического объекта при интегрированном проектировании:

$$\min_{d,z} I(d, z, \xi^N) \quad (6.6)$$

при ограничениях

$$g_j(d, z, \xi^N) \leq 0, \quad j \in J. \quad (6.7)$$

В этом случае решение задачи оптимального проектирования по критерию  $I = I(d, z, \xi)$  и с функциями-ограничениями  $g_j = g_j(d, z, \xi)$ ,  $j = 1, \dots, m$ , оказывается неопределенным и зависит от значения, которое принял вектор  $\xi$ .

Ограничения в задаче оптимального проектирования могут быть «жесткими» (безусловными) и «мягкими» (вероятностными). Жесткие ограничения не должны нарушаться ни при каких условиях. Мягкие ограничения должны выполняться с заданной вероятностью. Большинство реальных задач относится к случаю, когда часть ограничений является «жесткими», другая часть – «мягкими». Например, ограничения по безопасности промышленного аппарата относятся к разделу «жестких», а ограничения на производительность и селективность могут быть отнесены к разделу «мягких».

Традиционный путь преодоления данного затруднения состоит в следующем. Вектору неопределенных параметров приписывают некое «номинальное» значение  $\xi = \xi^N$  и решают задачу проектирования при номинальном  $\xi^N$  с получением номинального значения вектора конструктивных переменных  $d^N$  при заданном типе аппаратного оформления. После этого на основе имеющихся знаний о проектируемом объекте и интуиции вводят так называемые коэффициенты запаса  $k_i$  ( $k_i > 1$ ) и принимают при проектировании  $d_i = k_i d_i^N$ , где  $d_i$  –  $i$ -я компонента вектора  $d$ ,  $i = 1, \dots, n$  (длина и диаметр реактора, поверхность теплообмена в теплообменнике, число тарелок в ректификационной колонне и т.п.).

Недостатки данного подхода очевидны, так как он не гарантирует ни оптимальности полученного решения, ни того, что все ограничения будут выполнены во время эксплуатации промышленного аппарата. Если коэффициенты запаса окажутся недостаточными, то ограничения будут нарушены, если слишком большими, то проект не будет экономичным.

Существенно более правильным и научно обоснованным является подход, когда неопределенность в коэффициентах математического описания и технологических параметрах учитывается в самой постановке задачи интегрированного проектирования.

Важнейшим компонентом работоспособности проектируемой ХТС является «гибкость» – способность ХТС иметь допустимую рабочую точку (режим) функционирования для всего диапазона  $\Xi$  неопределенных условий, которые могут возникать в процессе эксплуатации ХТС. Понятно, что и другие компоненты работоспособности ХТС, такие как управляемость, надежность, безопасность и другие в равной степени важны. Тем не менее исследование гибкости проекти-

руемой ХТС – это первый шаг, который должен быть сделан для оценки работоспособности проекта.

Можно сформулировать две задачи, связанные с анализом гибкости проектируемой ХТС: оценка работоспособности ХТС для априори заданного интервала неопределенности; количественная оценка индекса гибкости проекта и определение максимально достижимого уровня индекса гибкости проекта.

Задача анализа работоспособности проектируемой ХТС, определяемой вектором проектных (конструктивных) параметров  $d$ , будет заключаться в определении управляющих переменных  $z$  таких, чтобы выполнить ограничения (требования по спецификации качества выпускаемой продукции, производительности, надежности технологического оборудования, безопасности производства и др.):

$$g_j(d, z, \xi) \leq 0, \quad j \in J \quad (6.8)$$

для всех  $\xi \in \Xi$ .

Рассмотрим при фиксированном  $\xi$  следующую задачу:

$$\eta(d, \xi) = \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi), \quad (6.9)$$

где  $\eta(d, \xi)$  – функция выполнимости ограничений (6.8). Если  $\eta(d, \xi) \leq 0$ , то проектируемый технический объект, описываемый вектором  $d$ , работоспособен при фиксированном  $\xi$ ; в противном случае, при  $\eta(d, \xi) > 0$  – неработоспособен при фиксированном  $\xi$ .

При  $\eta(d, \xi) = 0$  проектируемый технический объект с вектором  $d$  находится на границе допустимой области функционирования, поскольку в этом случае  $g_j(d, z, \xi) = 0$  хотя бы для одного номера  $j \in J$ . Задачу (6.9) можно переформулировать в форме стандартной задачи математического программирования, определяя скалярную величину  $\alpha$  такую, что

$$\eta(d, \xi) = \min_{z, \alpha} \alpha \quad (6.10)$$

при ограничениях

$$g_j(d, z, \xi) \leq \alpha, \quad j \in J. \quad (6.11)$$

Если  $g_j(\bullet)$  – нелинейные функции по  $z$ , то задача (6.10)–(6.11) представляет собой задачу нелинейного программирования.

Для установления работоспособности проектируемой ХТС необходимо убедиться в том, что  $\eta(d, \xi) \leq 0$  для всех  $\xi \in \Xi$ . В этом случае задача анализа гибкости проектируемой ХТС, описываемой вектором проектных параметров  $d$ , может быть сформулирована в виде

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \eta(d, \xi), \quad (6.12)$$

где  $\chi(d)$  – соответствует функции гибкости проекта ХТС с вектором  $d$ .

При  $\chi(d) \leq 0$  допустимое функционирование (работоспособность) ХТС может быть достигнуто для всей области  $\Xi$  возможных изменений вектора неопределенных параметров  $\xi$ .

При  $\chi(d) > 0$  допустимое функционирование ХТС невозможно для некоторой подобласти  $\Xi$ .

Математическая постановка задачи (6.13) анализа гибкости проектируемой ХТС может быть сформулирована в виде

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi). \quad (6.13)$$

Введем количественную оценку гибкости проекта, определяемого вектором конструктивных параметров  $d$ .

Для этого запишем область изменения неопределенных параметров в виде

$$\Xi(\delta) = \{ \xi \mid \xi^N - \delta \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \Delta \xi^+ \},$$

где  $\delta$  – неотрицательная скалярная переменная: при  $\delta = 1$  имеем  $\Xi(1) = \Xi$ ; при  $\delta < 1$  –  $\Xi(\delta) \subset \Xi$ ; при  $\delta > 1$  –  $\Xi \subset \Xi(\delta)$ .

*Определение.* Будем называть индексом гибкости  $F$  наибольшее значение  $\delta$ , для которого выполняются ограничения (6.8) для всей области  $\Xi(F)$ .

Сформулируем математическую постановку задачи (6.14) определения индекса гибкости  $F$  проектируемой ХТС, описываемого вектором проектных параметров  $d$

$$F = \max \delta$$

при ограничениях

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi(\delta)} \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi) \leq 0,$$

$$\Xi(\delta) = \{ \xi \mid \xi^N - \delta \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \Delta \xi^+ \}, \quad (6.14)$$

$$\Xi(F) = \{ \xi \mid \xi^N - F \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + F \Delta \xi^+ \}.$$

Значения неопределенных параметров  $\xi^c \in \Xi(F)$ , соответствующие решению задачи (6.13), называются критическими точками.

Если удастся установить, что критические точки соответствуют вершинам многогранника  $\Xi(F)$ , то решение задач (6.13) и (6.14) может быть значительно упрощено. Рассмотрим задачу анализа гибкости проекта в предположении, что  $\xi^k$ ,  $k \in K$  представляют вершины многогранника  $\Xi$ . В этом случае можно записать, что

$$\chi(d) = \max_{k \in K} \eta(d, \xi^k),$$

где  $\eta(d, \xi^k)$  находится из решения задачи оптимизации (6.9).

Следует заметить, что в задаче (6.13) величина  $\chi(d)$  достигает нулевого значения,  $\chi(d) = 0$ , в точке оптимального решения, поскольку критическая точка всегда будет находиться на границе допустимой области функционирования ХТС. Пусть  $\Delta\xi^k, k \in K$  обозначает направление от номинальной точки  $\xi^N$  до  $k$ -й вершины многогранника  $\Xi$ . Тогда максимальное отклонение  $\delta^k$  от границы вдоль  $\Delta\xi^k$  мы получим из решения следующей экстремальной задачи:

$$\delta^k = \max_{z, \delta} \delta, \quad k \in K$$

при ограничениях

$$g(d, z, \xi^k) \leq 0, \quad j \in J,$$

$$\xi^k = \xi^N + \delta \Delta\xi^k.$$

Анализ полученных прямоугольных областей изменения  $\xi$  показывает, что только наименьший прямоугольник может быть вписан в допустимую область, который определяет индекс гибкости

$$F = \min_{k \in K} \{ \delta^k \}.$$

На рисунке 6.5 изображен диапазон изменения вектора неопределенных параметров  $\xi$ , который ассоциируется с индексом гибкости для данного проекта ХТС [28, 37].

Следует заметить, что только при условии выпуклости функций  $g_j(\bullet)$  по переменным  $z$  и  $\xi$  критические точки  $\xi^c$  будут соответствовать вершинам многогранника  $\Xi$ .

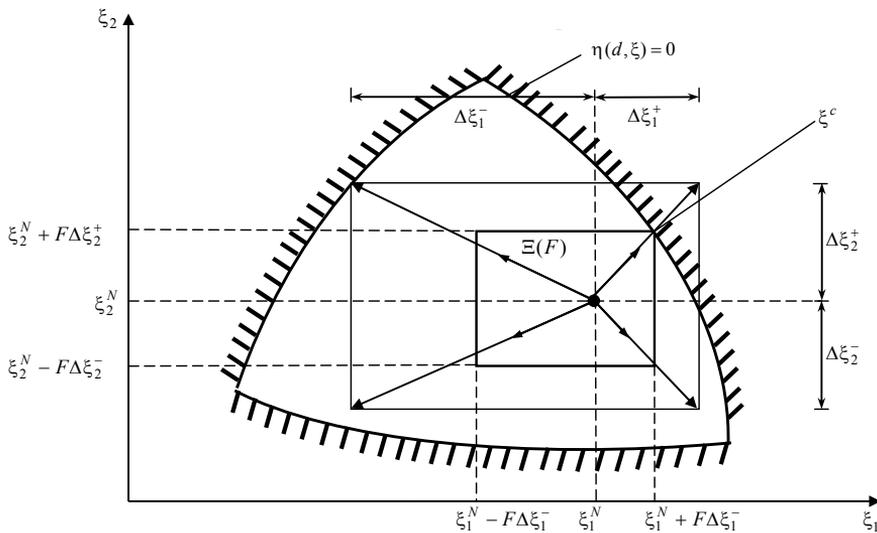


Рис. 6.5. Наибольшая допустимая область изменения параметров  $\xi$

Это условие существенно ограничивает применение рассмотренных выше постановок задач анализа гибкости (6.13) и определение индекса гибкости (6.14) при проектировании ХТС, поскольку возникают определенные трудности в проверке условий выпуклости функций ограничений  $g_j(\bullet)$ .

Вторая проблема, возникающая при решении сформулированных выше задач (6.13) и (6.14) методом анализа вершин многогранника  $\Xi$ , – проблема размерности решаемой задачи. Так при  $n_p = 10$  требуется решение экстремальных задач типа (6.9) в количестве  $2^{10} = 1024$ , а при  $n_p = 20 - 2^{20} = 1\,048\,576$ , где  $n_p$  – размерность вектора  $\xi \in \Xi$ .

В задаче интегрированного проектирования ХТС проектные переменные  $d$  должны быть выбраны таким образом, чтобы минимизировать математическое ожидание стоимости  $C(d, z, \xi)$  проекта ХТС:

$$\min_d M_\xi \left[ \min_z C(d, z, \xi) \mid g(d, z, \xi) \leq 0 \right], \quad (6.15)$$

или

$$\min_d M_{\xi \in \Xi(F)} \left[ \min_z C(d, z, \xi) \mid g(d, z, \xi) \leq 0 \right]$$

при ограничениях

$$\max_{\xi \in \Xi(F)} \eta(d, \xi) \leq 0,$$

где  $M_\xi \{\bullet\}$  – символ математического ожидания случайной величины  $\xi$ ;  $F$  – индекс гибкости ХТС.

Бесконечное число точек  $\Xi(F)$  может быть аппроксимировано дискретным множеством точек  $\xi^k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , которое выбирается из условия наилучшего покрытия множества  $\Xi(F)$  сеткой. В результате можно получить конечномерную по  $\xi$  задачу оптимального проектирования:

$$\min_{d, z^1, z^2, \dots, z^K} \sum_{k=1}^K w_k C(d, z^k, \xi^k) \quad (6.16)$$

при ограничениях

$$g(d, z^k, \xi^k) \leq 0, \quad k = \overline{1, K}, \quad (6.17)$$

где  $w^k$  – вес, который присвоен каждой точке  $\xi^k$ ,  $\sum_{k=1}^K w_k = 1$ . Весовые коэффициенты в формуле (6.16) являются коэффициентами квадратурной формулы.

Алгоритм аппроксимации задачи (6.15) с помощью задачи (6.16), (6.17) включает следующие шаги.

**Шаг 1.** Выбирается априори начальное множество точек  $\xi^k$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

**Шаг 2.** Решается многомерная задача оптимизации (6.16), (6.17) с целью определения вектора проектных переменных параметров  $d$ .

**Шаг 3.** Проверяется работоспособность проекта ХТС в области  $\Xi(F)$ , определяемого вектором  $d$ , через решение задачи  $F = \max \delta$  при ограничении

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi) \leq 0.$$

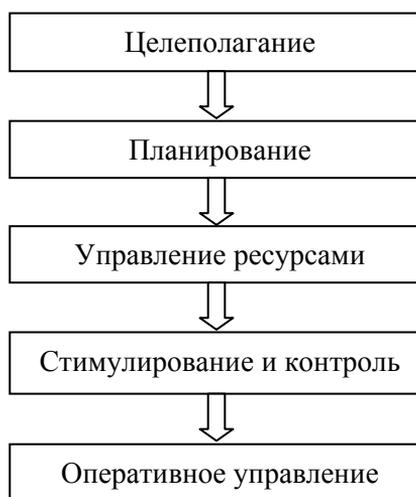
#### 6.4. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

На сегодняшний день выделяют четыре обширных раздела теории управления проектами:

- *календарно-сетевое планирование и управление*, использующее методы теории графов для построения и оптимизации *сетевого графика* проекта;
- *«методологию» управления проектами*, отражающую сложившуюся на сегодняшний день терминологию и успешный опыт реализации проектов;
- *механизмы управления проектами* – процедуры принятия управленческих решений, основывающиеся на разработке и анализе математических моделей организационного управления проектами;
- *методы и средства автоматизации* управления проектами, позволяющие получать, хранить, перерабатывать и использовать для принятия решений информацию о проекте и его окружении.

Накопление опыта по управлению проектами позволило выделить ряд процессов управления проектами, считающихся успешной практикой. Успешная практика предполагает, что существует общее мнение относительно того, что применение этих процессов управления проектом в соответствующих внешних условиях повышает шансы на успех. Также для этих процессов определена последовательность их выполнения, необходимая входная информация, инструменты, с помощью которых реализуется каждый процесс, методы реализации, а также результаты каждого процесса. Эти процессы относятся к управлению: 1) содержанием проекта; 2) сроками проекта; 3) стоимостью проекта; 4) качеством проекта; 5) человеческими ресурсами проекта; 6) коммуникациями проекта; 7) рисками проекта; 8) поставками проекта.

Успешная реализация любого проекта требует последовательного решения следующих общих задач: определение и анализ целей проекта; построение, оценка и выбор альтернативных решений по реализации проекта (вариантов проекта); формирование структуры проекта, выбор состава исполнителей, ресурсов, сроков и стоимости работ; управление взаимодействием с внешней средой; управление исполнителями (персоналом); регулирование хода работ (оперативное управление, внесение корректив). Решение этих задач должно осуществляться в комплексе с решением *задач управления проектами* (см. рис. 6.8): прогнозирование и оценка результатов; планирование; распределение ресурсов; стимулирование исполнителей; оперативное управление.



**Рис. 6.8. Основные этапы управления проектами**

Каждый проект от зарождения идеи до завершения проходит ряд последовательных фаз, стадий и этапов. Их совокупность называется *жизненным циклом* проекта. С точки зрения управления проектами структура проекта включает:

- *структуру работ*, под которой понимают иерархическую структуру, позволяющую разделить проект на отдельно либо совместно управляемые части – *пакеты работ*;

- *организационную структуру*, которая отражает иерархическую взаимную подчиненность участников проекта (руководителя проекта в целом, руководителей подпроектов/работ, исполнителей). Для проектной деятельности характерны матричные организационные структуры, в рамках которых каждый исполнитель одновременно подчинен нескольким руководителям – например, своему функциональному руководителю и руководителю проекта;

- *структуру ресурсов* (условий осуществления деятельности: мотивационных, кадровых, материально-технических, научно-методических, финансовых, организационных, нормативно-правовых, информационных);

- *сетевой график*, который отражает логику и технологию выполнения работ.

Перечисленные структуры взаимосвязаны – см. рис. 6.9: установление соответствия между структурой работ и организационной структурой дает распределение ответственности тех или иных элементов оргструктуры за определенные работы (кто отвечает за выполнение каких работ), структурой работ и структурой ресурсов – распределение ресурсов (какие ресурсы задействуются при выполнении каких работ), организационной структурой и структурой ресурсов – распределение полномочий (кто какими ресурсами распоряжается). Ответы на перечисленные вопросы необходимы для управления любым проектом.

*Механизмы управления проектами.* Общее определение механизма таково – «система, устройство, определяющее порядок какого-либо вида деятельности».

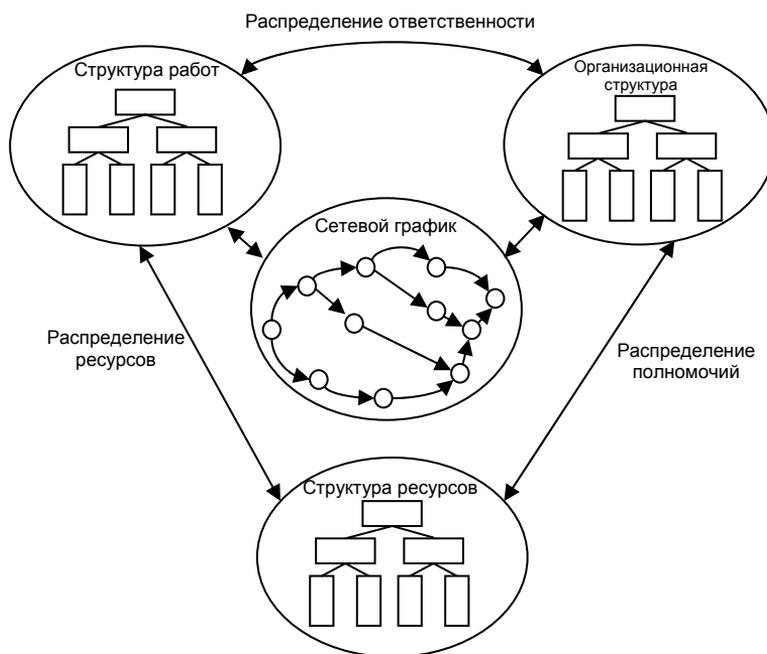


Рис. 6.9. Структуры проекта

Применительно к организационным системам *механизм функционирования* – это совокупность правил, законов и процедур, регламентирующих взаимодействие участников организационной системы. Более узким является понятие организационного *механизма управления* – совокупности процедур принятия управленческих решений. Таким образом, механизмы функционирования и механизмы управления определяют как ведут себя члены организации и как они принимают решения.

Для того чтобы управляющий орган (например, главный инженер проекта) выбрал ту или иную процедуру принятия решений (тот или иной механизм управления, т.е. зависимость своих действий от целей организации и действий управляемых субъектов – исполнителей в случае управления проектами), он должен уметь предсказывать поведение исполнителей – их реакцию на те или иные управляющие воздействия. Экспериментировать в жизни, применяя различные управляющие воздействия и изучая реакцию подчиненных, не эффективно и практически никогда не представляется возможным. Здесь на помощь приходит *моделирование* – метод исследования, заключающийся в построении и анализе *моделей* – аналогов исследуемых технических систем. Имея адекватную модель, можно с ее помощью проанализировать реакции управляемой системы (этап *анализа*), а затем выбрать (на этапе *синтеза*) и использовать на практике то управляющее воздействие, которое приводит к требуемой реакции.

Наличие в организации определенной совокупности конкретных механизмов управления привлекательно, как с точки зрения управляющего органа – так как позволяет предсказать поведение управляемых субъектов, так и с точки зрения

управляемых субъектов – так как делает предсказуемым поведение управляющего органа. То есть снижение неопределенности за счет использования механизмов управления является одним из существенных свойств любой организации как социального института.

Корпоративные информационные системы обеспечивают поддержку принятия управленческих решений на основе автоматизации процессов, процедур и других способов осуществления деятельности крупной компании, организации или корпорации. Целью информационной системы поддержки принятия решений является информационное обеспечение принятия решений при разработке и реализации проектов ХТС на основе современных технологий обработки информации. Основными функциями этих систем являются: сбор, передача и хранение данных; содержательная обработка данных в процессе решения функциональных задач управления проектами; представление информации в форме, удобной для принятия решений; доведение принятых решений до исполнителей. В качестве основных потребителей информации проекта выступают: проект-менеджер (для анализа расхождений фактических показателей выполнения работ от запланированных и принятия решений по проекту); заказчик (для осведомленности о ходе выполнения работ проекта); поставщики (при возникновении потребности в материалах, оборудовании и т.п., необходимых для выполнения работ); проектировщики (когда необходимо внести изменения в проектную документацию); непосредственные исполнители работ на местах.

Информационная система управления проектом – организационно-технологический комплекс методических, технических, программных и информационных средств, направленный на поддержку и повышение эффективности процессов управления проектом. В частности, выделяют: персональные компьютерные системы и распределенные интегрированные системы. Персональные компьютерные системы, оснащенные программным обеспечением для управления проектами, должны обеспечивать выполнение следующих функций: работа в многопроектной среде; разработка календарно-сетевых графиков выполнения работ; оптимизация распределения и учет ограниченных ресурсов; проведение анализа «что-если»; сбор и учет фактической информации о сроках, ресурсах и затратах, автоматизированной генерации отчетов; планирование и контроль договорных обязательств; централизованное хранение информации по реализуемым и завершенным проектам и т.д.

Распределенные интегрированные системы в качестве основных инструментов используют: системы телекоммуникаций (передача цифровых данных по оптоволоконным кабелям, локально-вычислительные сети и т.д.); портативные компьютеры; программное обеспечение поддержки групповой работы, обеспечивающее: обмен электронной почтой; документооборот; групповое планирование деятельности; участие удаленных членов команды в интерактивных дискуссиях средствами поддержки и ведения обсуждений; проведение «мозгового штурма», давая возможность его участникам высказывать свои мнения с помощью компьютеров, подключенных к одному большому экрану.

Интегрированная информационная система управления проектами объединяет данные из различных подразделений и организаций, относящихся к конкретному проекту; обеспечивает хранение, сбор, и анализ управленческой информации относительно степени достижения целей проекта; должна обеспечивать алгоритмы разрешения конфликтующих требований, возникающих по ходу обеспечения проекта; обеспечивает поддержку деловых взаимоотношений между исполнителями, временно объединенными в команду.

Структуру интегрированной информационной системы поддержки принятия решений во многом определяет структура принятых в рамках проекта и организации процессов управления. Как следствие, она может быть структурирована по этапам проектного цикла, функциям, уровням управления. Обобщенный жизненный цикл проекта и управленческие функции, связанные с различными стадиями и этапами проекта, показан на рис. 6.10. Для поддержки различных управленческих функций используется разное информационное и *программное обеспечение* (ПО).

Для описания и анализа проекта на прединвестиционной стадии применяется специализированное ПО финансового анализа проектов, которое позволяет выполнить оценки основных показателей проекта в целом и обосновать эффективность капиталовложений.

Для детального планирования и контроля графика выполнения работ, отслеживания ресурсов и затрат проекта необходимо использовать ПО для управления проектами. На стадии выполнения проекта необходимо обеспечить сбор фактических данных о состоянии работ, оптимально представить их для анализа, обеспечить обмен информацией и взаимодействие между участниками проекта. Для выполнения этих функций применяется ПО для управления проектами, ПО поддержки групповой работы, документооборота и формирования отчетов. Основными функциональными элементами интегрированной информационной системы поддержки принятия решений на стадии выполнения проекта являются: модуль календарно-сетевое планирования и контроля работ проекта; модуль ведения бухгалтерии проекта; модуль финансового контроля и прогнозирования. Важнейшим компонентом интегрированных информационных систем поддержки принятия решений являются системы управления базами данных. Их основными функциями являются поддержка целостности, защищенности, архивации и синхронизации данных в условиях многопользовательской работы.

Опыт, полученный в результате реализации проекта и формализованный в виде содержания компьютерной базы соответствующих *знаний организации*, может быть использован в дальнейшем при реализации новых проектов. Проблемы обобщения опыта, обработки, хранения и использования знаний о содержании, формах и методах организационного управления (в том числе – управления проектами) занимается такой раздел современной теории управления, как *управление знаниями*.

В настоящее время все более актуальным для эффективного функционирования организаций и/или реализации проектов становится управление знаниями.

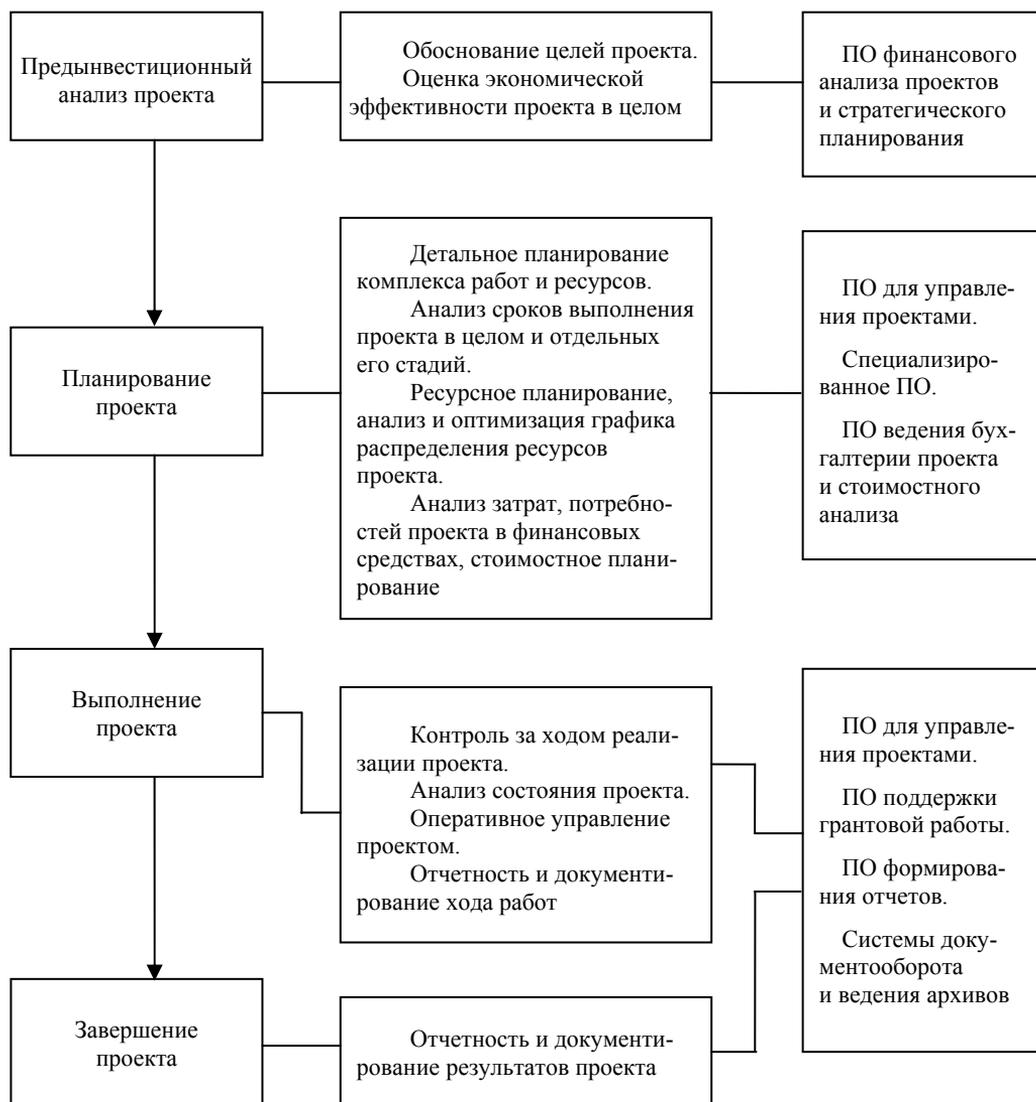


Рис. 6.10. Обобщенный жизненный цикл проекта

Действительно, в динамично изменяющихся внешних условиях, характерных для проектного типа управления, существенными становятся знания и опыт, накопленный сотрудниками организации. Одной из основ систематизации опыта является выделение типовых ситуаций и управленческих решений, оптимальных (или рациональных) в этих ситуациях. Так как число возможных ситуаций огромно, то «запоминание» всех ситуаций невозможно, да и нецелесообразно – следует выделять множества «похожих» ситуаций и использовать одинаковые решения для ситуаций из одного и того же множества. В теории управления такой подход получил название «*унифицированного управления*», а соответствующие управленческие решения – «*типовых решений*».

В проектах в силу их специфики (каждый проект уникален) проблема унификации управления обретает еще большую значимость. Понятно, что априорное ограничение класса возможных управлений, с одной стороны, снижает эффективность управления, а с другой стороны, – позволяет уменьшить информационную нагрузку на руководителя проекта и дать ему возможность максимально использовать в новой ситуации, как свой собственный опыт, так и опыт реализации проектов, накопленный другими руководителями проектов.

В общем случае управление знаниями определяется как процесс систематического и целенаправленного создания, распространения и применения знаний (информации), имеющих критическое значение для стратегии и целей организации. Управление знаниями подразумевает две составляющие: организационную и технологическую. Организационная часть – это политика компании в отношении управления знаниями, т.е. разнообразные управленческие процедуры, которые позволяют компании сохранять, структурировать, анализировать информацию для того, чтобы эффективно ее использовать в настоящем и будущем. Технологии (в основном – информационные) помогают осуществить эти управленческие процедуры, но не могут их заменить.

Под *базой знаний* (по управлению проектами) понимают формализованную и специальным образом организованную в информационной системе управления проектами информацию по типовым фрагментам календарно-сетевых графиков проектов, механизмам управления проектами и т.д. Содержимое базы знаний оформляется, связывается между собой и представляется таким образом, чтобы с помощью специальных программных средств его можно было использовать для генерации новых знаний и решений для управления конкретным проектом. Помимо графиков проведения работ, объектами типизации в управлении проектами выступают: процедуры принятия решений, роли участников проектов, структуры проектов, этапы жизненного цикла проектов, процессы взаимодействия и результаты деятельности исполнителей. Типовые роли участников проектов – выделенные образы типовых элементов организационной системы (например, главный инженер проекта, исполнитель и т.д.), имеющие свою стратегию и выполняющие определенные действия в рамках реализации проекта.

График реализации работ каждого проекта по-своему уникален, но может состоять во многом из уже отработанных фрагментов, сохраненных в базе знаний по управлению проектами. Под типовыми структурами проектов понимаются базовые структуры: структура декомпозиции работ, организационная структура, структура ресурсов (см. выше), а также множественные вспомогательные структуры, например, структура статей затрат проекта, структуры кодирования. Типизация структур проекта – важнейший элемент организации управления проектами в любой современной компании, позволяющий сокращать затраты на планирование и контроль проектов, сравнивать разнородные проекты между собой, готовить необходимые аналитические отчеты по ходу выполнения проектов и т.д.

Выделение стандартных этапов жизненного цикла проектов и условий переходов между ними позволяют компании принимать обоснованные управленческие решения на всех этапах жизненного цикла проектов, оптимизируя ресурсы, сохраняя накопленный опыт. Наличие типовых процессов позволяет организовывать взаимодействие множества участников проектов, устанавливая необходимую последовательность их действий и результатов, стандартные входящие и исходящие документы и т.д. Важный шаг на пути использования типовых решений в управлении проектами – единая *терминология*, позволяющая всем участникам проекта одинаково трактовать термины и определения управления проектами. Еще одним средством типизации служит *классификация*.

Описание *успешных практик* по управлению проектами помогает оценить возможность использования тех или иных методов и механизмов при реализации подобных проектов и с успехом применять их. *Обучение* – один из способов внедрения типовых решений. Обучение на примере типового решения пройдет быстрее, и участник проекта будет готов применять полученные навыки на практике для всех подобных проектов. Содержательно, задача выбора типовых ситуаций заключается в следующем: требуется обучить менеджера принимать решения в таких ситуациях, которые являются «типичными» для множества возможных ситуаций в смысле критерия минимальности потерь эффективности при использовании наиболее «близкого» типового решения.

Современные *информационные системы* управления проектами также являются способом внедрения типовых решений в управлении проектами. Настроив информационную систему соответствующим образом, прописав в ней процедуры, внося типовые структуры проектов, разработав специализированные аналитические отчеты, сужают круг допустимых решений для участников, побуждая их использовать готовые типовые решения.

### Вопросы для самоконтроля

1. *Охарактеризуйте понятия: «гибкая ХТС», «гибкая производственная система».*
2. *Изобразите иерархическую структуру химического предприятия как сложной ХТС.*
3. *Перечислите взаимосвязанные подсистемы химического производства, между которыми существуют отношения соподчиненности в виде иерархической структуры.*
4. *Охарактеризуйте низшую ступень иерархической структуры химического предприятия.*
5. *Приведите рисунок структурно-параметрического описания химического производства.*
6. *Изобразите структурную схему автоматизированной ХТС.*

7. *Что Вы понимаете под термином «интегрированное проектирование»? Сформулируйте цель интегрированного проектирования химико-технологических процессов, аппаратов, ХТС и САУ.*

8. *Почему важно рассматривать на этапе проектирования влияние неопределенных параметров на работоспособность и оптимальность функционирования ХТС?*

9. *Каким образом осуществлялся учет неопределенности при традиционном проектировании ХТС?*

10. *Сформулируйте математически задачу проектирования энерго- и ресурсосберегающей ХТС в статике.*

11. *Используя системный подход, предложите декомпозицию задачи проектирования энерго- и ресурсосберегающей ХТС в статике в виде последовательности итерационно-детерминированных задач нелинейного программирования и оптимального управления.*

12. *Охарактеризуйте три основные задачи, решаемые при интегрированном проектировании энерго- и ресурсосберегающей ХТС: 1) генерирование альтернативных вариантов ХТС, удовлетворяющих условиям гибкости (в жесткой, мягкой или смешанной форме); 2) выбор альтернативных классов и структур САУ ХТС, удовлетворяющих условиям структурной наблюдаемости и управляемости ХТС с заданными динамическими свойствами по каналам управления; 3) решение одно- или двухэтапной задач оптимизации конструктивных и режимных (управляющих) переменных комплекса «ХТС–САУ» в условиях неопределенности по векторному критерию, включающему показатели качества производимой продукции, энерго- и ресурсосбережения, а также технико-экономические показатели производства.*

13. *Изложите стратегию интегрированного проектирования ХТС.*

14. *Перечислите сведения, которые указываются в ТЗ на проектирование ХТС.*

15. *Разделите все переменные в задаче оптимального проектирования ХТС в условиях неопределенности параметров на категории. Охарактеризуйте эти категории. Каким образом задаются вектор неопределенных параметров и область неопределенности?*

16. *Сформулируйте две задачи, связанные с анализом гибкости проектируемой ХТС: А – оценка работоспособности ХТС для априори заданного интервала неопределенности; Б – количественная оценка индекса гибкости проекта и определение максимально достижимого уровня индекса гибкости проекта.*

17. *Запишите выражение для функции гибкости ХТС.*

18. *Назовите основные этапы и механизмы управления проектами.*

# 7

глава

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ОФОРМЛЕНИЮ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

### 7.1. ОЦЕНКА ГИБКОСТИ И ОДНОЭТАПНОЕ ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХТС В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

При интегрированном проектировании ХТС должны быть удовлетворены регламентные и проектные ограничения, связанные: 1) с безопасностью ХТС (например, температура, давление в химическом реакторе или концентрации некоторых веществ в выходных потоках химического производства не должны превышать максимально допустимых величин); 2) с экологической безопасностью (ограничения на максимальную величину выходных потоков вредных веществ); 3) с обеспечением заданных значений производительности, качественных и технико-экономических показателей выпускаемой продукции и ХТС, соответственно.

Удовлетворение регламентных ограничений осложняется наличием неопределенности (неточности) в математических моделях или в исходных данных задач моделирования, оптимизации и проектирования. Источниками неопределенности, как правило, являются:

1. Неточность математических моделей, используемых для целей анализа, оптимизации и интегрированного проектирования ХТС. Она порождается: а) неточностью эксперимента, с помощью которого были получены коэффициенты в математических моделях (константы скоростей реакций, коэффициенты межфазного обмена, тепло- и массопереноса и т.д.); б) неточностью химических и физических закономерностей, положенных в основу математических моделей.

2. Изменение внутренних факторов ХТС на стадии ее функционирования, что приводит к изменению некоторых коэффициентов в математических моделях во время эксплуатации ХТС. Так, изменение активности катализатора приводит к изменению констант скорости реакций, а загрязнение поверхности теплообмена в теплообменнике – к изменению коэффициентов теплоотдачи и, соответственно, теплопередачи.

3. Случайное изменение внешних факторов функционирования ХТС на стадии ее эксплуатации.

4. Конструктивная неточность, т.е. неточность в реализации некоторых размеров технологического оборудования при его изготовлении.

Обычно неполнота наших знаний о ХТС сводится к тому, что некоторые параметры в математических моделях и исходных данных при решении задач моделирования, оптимизации и интегрированного проектирования известны неточно. О них известно только то, что они принадлежат некоторой области неопределенности  $\Xi$ .

Таким образом, при оптимизации и интегрированном проектировании ХТС мы вынуждены использовать неточные математические модели, и в этом случае возникает закономерный вопрос: каким образом мы можем гарантировать выполнение всех регламентных и проектных ограничений на стадии функционирования ХТС, несмотря на использование неточных математических моделей?

Задачи оптимизации и интегрированного проектирования ХТС формулируются при следующих предположениях:

1) в жизненном цикле ХТС выделяются две стадии: *проектирование* и *функционирование*;

2) имеются регламентные требования и проектные ограничения, связанные с экономикой производства, взрывобезопасностью, экологией, качеством выпускаемой продукции, которые записываются в форме (6.7);

3) имеются два типа переменных – конструктивные переменные  $a, d$  (структура ХТС, тип аппарата, размеры оборудования и т.п.) и режимные (управляющие) переменные  $z$  (температура, давление, расход и др.). На стадии функционирования, как правило, конструктивные переменные остаются постоянными, а управляющие переменные, вообще говоря, могут изменяться. Это позволяет учесть на стадии проектирования возможность настройки управляющих переменных (на стадии функционирования) для выполнения регламентных требований и проектных ограничений.

На стадии функционирования ХТС будем выделять три группы неопределенных параметров. К первой группе относятся параметры, значения которых могут быть определены (измерены) достаточно точно на стадии функционирования ХТС. Другими словами, на стадии функционирования имеется достаточный объем экспериментальной информации, позволяющий определить «точные» значения неопределенных параметров. Ко второй группе относятся параметры, которые не могут быть измерены (уточнены) на стадии функционирования. Другими словами, область неопределенности для этих параметров остается такой же, как и на стадии проектирования. К третьей группе относятся параметры, значения которых могут быть уточнены на стадии функционирования, однако при этом некоторая ошибка при определении этих параметров остается.

Следуя работе [38], на этапе проектирования будем различать два случая. В первом случае нам неизвестны плотности распределения вероятностей неопределенных параметров. В этом случае интервалы неопределенности измеряемых

параметров могут быть найдены, если известны максимальные ошибки измерения используемых приборов.

Пусть мы провели  $N$  экспериментов. Обозначим через  $[x^j, \xi^j]$  измеренные значения  $[x, \xi]$  в  $j$ -м эксперименте. Пусть

$$\bar{x}^j = x^j \pm \delta x^j; \quad \bar{\xi}^j = \xi^j \pm \delta \xi^j,$$

где  $[\bar{x}^j, \bar{\xi}^j]$  – неизвестные точные значения величин  $[x^j, \xi^j]$ , а  $[\delta x^j, \delta \xi^j]$  – ошибки измерения. Из характеристик приборов мы знаем максимальные значения  $\delta_1, \delta_2$  ошибок  $\delta x^j, \delta \xi^j$ :

$$|\delta x^j| \leq \delta_1, \quad |\delta \xi^j| \leq \delta_2.$$

Пусть теперь нам известны плотности распределения вероятностей неопределенных параметров. Рассмотрим вначале случай, когда все параметры  $\xi_j$  независимы и каждый из них имеет плотность распределения вероятности  $P_j(\xi_j)$ . Тогда для каждого параметра  $\xi_j$  можно найти интервал  $\Xi_j^{p_j}$ , удовлетворяющий условию

$$\Pr[\xi_j \in \Xi_j^{p_j}] = p_j,$$

где  $\Pr[\xi_j \in \Xi_j^{p_j}]$  – вероятность принадлежности параметра  $\xi_j$  интервалу  $\Xi_j^{p_j}$ .

Это условие может быть записано в виде  $\int_{\Xi_j^{p_j}} P_j(\xi_j) d\xi_j = p_j$ .

В этом случае область неопределенности есть  $n_\xi$ -мерный прямоугольник  $\Xi^p$  со сторонами  $\Xi_j^{p_j}$ ; вероятность попадания  $\xi$  в прямоугольник  $\Xi^p$  равна  $\rho = \rho_1 \rho_2 \dots \rho_{n_\xi}$ . В случае нормального распределения имеем формулу

$$P_i(\xi_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right],$$

где  $\mu_i = M\{\xi_i\}$  – среднее значение (математическое ожидание) параметра  $\xi_j$ ,  $\sigma_i$  – среднеквадратичное отклонение.

В этом случае интервал  $\Xi_j^{p_j}$  имеет вид

$$\Xi_j^{p_j} = [\xi : \mu_j - k_j \sigma_j \leq \xi_j \leq \mu_j + k_j \sigma_j, j = 1, \dots, n_\xi].$$

Уровень неопределенности зависит от полноты и точности экспериментальных данных, доступных на стадии функционирования ХТС, т.е. зависит от кон-

трольно-измерительной системы сбора экспериментальной информации на этой стадии (наличия датчиков и приборов, их точности).

При формулировании задач оптимизации и интегрированного проектирования ХТС в условиях неопределенности мы будем рассматривать два случая:

а) одноэтапная формулировка, в которой неопределенные параметры  $\xi$  (или их часть) не могут быть идентифицированы на этапе функционирования ХТС, и в этом случае управляющие переменные определяются одновременно с определением конструктивных переменных для всей области неопределенности  $\Xi$ ;

б) двухэтапная формулировка, в которой неопределенные параметры (или их часть) могут быть идентифицированы на этапе функционирования ХТС, и в этом случае управляющие переменные могут быть использованы на этапе функционирования ХТС для выполнения регламентных требований и проектных ограничений.

Ограничения в задаче интегрированного проектирования могут быть жесткими, если они должны безусловно выполняться на этапе функционирования ХТС для любых значений  $\xi$ . Нарушение этих условий может привести к аварии, нанести вред окружающей среде, обслуживающему персоналу и т.д. Мягкие ограничения могут выполняться с некоторой заданной вероятностью или в среднем.

Назовем химико-технологическую систему *гибкой*, а соответствующую ей конструкцию *допустимой*, если на стадии функционирования можно удовлетворить все ограничения (жесткие и мягкие) при условии, что неопределенные параметры могут принимать любые значения из области неопределенности  $\Xi$ .

При формулировании задач оптимизации и интегрированного проектирования ХТС в условиях неопределенности необходимо ввести целевую функцию и условия выполнения регламентных требований и проектных ограничений (далее ограничения). В качестве целевой функции используем некоторую оценку эффективности функционирования (будущей работы) проектируемой ХТС, а в качестве ограничений – условия, гарантирующие гибкость ХТС на этапе функционирования. Для оценки эффективности функционирования ХТС используем одну из следующих величин:

- 1) среднее значение, которое может принять целевая функция (критерий) оптимизации или интегрированного проектирования;
- 2) наихудшее значение критерия оптимизации или интегрированного проектирования, которое она может принять (стратегия наихудшего случая);
- 3) верхнюю границу для критерия оптимизации или интегрированного проектирования, которая не может быть нарушена с заданной вероятностью.

### **Постановки и алгоритмы решения одноэтапных задач интегрированного проектирования**

Рассмотрим формулировку одноэтапной задачи интегрированного проектирования (ОЗИП) для случаев с жесткими, мягкими и смешанными ограничениями, полной и неполной информации относительно функций распределения неопределенных параметров  $\xi$ .

Поскольку математическое ожидание  $M_{\xi}\{C(a, d, z, \xi)\}$  дает среднее значение критерия интегрированного проектирования на стадии функционирования ХТС, то естественно использовать эту величину как целевую функцию задачи интегрированного проектирования в условиях неопределенности. Объединяя целевую функцию и условие гибкости ХТС –  $\max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j = 1, \dots, m$ , можно сформулировать задачу ОЗИП с жесткими ограничениями в условиях неопределенности:

$$\min_{a, d, z} M_{\xi}\{C(a, d, z, \xi)\}; \quad (7.1)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (7.2)$$

Если функции распределения вероятностей для  $\xi$  неизвестны, то можно использовать одну из следующих формулировок задачи:

$$I^* = \min_{a, d, z} I(a, d, z);$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m,$$

где  $I(a, d, z) = \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z, \xi^i)$  или  $I(a, d, z) = \max_{\xi \in \Xi} C(a, d, z, \xi)$ ,  $w_i$  – весовые

коэффициенты;  $\xi^i (i \in I_1)$  – аппроксимационные точки;  $I_1$  – множество индексов аппроксимационных точек.

Задача ОЗИП (7.1), (7.2) имеет решение, если выполняется условие гибкости проектируемой ХТС

$$\chi(a, d) = \min_{a, d, z} \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0. \quad (7.3)$$

Условие гибкости (7.3) гарантирует возможность удовлетворения всех ограничений (7.2) для всех значений  $\xi$  из области  $\Xi$ .

Основная трудность решения сформулированной выше задачи оптимизации (7.1) – (7.3) состоит в необходимости вычисления многомерного интеграла  $M_{\xi}\{C(a, d, z, \xi)\}$ .

Заменим математическое ожидание в (7.1) с помощью квадратурной формулы некоторой суммой

$$M_{\xi}\{C(a, d, z, \xi)\} \approx \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z, \xi^i),$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты,  $\sum_{i \in I_1} w_i = 1$ ;  $I_1$  – множество индексов аппроксимационных точек в области  $\Xi$ .

Для решения задачи (7.1), (7.2) используем алгоритм внешней аппроксимации [38] и вспомогательную задачу (A):

$$\begin{aligned}
 I &= \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z, \xi^i); \\
 g_j(a, d, z, \xi^i) &\leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \quad \xi^i \in S_1; \quad i \in I_1; \\
 g_j(a, d, z, \xi^l) &\leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \quad \xi^l \in S_2; \quad l \in I_2,
 \end{aligned} \tag{A}$$

где  $S_1 = \{\xi^i : \xi^i \in \Xi, i \in I_1\}$  – совокупность аппроксимационных точек, вводимых для приближенного вычисления математического ожидания в целевой функции (7.1);  $S_2^{(v)} = \{\xi^l : \xi^l \in \Xi, l \in I_2^{(v)}\}$  – множество критических точек;  $I_2^{(v)}$  – множество индексов точек  $\xi^l$ , в которых нарушаются ограничения (7.2), (7.3).

Тогда алгоритм решения задачи (7.1) – (7.3) можно записать в следующем виде.

**Алгоритм 7.1.**

**Шаг 1.** Полагаем число итераций  $v = 1$ , выбираем совокупность аппроксимационных точек  $\xi^i, i \in I_1, \xi^i \in S_1$ , начальную совокупность критических точек  $S_2^{(v-1)} = \{\xi^l : \xi^l \in \Xi, l \in I_2^{(v-1)}\}$  и начальные приближения  $a^{(0)}, d^{(0)}, z^{(0)}$ .

**Шаг 2.** Решаем вспомогательную задачу (A):

$$\begin{aligned}
 I^{(v)} &= \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z, \xi^i); \\
 g_j(a, d, z, \xi^i) &\leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \quad \xi^i \in S_1; \quad i \in I_1; \\
 g_j(a, d, z, \xi^l) &\leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \quad \xi^l \in S_2^{(v-1)}; \quad l \in I_2^{(v-1)}
 \end{aligned}$$

и определяем  $a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}$ .

**Шаг 3.** Решаем  $m$ -задач

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi), \quad j = \overline{1, m},$$

и определяем  $m$  точек  $\xi^{l,(v)}, l = \overline{1, m}$ .

**Шаг 4.** Образует множество новых критических точек на  $v$ -й итерации:

$$R^{(v)} = \left\{ \xi^{l,(v)} : g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi^{l,(v)}) > 0 \right\}.$$

Если это множество пустое, то решение задачи получено, *алгоритм заканчивает работу*.

В противном случае переходим к шагу 5.

**Шаг 5.** Формируем новое множество критических точек  $S_2^{(v)} = S_2^{(v-1)} \cup R^{(v)}$  и, полагая  $v = v + 1$ , переходим к шагу 2.

Этот алгоритм дает решение задачи (7.1) – (7.3), если операции на шагах 2 и 3 выполняются в глобальном смысле. Поскольку выполняется неравенство

$$g_j(a, d, z, \xi^l) \leq \max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi), \quad \xi^l \in \Xi, \quad j = \overline{1, m},$$

то в соответствии с теоремой П.2 [38] задача (А) дает нижнюю оценку задачи (7.1) – (7.3):  $I^{(v)} \leq I^*$ . Пусть  $(a^*, d^*, z^*)$  – решение, полученное этим алгоритмом. В точке  $(a^*, d^*, z^*)$  выполняется следующее условие

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a^*, d^*, z^*, \xi) \leq 0, \quad j \in J.$$

Это означает, что  $(a^*, d^*, z^*)$  – допустимая точка в задаче (7.1) – (7.3) и выполняется условие  $I^{(\hat{v})} \leq I^*$ , где  $\hat{v}$  – номер последней итерации алгоритма.

Поскольку точка  $(a^*, d^*, z^*)$  является допустимой, то  $I^{(\hat{v})}$  не может быть меньше  $I^*$ , поэтому  $I^{(\hat{v})} = I^*$ .

На каждой итерации этот алгоритм выполняет две основные операции. Первая операция связана с получением нижней границы целевой функции (7.1). Вторая операция связана с проверкой, является ли точка  $(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)})$  решением задачи (7.1) – (7.3). Для этого на шаге 3 решается  $m$ -задача  $\max_{\xi \in \Xi} g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , и если условие  $g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi^{l,(v)}) \leq 0$  удовлетворяется, то решение задачи (7.1) – (7.3) найдено. В противном случае точки  $\xi^{l,(v)}$ , в которых условия нарушаются, добавляются во множество критических точек  $S_2^{(v)}$ .

Характерной чертой алгоритма 1 является увеличение числа критических точек на каждом шаге и, соответственно, увеличение числа ограничений. Это является определенным недостатком, поскольку в некоторых случаях при большом числе критических точек число ограничений может стать слишком большим.

Остановимся подробнее на шаге 3. Как правило, характер функций  $g_j$  неизвестен. В этом случае можно использовать такой подход. Предполагаем на первом этапе, что функции  $g_j$  выпуклы. В этом случае решение задачи

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi), \quad j = \overline{1, m},$$

находится в одной из вершин параллелепипеда  $\Xi$ . В начальное множество критических точек  $S_2^{(0)}$  включается некоторое количество угловых точек куба  $\Xi$ ,

а на шаге 3 рассчитываются значения функций  $g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi)$ ,  $j = \overline{1, m}$  во всех угловых точках куба  $\Xi$ , не принадлежащих множествам  $S_2^{(v)}$  и  $S_1$ . Среди этих точек выбираются  $m$  точек, в которых функции  $g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi^l)$ ,  $j, l = \overline{1, m}$  принимают наибольшие значения, из которых включаются в число критических точек те точки, в которых нарушаются ограничения. Далее формируется новое множество критических точек  $S_2^{(v+1)} = S_2^{(v)} \cup R^{(v)}$  и переходим к шагу 2 алгоритма 1.

При формулировании задачи ОЗИП с мягкими (вероятностными) ограничениями предположим, что имеем полную информацию относительно функции распределения вероятностей для  $\xi$ . В этом случае постановка задачи ОЗИП имеет вид

$$\begin{aligned} & \min_{a,d,z} M_{\xi} \{ C(a, d, z, \xi) \}; \\ \text{Pr} \{ g_j(a, d, z, \xi) \leq 0 \} &= \int_{\Omega_j} P(\xi) d\xi \geq \rho_j, \quad j = 1, \dots, m; \\ \Omega_j &= \{ \xi : g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi \}, \end{aligned} \tag{7.4}$$

где  $P(\xi)$  – функция плотности вероятности.

Главная трудность решения сформулированной задачи ОЗИП состоит в необходимости вычисления многомерных интегралов  $M_{\xi} \{ C(a, d, z, \xi) \}$  и  $\int_{\Omega_j} P(\xi) d\xi$ .

Возможна и другая формулировка задачи ОЗИП, в которой в качестве критерия будет использоваться его верхняя граница, которая не может быть нарушена с заданной вероятностью:

$$\begin{aligned} & \min_{a,d,z,\alpha} \alpha; \\ \text{Pr} \{ C(a, d, z, \xi) - \alpha \leq 0 \} &\geq \rho_0; \\ \text{Pr} \{ g_j(a, d, z, \xi) \leq 0 \} &\geq \rho_j, \quad j = 1, \dots, m. \end{aligned} \tag{7.5}$$

Здесь  $\alpha$  – новая переменная, ограничивающая целевую функцию  $C(a, d, z, \xi)$ . Сравним формулировку задачи ОЗИП (7.5) с постановкой задачи (7.4). В задаче (7.5) найдем наименьшее значение  $\alpha^*$  переменной  $\alpha$ , для которой условие  $C(a, d, z, \xi) - \alpha \leq 0$  удовлетворяется с заданной вероятностью  $\rho_0$ . Таким образом, решив задачу ОЗИП (7.5), находим конструкцию ХТС  $a^*, d^*$  и режим  $z^*$ , которые гарантируют, что в процессе функционирования ХТС целевая функция  $C(a^*, d^*, z^*, \xi)$  будет меньше, чем  $\alpha^*$  с вероятностью  $\rho_0$ .

Перепишем задачу (7.4) в терминах А-задач стохастического программирования [34]: требуется определить тип  $a \in A$  аппаратного оформления проектируемых процессов химических технологий, векторы конструктивных  $d_{\alpha^*}$  и режимных  $z_{\alpha^*}$  переменных (оптимальных заданий регуляторам САС), а также  $m$ -мерный вектор постоянных величин  $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_m^*)$  такие, что

$$C(a_{\alpha^*}, d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in \Lambda} \left\{ \min_{a, d, z} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z, \xi^i) \mid g_j(a, d, z, \xi) \leq \alpha_j, j \in J \right\};$$

$$\Lambda = \left\{ \alpha \mid \forall j \Pr_{\xi} [g_j(a_{\alpha}, d_{\alpha}, z_{\alpha}, \xi) \leq 0] \geq \rho_j \right\}. \quad (7.6)$$

Возможность применения метода А-задач стохастического программирования должна всегда доказываться либо аналитическим доказательством выполнения достаточных условий, либо вычислительным экспериментом, подтверждающим выполнение достаточных условий.

В соответствии с методом А-задач стохастической оптимизации нами разработан следующий алгоритм решения задачи (7.6).

**Алгоритм 7.2.**

**Шаг 1.** Полагаем число итераций  $v = 1$ , задаем значения вектора гарантированной вероятности  $\rho_j, j = 1, \dots, m$  и точности  $\varepsilon$  решения задачи оптимизации, множество аппроксимационных точек  $S_1 = \{\xi^i : i \in I_1\}$ , начальное значение вектора  $\alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_m^{(0)})$  и начальные приближения  $a^{(0)}, d^{(0)}, z^{(0)}$ .

**Шаг 2.** Методом последовательного квадратичного программирования решаем вспомогательную задачу НЛП

$$I(a, d, z) = \min_{a, d, z} \sum_{i \in I_1} w_i \cdot C(a, d, z, \xi^i) \quad (7.7)$$

при связях в форме уравнений математической модели статики проектируемого технологического процесса и аппарата

$$y = \mathfrak{Z}(a, d, z, \xi^i)$$

и ограничениях

$$g_j(a, d, z, y(a, d, z, \xi^i)) \leq \alpha_j^{(v)}, \alpha_j^{(v)} < 0, j = 1, \dots, m, i \in I_1. \quad (7.8)$$

**Шаг 3.** В точке  $(a_{\alpha^{(0)}}, d_{\alpha^{(0)}}, z_{\alpha^{(0)}})$ , которая является решением задачи (7.7), (7.8), вычисляются вероятности выполнения ограничений  $g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$  с использованием генератора случайных чисел  $\xi$  с равномерным законом распределения и математической модели

$$y = \mathfrak{Z}(a, d, z, \xi)$$

и проверяется выполнение условий

$$\Pr_{\xi} \{g_j(a, d, z, \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, \quad j = 1, \dots, m.$$

**Шаг 4.** Если вероятностные ограничения не выполняются, т.е.  $\alpha^{(v)} \notin \Lambda$ , включается алгоритм входа в допустимую область  $\Lambda$ . Простейшим алгоритмом такого типа является уменьшение  $\alpha_j^{(v)}$  для нарушенных ограничений. Далее число  $v$  увеличивается на 1, т.е.  $v := v + 1$  и следует переход к шагу 2.

**Шаг 5.** Если вероятностные ограничения выполняются, то вектор  $\alpha^*$  находим из решения внешней  $\Lambda$ -задачи оптимизации

$$I(\alpha_{\alpha^*}, d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in \Lambda} I(\alpha_{\alpha}, d_{\alpha}, z_{\alpha}). \quad (7.9)$$

В общем случае задача (7.9) может быть решена подходящим методом нелинейного программирования. Однако можно использовать простейший алгоритм коррекции вектора  $\alpha \in \Lambda$  путем увеличения его компонентов на величину

$$\Delta \alpha_j = \lambda^{(v)} (\Pr_{\xi} [g_j(\bullet) \leq 0] - \rho_j),$$

где  $\lambda^{(v)}$  – шаг коррекции на  $v$ -й итерации, подбираемый опытным путем. Поиск  $\alpha^*$  прекращается, если  $\Delta \alpha_j$  для  $\forall_j$  становится меньше заранее заданного малого числа  $\varepsilon$  (точность поиска  $\alpha^*$ ).

Вычисление вероятностных интегралов производится стандартными методами (латинского гиперкуба и последовательности проб Хаммерслея (HSS) и Монте-Карло).

Сформулируем одноэтапную задачу оптимизации конструктивных параметров и режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам САС) со смешанными ограничениями (ограничения с номерами  $j \in J_1 = \{1, \dots, m_1\}$  являются жесткими, а ограничения с номерами  $j \in J_2 = \{m_1 + 1, \dots, m\}$  – мягкими и должны быть удовлетворены с заданной вероятностью  $\rho$ ):

$$\min_{a, d, z} M_{\xi} \{C(a, d, z, \xi)\}, \quad (7.10)$$

при ограничениях

$$\chi_1(a, d, J_2) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_1} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0; \quad (7.11)$$

$$\Pr_{\xi} \{g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, \quad j \in J_2. \quad (7.12)$$

Для решения одноэтапной задачи оптимизации со смешанными ограничениями (7.10) – (7.12) введем множества аппроксимационных точек  $S_0 = \{\xi^i : i \in I_0\}$  для приближенного вычисления математического ожидания от целевой функции (7.10) и  $S = \{\xi^i : i \in I\}$  для накопления точек  $\xi$  с индексами  $i \in I$ , в которых нарушаются ограничения (7.11)–(7.12), причем во множестве

точек  $S_1$  будут накапливаться точки, в которых нарушаются жесткие ограничения (7.11), а во множестве  $S_2$  – точки, в которых нарушаются мягкие ограничения (7.12). Кроме того, введем обозначение  $J = J_1 \cup J_2$  и в алгоритме используем вспомогательную задачу НЛП (Б):

$$I(a^*, d^*, z^*, \xi) = \min_{a, d, z} \sum_{i \in I_0} \omega_i C(a, d, z, \xi^i);$$

$$g_j(a, d, z, \xi^l) \leq 0, \quad j \in J, \quad l \in I, \quad I = I_0 \cup I_1 \cup I_2. \quad (\text{Б})$$

Решение задачи (Б) заключается в нахождении типа аппаратурного оформления ХТС  $a^*$ , оптимальных значений векторов конструктивных  $d^*$  и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных  $z^*$ , при которых достигается минимальное значение целевой функции при условии выполнения всех ограничений задачи (Б) в заданном наборе точек  $\xi^l, l \in I^{(v)}$ .

**Алгоритм 7.3.**

**Шаг 1.** Принимаем  $\mu = 1$ , число альтернативных типов аппаратурного оформления ТС  $\mu_{\text{зад}}$  и начальное приближение для конструкции ТС  $a^{(\mu)}$ .

**Шаг 2.** Принимаем  $v = 1$ , задаем начальные множества  $S_0 = \{\xi^i : i \in I_0\}$ ,  $S^{(v-1)} = S_1^{(v-1)} \cup S_2^{(v-1)}$ ,  $I^{(v-1)}$ , число  $n$  номеров точек  $\xi^i, i \in I^{(v-1)}$  и начальные приближения  $d^{(v-1)}, z^{(v-1)}, i \in I^{(v)}, \rho_j$ .

**Шаг 3.** Решаем вспомогательную задачу (Б)

$$I(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi) = \min_{a, d, z} \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z, \xi^i);$$

$$g_j(a^{(\mu)}, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I^{(v)},$$

и пусть  $a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}$  есть решение этой задачи.

**Шаг 4.** Вычисляем

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(v)}) = \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J_1} g_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z, \xi) \quad (7.13)$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации [38]. Обозначим через  $\bar{\xi}^{(v)}$  решение задачи (7.13) и проверяем выполнение условия

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}) \leq 0 \quad (7.14)$$

в точке решения  $\bar{\xi}^{(v)}$  задачи (7.13). Если условие (7.14) не выполняется, то переходим к шагу 5, в противном случае – к шагу 6.

**Шаг 5.** Дополним множество точек  $S_1^{(v)}$ , в которых нарушаются ограничения (7.14), точкой  $\bar{\xi}^{(v)}$ , т.е.

$$S_1^{(v)} = S_1^{(v-1)} \cup \bar{\xi}^{(v)}, \quad I_1^{(v)} = I_1^{(v-1)} \cup (n+1),$$

увеличиваем число критических точек  $n$  на 1,  $n = n + 1, p = a5$  и переходим к шагу 9.

**Шаг 6.** Проверяем выполнение мягких (вероятностных) ограничений

$$\Pr\{g_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, \quad j \in J_2. \quad (7.15)$$

Если условие (7.14) выполняется, а условие (7.15) не выполняется, то переходим к шагу 8.

Если условия (7.14), (7.15) выполняются, то решение для заданного типа аппаратного оформления найдено  $a^{(\mu)}, d^{(\mu)} = d^{(v)}, z^{(\mu)} = z^{(v)}$  и алгоритм заканчивает свою работу.

**Шаг 7.** Проверяем выполнение условия «Множество альтернативных типов аппаратного оформления ТС исчерпано?», т.е.  $\mu \geq \mu_{\text{зад}}$ . Если «Да», то получаем окончательное решение  $a^* = a^{(\mu)}, d^* = d^{(\mu)}, z^* = z^{(\mu)}, i \in I^{(v)}$ , и алгоритм заканчивает свою работу. В противном случае переходим к альтернативному типу аппаратного оформления, т.е. увеличиваем число  $\mu$  на единицу и переходим к шагу 2.

**Шаг 8.** Вычисляем

$$\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}) = \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J_2} \bar{g}_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}, \xi) \quad (7.16)$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации [38]. Обозначим через  $\bar{\xi}^{(v)}$  решение задачи (7.16) и дополним точкой  $\bar{\xi}^{(v)}$  множество точек  $S_2^{(v)}$ , в которых нарушаются мягкие ограничения (7.15), т.е.

$$S_2^{(v)} = S_2^{(v-1)} \cup \bar{\xi}^{(v)}, \quad I_2^{(v)} = I_2^{(v-1)} \cup (n+1), p = a8,$$

и увеличиваем число критических точек  $n$  на 1,  $n = n + 1$ .

**Шаг 9.** Если  $p = a5$ , то переобозначим множества  $S_2^{(v-1)}, I_2^{(v-1)}$ , т.е.  $S_2^{(v)} = S_2^{(v-1)}, I_2^{(v)} = I_2^{(v-1)}$ , если  $p = a8$ , то  $S_1^{(v)} = S_1^{(v-1)}, I_1^{(v)} = I_1^{(v-1)}$ . Сформируем множества  $S^{(v)} = S_0 \cup S_1^{(v)} \cup S_2^{(v)}, I^{(v)} = I_0 \cup I_1^{(v)} \cup I_2^{(v)}$ , присвоим числу итераций  $v$  значение  $v + 1$  и переходим к шагу 3.

Дадим некоторые пояснения алгоритму.

На шаге 6 неравенство  $\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}) \leq 0$  означает, что мягкие ограничения выполняются с вероятностью 1. Поэтому, если не выполняется условие

(7.15), то заведомо не выполняется условие  $\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{(v)}) \leq 0$  и, следовательно, мы получим точку  $\bar{\xi}^{(k)}$ , в которой нарушаются мягкие ограничения.

Из вышесказанного следует, что задачи оптимизации первого блока при проектировании ХТП и САУ формулируются в форме задач НЛП с ограничениями типа равенств и неравенств. В случае многих переменных квадратичная аппроксимация (например используемая в методе Ньютона) обычно дает хорошие оценки точек безусловного минимума. Более того, группа квазиньютоновских методов позволяет пользоваться преимуществами квадратичной аппроксимации, не строя в явном виде полную аппроксимирующую функцию второго порядка на каждой итерации. Квазиньютоновские методы способны ускорить вычислительный процесс при использовании их в рамках процедур определений направлений поиска для методов приведенного градиента и проекций градиента.

В сформулированных выше задачах (7.1) – (7.3), (7.4), (7.10) – (7.12) находятся такие значения типа технологического аппарата, векторов конструктивных и режимных переменных, при которых достигается минимум целевой функции (7.1) независимо от того какое значение принимает вектор неопределенных параметров  $\xi$  в заданной области  $\Xi$ . Если решение задачи не может быть найдено для заданной области  $\Xi$ , то необходимо поэтапно уменьшать область неопределенности  $\Xi$ , т.е. уточнять исходные данные для проектирования до тех пор, пока решение задачи не будет получено. Таким образом формируется техническое задание на точность определения исходной информации для проектирования управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий.

Предположим, что задача ОЗИП решена и получено решение  $[a^*, d^*, z^*]$ .

Для его реализации необходимо обеспечить выполнение условий  $z = z^*$  на этапе функционирования ХТС. Это означает, что мы лишены возможности изменять управляющие переменные  $z$  на этапе функционирования ХТС для выполнения регламентных требований и проектных ограничений. Ясно, что постановка и решение одноэтапной задачи интегрированного проектирования приводят к не вполне экономичным конструкциям аппаратов ХТС, так как не допускается использование настройки управляющих переменных  $z$  на этапе функционирования ХТС.

## 7.2. ДВУХЭТАПНОЕ ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХТС В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Все формулировки двухэтапных задач интегрированного проектирования (ДЗИП) будут учитывать возможность уточнения неопределенных параметров  $\xi$  и изменения управляющих переменных  $z$  на этапе функционирования ХТС. В этом состоит принципиальная разница между задачами ДЗИП и ОЗИП. В задаче ОЗИП (см. задачи (7.1), (7.2); (7.1), (7.4) и (7.10) – (7.12)) переменные  $a$ ,  $d$ ,  $z$  равноправны в том смысле, что они не изменяются на стадии функционирования

ХТС. В двухэтапной задаче возможны два случая: а) переменные  $a, d$  по-прежнему постоянны на этапе функционирования ХТС, в то время как переменные  $z$  могут изменяться; б) переменная  $a$  и одна часть конструктивных переменных  $d^k, k = 1, 2, \dots, k_1$  постоянны на стадии функционирования ХТС, в то время как другая часть конструктивных переменных  $d^k, k = k_1, k_1 + 1, \dots, K$  и управляющие переменные  $z$  могут изменяться. В частности, это свойство позволяет настраивать конструктивные  $d^k$  параметры наряду с управляющими  $z$  переменными для удовлетворения ограничений задачи.

При формулировке задачи ДЗИП используем следующее предположение – на стадии функционирования ХТС в каждый момент времени:

а) выполняется уточнение всех или части неопределенных параметров  $\xi$  на основе доступной экспериментальной информации;

б) решается задача ДЗИП с использованием математической модели с уточненными неопределенными параметрами  $\xi$  и найденный оптимальный режим реализуется на этапе функционирования ХТС.

Введем понятие области гибкости ХТС. Она состоит из точек области неопределенности  $\Xi$ , для которых можно найти такие значения управляющих переменных  $z$ , при которых все ограничения задачи интегрированного проектирования  $g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$  будут выполняться.

### Двухэтапная задача оптимизации с жесткими ограничениями

Предположим, что на этапе функционирования ХТС определяются точные значения всех неопределенных параметров, при этом все ограничения являются жесткими.

Рассмотрим условие работоспособности (гибкости) ХТС: ХТС является гибкой, если для каждого  $\xi \in \Xi$  можно найти такие значения (режимных) управляющих переменных  $z$ , что все ограничения задачи будут удовлетворены.

Задачу оптимизации в задаче ДЗИП ХТС с использованием математической модели  $y = \mathfrak{F}(a, d, z, \xi)$  с уточненными неопределенными параметрами на стадии функционирования ХТС назовем внутренней задачей интегрированного проектирования. В данном случае она имеет вид

$$\begin{aligned} C^*(a, d, \xi) &= \min_z C(a, d, z, \xi); \\ g_j(a, d, z, \xi) &\leq 0, \quad j = 1, \dots, m. \end{aligned} \tag{7.17}$$

Условие гибкости для задачи ДЗИП имеет вид

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0.$$

Предположим, что функция плотности распределения вероятности  $P(\xi)$  известна. Поскольку в каждый момент времени на стадии функционирования ХТС значение критерия оптимизации будет равно  $C^*(a, d, \xi)$ , то на стадии про-

ектирования ХТС можно оценить будущую работу ХТС, подсчитав математическое ожидание  $M\{\bullet\}$  величины  $C^*(a, d, \xi)$ :

$$M_{\xi}\{C^*(a, d, \xi)\} = \int_{\Xi} C^*(a, d, \xi) P(\xi) d\xi.$$

Эта величина будет использоваться как целевая функция в задаче интегрированного проектирования в условиях неопределенности. Результирующая двухэтапная задача есть задача стохастического программирования с рекурсией:

$$\min_{a, d} M_{\xi}\{C^*(a, d, \xi)\}. \quad (7.18)$$

Предположим, что внутренняя задача интегрированного проектирования (7.17) имеет решение во всех точках  $\xi$  и функция плотности распределения вероятности  $P(\xi)$  известна. Тогда имеем

$$\min_{a, d} \int_{\Xi} \min_z \{C(a, d, z, \xi) \mid g_j(a, d, z, \xi) \leq 0\} P(\xi) d\xi.$$

Поскольку интеграл есть бесконечная сумма и переменные  $z$ , соответствующие различным  $\xi$ , независимы друг от друга, то можно изменить порядок операторов интегрирования и минимизации:

$$\begin{aligned} & \min_{a, d} \min_{z(\xi)} \int_{\Xi} C(a, d, z, \xi) P(\xi) d\xi; \\ & g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad \xi \in \Xi. \end{aligned} \quad (7.19)$$

Так как оптимальное значение  $z$  во внутренней задаче ДЗИП (7.17) зависит от  $\xi$ , то  $z$  есть многомерная функция  $z(\xi)$ . Таким образом, в задаче (7.19) находим оптимальные векторы  $a$ ,  $d$  и оптимальную многомерную функцию  $z(\xi)$ , доставляющую функционалу  $\int_{\Xi} C(a, d, z(\xi), \xi) P(\xi) d\xi$  минимальное значение. Объединяя оба оператора минимизации по  $a$ ,  $d$  и  $z(\xi)$ , получим задачу ДЗИП для случая 1 (ДЗИП1):

$$\min_{a, d, z(\xi)} \int_{\Xi} C(a, d, z(\xi), \xi) P(\xi) d\xi; \quad (7.20)$$

$$g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad \xi \in \Xi. \quad (7.21)$$

Задача (7.20), (7.21) имеет бесконечное число ограничений и поисковых переменных (одна многомерная функция  $z(\xi)$  эквивалентна бесконечному числу обычных поисковых переменных). Решение задачи (7.18)  $a^*$ ,  $d^*$  гарантирует гибкость ХТС, так как внутренняя задача (7.17) ДЗИП1 решается во всех точках  $\xi \in \Xi$ . При этом нельзя гарантировать, что задача (7.17) имеет решение для каж-

дого  $a \in A, d \in D$  и  $\xi \in \Xi$ . Поэтому задача (7.18) должна быть дополнена условием гибкости  $\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$ , т.е.

$$C_1 = \min_{a,d} M_{\xi} \left\{ C^*(a, d, \xi) \right\};$$

$$\chi_1(a, d) \leq 0.$$

В результате получаем другую постановку задачи ДЗИП1:

$$C_1 = \min_{a,d,z(\xi)} \int_{\Xi} C(a, d, z(\xi), \xi) P(\xi) d\xi;$$

$$g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad \xi \in \Xi;$$

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0.$$

Заменим многомерный интеграл в целевой функции  $C_1$  некоторой конечной суммой с помощью соответствующей квадратурной формулы:

$$\int_{\Xi} C(a, d, z(\xi), \xi) P(\xi) d\xi = \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z^i, \xi^i),$$

где  $\xi^i (i \in I_1)$  – аппроксимационные (узловые) точки;  $z^i = z(\xi^i)$  – вектор режимных (управляющих) переменных, соответствующий аппроксимационной точке  $\xi^i$ ;  $w_i (i \in I_1)$  – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям  $w_i \geq 0$ ;  $\sum_{i \in I_1} w_i = 1$ . Кроме того, заменим бесконечное число ограничений конечным чис-

лом ограничений только в аппроксимационных точках  $\xi^i (i \in I_1)$ . Таким образом, получим дискретный вариант задачи ДЗИП1:

$$C_1 = \min_{a,d,z^i} \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z^i, \xi^i); \tag{7.22}$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_1; \tag{7.23}$$

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0. \tag{7.24}$$

В случае, если функции распределения неопределенных параметров неизвестны, аппроксимационные точки желательно выбирать таким образом, чтобы они попадали в область наиболее вероятных значений, которые параметры  $\xi$  могут принимать при функционировании ХТС, и достаточно плотно покрывали область  $\Xi$ . В некоторых случаях ДЗИП решается без ограничений  $\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$ :

$$C_1 = \min_{a,d,z^i} \sum_{i \in I_2} \omega_i C(a, d, z^i, \xi^i);$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_2.$$

Здесь множество  $I_2$  содержит аппроксимационные и некоторые дополнительные (критические) точки. Эта постановка задачи оправдана только в случае, когда аппроксимационные точки достаточно плотно покрывают область  $\Xi$ .

Это требует большого числа аппроксимационных точек даже для сравнительно малой размерности  $n_\xi$  вектора  $\xi$ . Если число узловых точек по каждой компоненте вектора  $\xi$  равно  $p$ , то число аппроксимационных точек будет равно  $p^{n_\xi}$ .

В этом случае размерность задачи будет равна  $n_a + n_d + p^{n_\xi} n_z$ . В случае когда число аппроксимационных точек невелико, использование ограничения  $\chi_1(a, d) \leq 0$  совершенно необходимо, так как это гарантирует выполнение ограничений задачи не только в аппроксимационных точках  $\xi^i, i \in I_1$ , но и во всех других точках области  $\Xi$ .

Используя соотношение  $\max_x \varphi(x) \geq 0 \Leftrightarrow \varphi(x) \leq 0, x \in X$ , преобразуем (7.22) – (7.24) к следующему виду:

$$I_1 = \min_{a,d,z^i} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z^i, \xi^i);$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I_1;$$

$$h(a, d, \xi) = \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, \quad \xi \in \Xi.$$

В случае, если функции распределения неопределенных параметров неизвестны, аппроксимационные точки желательно выбирать таким образом, чтобы они попадали в область наиболее вероятных значений, которые параметры  $\xi$  могут принимать при функционировании ТС и достаточно плотно покрывали область  $\Xi$ . В некоторых случаях ДЗИП решается без ограничений  $\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$ :

$$C_1 = \min_{a,d,z^i} \sum_{i \in I_2} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i);$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_2.$$

Здесь множество  $I_2$  содержит аппроксимационные и некоторые дополнительные (критические) точки. Эта постановка задачи оправдана только в случае, когда аппроксимационные точки достаточно плотно покрывают область  $\Xi$ .

Пусть  $[a^*, d^*, z^{i*}]$  – решение задачи (7.22) – (7.24). Обозначим через  $S_\Xi$  бесконечное множество точек, содержащихся в области  $\Xi$ , и через  $S_{A,P}$  – множест-

во точек  $\xi^P$ , которым соответствуют активные ограничения в точке решения задачи (7.22) – (7.24):

$$S_{A,P} = \{\xi^P : h(a^*, d^*, \xi^P) = 0, \xi^P \in \Xi\}.$$

Назовем эти точки активными. Из теоремы П.7 [38] следует, что решение  $[a^*, d^*, z^{i*}]$  задачи (7.22) – (7.24) есть решение (локальный минимум) задачи

$$\begin{aligned} I_1 &= \min_{a, d, z^i} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z^i, \xi^i); \\ g_j(a, d, z^i, \xi^i) &\leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I_1; \\ h(a, d, \xi^P) &= \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi^P) = 0, \quad \xi^P \in S_{A,P}. \end{aligned}$$

Определим *нижнюю границу* для задачи (7.22) – (7.24). Для этого введем некоторое произвольное множество точек  $S_2 = \{\xi^l : l \in I_2, \xi^l \in \Xi\}$ , из области неопределенности  $\Xi$ , где  $I_2$  – множество индексов точек в  $S_2$ . Точки  $S_2$  назовем критическими точками.

Рассмотрим задачу

$$I_1^L = \min_{a, d, z^i} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z^i, \xi^i); \tag{7.25}$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I_1; \tag{7.26}$$

$$h(a, d, \xi^l) = \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi^l) \leq 0, \quad \xi^l \in S_2. \tag{7.27}$$

Величина  $I_1^L$  является нижней границей оптимального значения целевой функции ДЗИП1 [38]:  $I_1^L \leq I_1$ . Пусть множество  $S_2^{(k+1)}$ , где  $k$  – номер итерации в конкретном алгоритме, получено добавлением одной или нескольких точек к множеству критических точек  $S_2^{(k)}$ , тогда  $I_1^{L,(k+1)} \geq I_1^{L,(k)}$ .

Действительно, так как  $S_2^{(k)} \subset S_2^{(k+1)}$ , то соотношение  $I_1^{L,(k+1)} \geq I_1^{L,(k)}$  следует из теоремы П.1 [38]. Таким образом, добавление точек к исходному множеству критических точек не ухудшает нижнюю границу, а в большинстве случаев ее улучшает.

Если множество критических точек  $\xi^l$ , принадлежащих множеству  $S_2^{(k)}$ , покрывает достаточно плотно область  $\Xi$ , то решение задачи (7.25) – (7.27) достаточно близко к решению задачи ДЗИП1, таким образом  $I_1 - I_1^{L,(k)} \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – достаточно малая положительная величина.

Если решение  $a^{(k)}, d^{(k)}$  задачи (7.25) – (7.27) удовлетворяет условию  $\chi_1(a^{(k)}, d^{(k)}) \leq 0$ , то  $a^{(k)}, d^{(k)}$  есть решение задачи (7.22) – (7.24).

Преобразуем задачу (7.25) – (7.27), используя теорему П.6 [46]:

$$I_1^L = \min_{a, d, z^i, z^l} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z^i, \xi^i); \quad (7.28)$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I_1; \quad (7.29)$$

$$\max_{j \in J} g_j(a, d, z^l, \xi^l) \leq 0, \quad \xi^l \in S_2. \quad (7.30)$$

В соответствии с теоремой П.3 [38] можно заменить каждое ограничение (7.30) следующими  $m$  ограничениями:

$$g_j(a, d, z^l, \xi^l) \leq 0, \quad j \in J, \quad l \in I_2.$$

Тогда задача (7.28) – (7.30) примет вид

$$I_1^L = \min_{a, d, z^i, z^l} \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z^i, \xi^i); \quad (7.31)$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I_1; \quad (7.32)$$

$$g_j(a, d, z^l, \xi^l) \leq 0, \quad j \in J, \quad \xi^l \in S_2, \quad l \in I_2. \quad (7.33)$$

Сравним задачи (7.25) – (7.27) и (7.31) – (7.33). Прямое решение задачи (7.25) – (7.27) требует использования методов недифференцируемой оптимизации, так как функция  $h(a, d, \xi)$  недифференцируема. В свою очередь, задача (7.31) – (7.33) является задачей дифференцируемой оптимизации и для ее решения могут быть использованы высокоэффективные методы нелинейного программирования.

*Верхняя граница для ДЗИП1.* Пусть область  $\Xi$  разбита на  $N_v$  подобластей  $\Xi_i^{(v)}$  ( $\Xi_i^{(v)} = \{\xi : \xi^{L,i,(v)} \leq \xi \leq \xi^{U,i,(v)}\}$ ), причем  $\Xi = \Xi_1^{(v)} \cup \dots \cup \Xi_{N_v}^{(v)}$ , где  $v$  – номер итерации алгоритма решения задачи ДЗИП1. Заменяем в задаче ДЗИП1 одно ограничение по гибкости  $N_v$  ограничениями  $\chi_{1,i}^U(a, d) \leq 0$  ( $i = 1, \dots, N_v$ ):

$$C_1^{U,(v)} = \min_{a, d, z^i} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i); \quad (7.34)$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad i \in I_1; \quad (7.35)$$

$$\chi_{1,1}^U(a, d) \leq 0, \quad \dots, \quad \chi_{1,N_v}^U(a, d) \leq 0, \quad (7.36)$$

где функция  $\chi_{1,i}^U(a, d)$  описывается формулой  $\chi_{1,i}^U(a, d) = \min_{z \in Z} \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi)$ .

В частности, когда  $N_v = 1$ , ограничение  $\chi_1(a, d) \leq 0$  заменяется ограничением  $\chi_1^U(a, d) \leq 0$ .

Подставляя выражение  $\chi_1^U(a, d) = \min_{z \in Z} \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi)$  в неравенства (7.36) задачу (7.34) – (7.36) можно преобразовать к виду

$$C_1^{U,(v)} = \min_{a,d,z^i,z^l} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i); \quad (7.37)$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad i \in I_1; \quad (7.38)$$

$$\max_{\xi \in \Xi_l^{(v)}} g_j(a, d, z^l, \xi) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad l = 1, \dots, N_v. \quad (7.39)$$

Пусть  $[a^{(v)}, z^{i,(v)}, z^{l,(v)}]$  – решение задачи (7.37) – (7.39), тогда  $[a^{(v)}, z^{i,(v)}]$  – решение задачи (7.34) – (7.36).

Обозначим через  $\xi^{j,(l)}$  решение задачи  $\max_{\xi \in \Xi_l^{(v)}} g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}, \xi)$ . Назовем называть точку  $\xi^{j,(l)}$  активной, если соответствующее неравенство (7.39) является активным в точке решения задачи (7.37), т.е.  $g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}, \xi^{j,(l)}) = 0$ .

Введем множество активных точек  $S_{A,P}^{(v)}$  задачи (7.37) – (7.39):

$$S_{A,P}^{(v)} = \{ \xi^{l,j} : g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}, \xi^{j,(l)}) = 0, \quad l = 1, \dots, N_v, \quad j = 1, \dots, m \}.$$

Будем называть область  $\Xi_l^{(v)}$  активной, если ей соответствует хотя бы одно равенство  $g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}, \xi^{j,(l)}) = 0$ . Активной области с номером  $l$  соответствует условие  $\chi_{1,l}^U(a, d) = 0$ . Ясно, что число активных областей не может быть больше размерности вектора конструктивных параметров. Используя теорему П.6 [38], можно записать задачу (7.37) – (7.39) в виде

$$C_1^{U,(v)} = \min_{a,d,z^i,z^l} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i),$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad i \in I_1,$$

$$g_j(a, d, z^l, \xi^{j,(l)}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad l = 1, \dots, N_v, \quad \xi^{j,(l)} \in S_{A,P}^{(v)}.$$

Задача (7.34) – (7.36) имеет следующие свойства:

1) величина  $C_1^{U,(v)}$  является верхней границей оптимального значения целевой функции ДЗИП1;

2) дробление некоторых подобластей множества  $\Xi^{(p)}$  не ухудшает верхнюю границу ДЗИП1, а в большинстве случаев даже ее улучшает;

3) если разбить область  $\Xi$  на достаточно малые подобласти  $\Xi_i^{(v)}$ , то решение задачи (7.34) – (7.36) будет достаточно близко к решению задачи ДЗИП1:

$$\lim_{r(\Xi_i^{(v)}) \rightarrow 0} C_1^{U, (v)} = C_1;$$

4) если размеры всех подобластей  $\Xi_i^{(v)}$  стремятся к нулю, то согласно свойству 3 задача (7.34) – (7.36) стремится к ДЗИП1 и ограничения (7.39) превращаются в ограничения  $h(a, d, \xi) \leq 0$ ,  $\xi \in \Xi$ . Поэтому множество активных точек  $S_{A, P}^{(v)}$  задачи (7.37) – (7.39) стремится к множеству активных точек ДЗИП1.

Рассмотрим алгоритм вычисления верхней границы оптимального значения целевой функции ДЗИП1 (решения задачи (7.37) – (7.39)). Обозначим через  $S_{2l}^{(k, p)}$  множество критических точек, принадлежащих подобласти  $\Xi_l^{(v)}$ , где  $p$  – номер итерации в алгоритме внешней аппроксимации решения задачи (7.37) – (7.39);  $v$  – номер итерации в алгоритме решения задачи ДЗИП1.

Множество  $S_{2l}^{(k, p)}$  образуется автоматически при решении задачи (7.34) – (7.36). Пусть  $S_2^{(v, p)} = S_{2,1}^{(v, p)} \cup S_{2,2}^{(v, p)} \cup \dots \cup S_{2, N_v}^{(v, p)}$ .

В алгоритме используем решение вспомогательной задачи:

$$C_1^{UL, (v)} = \min_{a, d, z^i, z^l} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i); \quad (7.40)$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad i \in I_1; \quad (7.41)$$

$$g(a, d, z^l, \xi^{l, q}) \leq 0, \quad \xi^{l, q} \in S_{2, l}^{(v, p)}, \quad l = 1, \dots, N_v. \quad (7.42)$$

Задача (7.40) – (7.42) дает нижнюю границу оптимального значения целевой функции задачи (7.37) – (7.39). Сравним задачу (7.40) – (7.42) с задачей, дающей нижнюю границу оптимального значения целевой функции ДЗИП1 (см. задачу (7.25) – (7.27)). В задаче (7.40) – (7.42) один вектор  $z^l$  соответствует всем точкам  $\xi^{l, q}$ , принадлежащим множеству  $S_{2, l}^{(v, p)}$ , в то время как в задаче (7.31) – (7.33) каждой точке  $\xi^i$  соответствует единственный вектор  $z^i$ . Приведем описание алгоритма вычисления верхней границы оптимального значения целевой функции ДЗИП1 (решения задачи (7.37) – (7.39)).

#### Алгоритм 7.4.

**Шаг 1.** Положим  $p = 1$ . Зададим множество подобластей  $\Xi_l^{(v)}$  ( $l = 1, \dots, N_v$ ) (число  $v$  фиксировано, следовательно, число подобластей и их размеры остаются постоянными в этом алгоритме). Зададим начальные значения  $z^{i, (0)}$ ,  $z^{l, (0)}$ ,  $a^{(0)}$ ,  $d^{(0)}$  ( $i \in I_1$ ,  $l = 1, \dots, N_v$ ) соответствующих переменных и достаточно малое число  $\varepsilon > 0$ .

**Шаг 2.** Сформируем начальное множество  $S_{2,l}^{(v,1)}$  критических точек для всех подобластей  $\Xi_l$  ( $l = 1, \dots, N_1$ )

$$S_{2,l}^{(v,1)} = \{ \xi^{l,j,(1)}, j = 1, \dots, m : g_j(a^{(0)}, d^{(0)}, z^{i,(0)}, \xi^{l,j,(1)}) > 0 \},$$

где  $\xi^{l,j,(1)}$  есть решение задачи

$$\max_{\xi \in \Xi_l^{(v)}} g_j(a^{(0)}, d^{(0)}, z^{i,(0)}, \xi).$$

**Шаг 3.** Решим задачу (7.40) – (7.42) и определим нижнюю границу  $C_1^{UL,(v)}$  величины  $C_1^{U,(v)}$ . Пусть  $[a^{(p)}, d^{(p)}, z^{i,(p)}, z^{l,(p)}]$  – решение этой задачи.

**Шаг 4.** Решим  $mN_v$  задач  $\max_{\xi \in \Xi_l^{(v)}} g_j(a^{(p)}, d^{(p)}, z^{i,(p)}, \xi)$ , где  $\Xi_l^{(v)} = \{ \xi : \xi^{L,l,(v)} \leq \xi \leq \xi^{U,l,(v)} \}$ . Обозначим через  $\xi^{l,j,(p)}$  решение этой задачи при фиксированных  $[l, j]$ .

**Шаг 5.** Проверим выполнение условия

$$g_j(a^{(p)}, d^{(p)}, z^{i,(p)}, \xi^{l,j,(p)}) \leq \varepsilon, j = 1, \dots, m; l = 1, \dots, N_v.$$

Если все неравенства выполняются, решение задачи (7.37) – (7.39) получено, перейти к шагу 9; в противном случае перейти к шагу 6.

**Шаг 6.** Создадим множества  $R^{l,(p)}$  ( $l = 1, \dots, N_v$ ) точек  $\xi^{l,j,(p)}$ , для которых ограничения нарушаются:

$$R^{l,(p)} = \{ \xi^{l,j,(p)} : g_j(a^{(p)}, d^{(p)}, z^{i,(p)}, \xi^{l,j,(p)}) > 0, j = 1, \dots, m; l = 1, \dots, N_v \}.$$

**Шаг 7.** Сформируем новые множества критических точек

$$S_{2l}^{(v,p+1)} = S_{2l}^{(v,p)} \cup R^{l,(p)} \quad (l = 1, \dots, N_v),$$

которые будут использоваться на следующей итерации.

**Шаг 8.** Положим  $p := p + 1$  и перейдем к шагу 3.

**Шаг 9.** Сформируем и запомним множество активных точек

$$S_{A,p}^{(v)} = \{ \xi^{l,j,(\hat{p})} : g_j(a^{(p)}, d^{(p)}, z^{i,(p)}, \xi^{l,j,(\hat{p})}) = 0, l = 1, \dots, N_v; j = 1, \dots, m \},$$

где  $\hat{p}$  – есть номер последней итерации этого алгоритма.

Перейдем к описанию алгоритма решения ДЗИП1 в следующей постановке:

$$C_1 = \min_{a, d, z^i} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i); \quad (7.43)$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_1; \quad (7.44)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} h(a, d, \xi) \leq 0. \quad (7.45)$$

Задача (7.43) – (7.45) имеет вид задачи полубесконечного программирования и для ее решения можно использовать алгоритм внешней аппроксимации.

Вначале рассмотрим упрощенную задачу полубесконечного программирования:

$$\bar{C} = \min_{x \in X} C(x); \quad (7.46)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(x, \xi) \leq 0; \quad j = 1, \dots, m, \quad (7.47)$$

где  $\Xi = \{\xi: \xi^L \leq \xi \leq \xi^U\}$ . Преобразуя ограничения задачи с помощью соотношения  $\max_{x \in X} g(x) \leq 0 \Leftrightarrow g(x) \leq 0, \quad x \in X$ , получим задачу

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \min_{x \in X} C(x), \\ g_j(x, \xi) &\leq 0, \quad j = 1, \dots, m; \quad \xi \in \Xi, \end{aligned}$$

в которой число поисковых переменных конечно, а число ограничений бесконечно. Введем понятие множества критических точек  $S^{(p)} = \{\xi^i: \xi^i \in \Xi, i \in I^{(p)}\}$ , где  $I^{(p)}$  – множество индексов точек  $\xi^i$ . Оно используется в алгоритме для построения некоторой аппроксимации ограничений в задаче полубесконечного программирования (7.47).

**Алгоритм внешней аппроксимации.**

**Шаг 1.** Положим  $p = 1$ . Задаем начальное значение  $x^{(0)}$  и начальное множество критических точек  $S^{(0)}$ .

**Шаг 2.** Решаем задачу

$$C^{(p)} = \min_{x \in X} C(x);$$

$$g_j(x, \xi^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m; \quad \xi^i \in S^{(p-1)}.$$

Пусть  $x^{(p)}$  – решение этой задачи.

**Шаг 3.** Решаем  $m$  задач

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(x^{(p)}, \xi) \quad (7.48)$$

и пусть  $\xi_j^{(p)}$  ( $j = 1, \dots, m$ ) – решения этих задач.

**Шаг 4.** Проверяем выполнение условий

$$g_j(x^{(p)}, \xi_j^{(p)}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (7.49)$$

Если все эти условия выполняются, то решение найдено.

**Шаг 5.** Сформируем множество  $R^{(p)}$ , которое содержит все точки  $\xi_j^{(p)}$ , в которых условия нарушаются:

$$R^{(p)} = \{ \xi_j^{(p)} : g_j(x^{(p)}, \xi_j^{(p)}) > 0, \quad j = 1, \dots, m \}.$$

**Шаг 6.** Сформируем новое множество критических точек

$$S^{(p)} = S^{(p-1)} \cup R^{(p)}.$$

**Шаг 7.** Полагаем  $p = p + 1$  и переходим к шагу 2.

Этот алгоритм дает решение задачи (7.46)–(7.47), если операции на шагах 2 и 3 выполняются в глобальном смысле.

На каждой итерации этот алгоритм выполняет две основные операции. Первая операция связана с определением нижней границы целевой функции задачи (7.46)–(7.47). Вторая операция связана с проверкой, является ли точка  $x^{(p)}$  решением задачи (7.46)–(7.47). Здесь алгоритм решает задачу (7.48)  $m$  раз. Если условие (7.49) удовлетворяется, то решение задачи (7.46)–(7.47) найдено. В противном случае точки  $\xi_j^{(p)}$ , в которых условия (7.49) нарушаются, добавляются в множество  $S^{(p)}$ .

Существенный недостаток описанного алгоритма состоит в необходимости решения  $m$  задач (7.48) на каждой итерации. Можно заменить  $m$  задач максимизации (7.48) одной задачей максимизации функции  $F(g)$ :

$$\max_{\xi} F(g),$$

$$F(g) = \frac{1}{\rho} \ln \left[ \sum_{j=1}^m e^{\rho g_j} \right],$$

где  $\rho$  – некоторый параметр. При этом установлено, что  $F(x, \rho) \geq \max_j (g_j(x))$ ,

$$\rho \geq 0, \quad \lim_{\rho \rightarrow \infty} F(x, \rho) \rightarrow \max_j (g_j(x)).$$

Теперь вернемся к решению задачи (7.43) – (7.45). Она имеет вид задачи полубесконечного программирования и для ее решения можно использовать описанный выше алгоритм внешней аппроксимации. Поскольку  $\max_{\xi \in \Xi} h(a, d, \theta) = \chi_1(a, d)$ ,

то на каждой итерации необходимо вычислять функцию гибкости  $\chi_1(a, d)$  (шаг 3 алгоритма внешней аппроксимации).

Совокупность аппроксимационных точек  $\xi^i, i \in I_1$ , обозначим через  $S_1$ , а множество критических точек на  $v$ -м шаге – через  $S_2^{(v)} = \{\xi^i : i \in I_2^{(v)}\}$ .

**Алгоритм 7.5.**

**Шаг 1.** Положим  $v = 1$ . Задаем множество аппроксимационных точек  $S_1$ , начальное множество критических точек  $S_2^{(0)}$ , начальные приближения  $a^{(0)}, d^{(0)}$  и достаточно малое число  $\varepsilon > 0$ .

**Шаг 2.** Решаем задачу (7.28) – (7.30) для определения нижней границы  $C_1^{L,(v)}$  оптимального значения величины  $C_1$ . Пусть  $a^{(v)}, d^{(v)}$  – решение этой задачи.

**Шаг 3.** Находим значение  $\chi_1(a^{(v)}, d^{(v)})$  и пусть  $\xi^{(v)}$  – решение этой задачи.

**Шаг 4.** Если выполняется условие  $\chi_1(a^{(v)}, d^{(v)}) \leq 0$ , то решение найдено. В противном случае находим точку  $\xi^{(v)}$ , для которой нарушаются ограничения  $g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, \xi^{(v)}) > 0, j = 1, \dots, m$ , и переходим к шагу 5.

**Шаг 5.** Образует новое множество критических точек  $S_2^{(v+1)}$ , добавляя точку  $\xi^{(v)}$  к множеству  $S_2^{(v)}$ :  $S_2^{(v+1)} = S_2^{(v)} \cup \{\xi^{(v)}\}$ .

**Шаг 6.** Полагаем  $v = v + 1$  и переходим к шагу 2.

Для вычисления значения  $\chi_1(a^{(v)}, d^{(v)})$  функции гибкости можно использовать метод ветвей и границ. Можно использовать на шаге 3 следующее приближение  $\tilde{\chi}_1(a^{(v)}, d^{(v)})$  значения  $\chi_1(a^{(v)}, d^{(v)})$ :

$$\tilde{\chi}_1(a^{(v)}, d^{(v)}) = \begin{cases} \chi_1^{U,(v)}, & \text{если } \chi_1^{U,(v)} < 0; \\ \bar{\chi}_1 = \frac{\chi_1^{U,(v)} + \chi_1^{L,(v)}}{2}, & \text{если } |\chi_1^{U,(v)} - \chi_1^{L,(v)}| < \varepsilon; \\ \chi_1^{L,(v)}, & \text{если } \chi_1^{L,(v)} \geq \varepsilon, \end{cases}$$

где  $\chi_1^{U,(v)}, \chi_1^{L,(v)}$  являются верхней и нижней границей функции гибкости  $\chi_1(a^{(v)}, d^{(v)})$ . В случае использования метода ветвей и границ величина  $\chi_1^{U,(v)}$  определяется по формуле  $\chi_1^U(a, d) = \min_{z \in Z} \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi)$ , в которой на каждой итерации величины  $\chi_{1,i}^{U,(v)}$  известны для каждой подобласти. Величина  $\chi_1^{L,(v)}$  получается с помощью формулы  $\chi_1^L(a, d) = \max_i \chi_{1,i}^L$ . Заметим, что если условие  $\chi_1^{U,(v)} \leq 0$  выполняется, то тем более выполняется условие

$\chi_1(a^{(v)}, d^{(v)}) \leq 0$ . Следовательно, если выполняется либо условие  $\chi_1^{U,(v)} \leq 0$ , либо условие  $|\chi_1^{U,(v)} - \chi_1^{L,(v)}| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  мало, то решение ДЗИП1 получено. Выполнение условия  $\chi_1^{L,(v)}(a, d) > 0$  означает, что имеет место условие  $\chi_1(a, d) > 0$ .

Описанная модификация позволяет использовать в алгоритме внешней аппроксимации только верхнюю и нижнюю границы функции гибкости  $\chi_1(a, d)$  вместо вычисления самой этой функции, что приводит к существенному уменьшению вычислительных затрат.

Далее рассмотрим метод разбиений и границ для решения ДЗИП1 [23, 24], представляющий двухуровневую итерационную процедуру (рис. 7.1).

Он состоит из следующих блоков:

1) вычисление верхней границы  $C_1^{U,(v)}$  (см. задачу (7.34) – (7.36)) целевой функции задачи

$$C_1 = \min_{a,d,z^i} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i); \tag{7.50}$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_1; \tag{7.51}$$

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0; \tag{7.52}$$

2) алгоритм вычисления нижней границы  $C_1^{L,(v)}$  (см. задачу (7.31) – (7.33)) целевой функции задачи (7.50) – (7.52);

3) разбиение области неопределенности  $\Xi$  (правило разбиения);

4) формирование множества  $S_2^{(v)}$  критических точек (правило выбора) в алгоритме вычисления нижней границы.

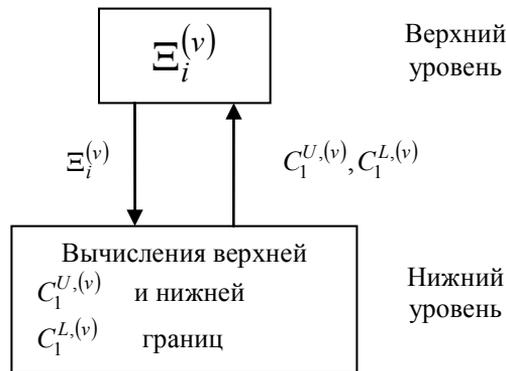


Рис. 7.1. Блок-схема метода разбиений и границ

Верхний уровень алгоритма разбиения и границ (см. рис. 7.1) служит для проверки окончания процедуры решения и разбиения области  $\Xi$  на подобласти. На нижнем уровне вычисляются верхняя  $C_1^{U,(v)}$  и нижняя  $C_1^{L,(v)}$  границы.

Сформулируем правила разбиения области  $\Xi$  на подобласти  $\Xi_i^{(v)}$  ( $i = 1, \dots, N_v$ ). Прямой путь состоит в систематическом дроблении всех областей на каждой итерации, пока все подобласти не станут достаточно малыми. Однако такая стратегия разбиения неэффективна, так как в этом случае размерность задач (7.31) – (7.33) и (7.37) – (7.39) достаточно быстро может стать очень высокой.

Рассмотрим более эффективный способ дробления, основанный на следующем эвристическом правиле: *на  $v$ -й итерации дробиться будут только те из областей  $\Xi_i^{(v)}$  ( $i = 1, \dots, N_v$ ), для которых соответствующие ограничения (7.35) задачи (7.34) – (7.36) будут активны*. Так как задача (7.37) – (7.39) эквивалентна задаче (7.34) – (7.36), то это эвристическое правило может быть сформулировано следующим образом: *на  $v$ -й итерации подобласть  $\Xi_i^{(v)}$  дробится, если выполняется условие*

$$\exists j \in J \max_{\xi \in \Xi_i} g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}, \xi) = 0,$$

где  $J = (1, \dots, m)$ ;  $[a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}]$  – решение задачи (7.37) – (7.39).

В работе [38] показано, что дробление подобластей с неактивными ограничениями бесполезно, а удаление активных ограничений в задаче оптимизации улучшает оптимальное значение целевой функции.

В качестве множества  $S_2^{(v)}$  можно использовать все критические точки, полученные при решении задачи (7.37) – (7.39) вычисления верхней границы целевой функции ДЗИП1. Однако в этом случае размерность задачи (7.31) – (7.33) может стать очень высокой. Необходимо выбирать это множество таким образом, чтобы нижняя граница  $C_1^L(a, d)$  была как можно ближе к оптимальному значению  $C_1$  целевой функции ДЗИП1. Как было показано ранее,  $C_1^{U,(v)}(a, d)$  стремится к  $C_1$  при  $\max_l r(\Xi_l^{(v)}) \rightarrow 0$ . Поэтому целесообразно, чтобы при  $N_v \rightarrow \infty$  задача (7.31) – (7.33) вычисления нижней границы стремилась к задаче вычисления верхней границы:

$$C_1^{U,(v)} = \min_{a, d, z^i, z^l} \sum_{i \in I_1} w_i C(a, d, z^i, \xi^i);$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m; \quad i \in I_1;$$

$$g_j(a, d, z^l, \xi^{jl}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m; \quad l = 1, \dots, N_v; \quad \xi^{jl} \in S_{AP}^{(v)}.$$

Следовательно, целесообразно выбрать множество  $S_2^{(v)}$  следующим образом:  $S_2^{(v)} = S_{A,P}^{(v)}$ . При этом можно уменьшить число точек, используемых для формирования  $S_2^{(v)}$ . Действительно, при  $N_v \rightarrow \infty$  все точки одной подобласти стягиваются в одну точку. Следовательно, во множество  $S_2^{(v)}$  можно включать только одну активную точку из всех точек, принадлежащих подобласти  $\Xi_i^{(v)}$ . В связи с этим образуем множество  $\tilde{S}_{A,P}^{(v)}$  из множества  $S_{A,P}^{(v)}$  следующим образом. В каждой подобласти  $\Xi_i^{(v)}$  из всех активных точек  $S_{A,P}^{l,(v)}$  оставим только одну, которую обозначим через  $\tilde{\xi}^l$ . Кроме того, в качестве  $\tilde{\xi}^l$  можно выбрать среднее арифметическое из всех активных точек подобласти  $\Xi_i^{(v)}$ :

$$\tilde{\xi}^l = \frac{1}{|S_{A,P}^{l,(v)}|} \sum_{j \in J_A^{l,(v)}} \xi^{l,j},$$

где  $|S_{A,P}^{l,(v)}|$  – число точек во множестве  $S_{A,P}^{l,(v)}$ ;  $J_A^{l,(v)}$  – множество номеров активных точек подобласти  $\Xi_i^{(v)}$ .

Множество  $\tilde{S}_{A,P}^{(v)}$  будет состоять из образованных таким образом точек  $\tilde{\xi}^l$ . В качестве множества  $S_2^{(v)}$  используем множество  $\tilde{S}_{A,P}^{(v)}$ , т.е.  $S_2^{(v)} = \tilde{S}_{A,P}^{(v)}$ .

Рассмотрим метод разбиений и границ решения задачи ДЗИП. Введем множество  $L^{(v)}$  подобластей  $\Xi_i^{(v)}$  следующим образом:

$$L_1^{(v)} = \left\{ \Xi_i^{(v)}, (i = 1, \dots, N_v) : r(\Xi_i^{(v)}) > \delta_1 \right\},$$

где  $\delta_1$  – заранее заданное число.

**Алгоритм 7.6.**

**Шаг 1.** Положим  $v = 1$ . Зададим начальное множество подобластей  $\Xi_l^{(1)}$  ( $l = 1, \dots, N_v$ ), множество аппроксимационных точек  $S_1 = \{\xi^i : i \in I_1\}$ , начальное множество критических точек  $S_2^{(0)}$ , начальные значения  $z^{i,(0)}, z^{l,(0)}, a^{(0)}, d^{(0)}$  ( $i \in I_1, l = 1, \dots, N_1$ ) соответствующих переменных, число  $\delta_1 > 0$  и достаточно малые числа  $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \delta_2 > 0, (\varepsilon_2 > \varepsilon_1, \delta_1 > \delta_2)$ . Положим  $C_1^{U,(0)} = a, C_1^{L,(0)} = -a$ , где  $a$  – достаточно большое число ( $a > -C_1$ ).

**Шаг 2.** Вычислим верхнюю границу  $C_1^{U,(v)}$  решением задачи (7.34) – (7.36) с помощью алгоритма 7.4. Пусть  $[a^{(v)}, d^{(v)}, z^{i,(v)}, z^{l,(v)}]$  ( $i \in I_1, l = 1, \dots, N_v$ ) – решение этой задачи.

**Шаг 3.** Определим множество  $Q^{(v)} = \{\Xi_l^{(v)} : l \in I_Q^{(v)}\}$  подобластей  $\Xi_i^{(v)}$ , которым соответствуют активные ограничения в задаче (7.34) – (7.36):

$$\chi_{1,l}^U(a^{(v)}, d^{(v)}) = 0, \quad \Xi_l^{(v)} \in Q^{(v)}.$$

**Шаг 4.** Если  $Q^{(v)}$  пустое множество, то решение ДЗИП1 найдено, алгоритм заканчивает свою работу.

**Шаг 5.** Если выполняется условие

$$C_1^{U,(v-1)} - C_1^{U,(v)} \leq \varepsilon_1 |C_1^{U,(v)}|,$$

то решение ДЗИП1 найдено, алгоритм заканчивает свою работу.

В противном случае проверяем выполнение условия

$$C_1^{U,(v-1)} - C_1^{U,(v)} \leq \varepsilon_2 |C_1^{U,(v)}|,$$

и если оно нарушается, то переходим к шагу 8, в противном случае переходим к шагу 6.

**Шаг 6.** Находим нижнюю границу  $C_1^{L,(v)}$ , решая задачу (7.31) – (7.33). Здесь мы полагаем  $S_2^{(v)} = S_{A,P}^{(v)}$  (см. шаг 9 алгоритма 7.4).

**Шаг 7.** Если выполняется условие

$$C_1^{U,(v-1)} - C_1^{U,(v)} \leq \varepsilon_1 |C_1^{U,(v)}|,$$

то решение ДЗИП1 найдено, алгоритм заканчивает свою работу.

**Шаг 8.** Если выполняется условие

$$r(\Xi_i^{(v)}) \leq \delta_2, \quad i = 1, \dots, N_v,$$

то решение ДЗИП1 найдено, алгоритм заканчивает свою работу.

**Шаг 9.** Если выполняется условие  $r(\Xi_l^{(v)}) \leq \delta_1$ ,  $l = 1, \dots, N_v$ , то переходим к шагу 11.

**Шаг 10.** Сформировать множество  $L^{(v)}$ . Найти множество  $V^{(v)}$  подобластей  $\Xi_i^{(v)}$ , принадлежащих одновременно множествам  $L^{(v)}$  и  $Q^{(v)}$ , т.е.

$$V^{(v)} = L^{(v)} \cap Q^{(v)}.$$

Разбить каждую подобласть  $\Xi_l^{(v)} \in V^{(v)}$  на две подобласти таким образом, что  $\Xi_{l_1}^{(v+1)} \cup \Xi_{l_2}^{(v+1)} = \Xi_l^{(v)}$ . Образовать новое множество  $\Xi^{(v+1)}$  подобластей из старого множества  $\Xi^{(v)}$ , заменяя подобласть  $\Xi_l^{(v)}$  новыми подобластями  $\Xi_{l_1}^{(v+1)}$  и  $\Xi_{l_2}^{(v+1)}$ . Переходим к шагу 12.

**Шаг 11.** Положим  $\delta_1 = \delta_1 / 2$  и переходим к шагу 9.

**Шаг 12.** Положим  $v = v + 1$  и переходим к шагу 2.

Алгоритм 7.6 позволяет получить локальный минимум.

Определение начального разбиения области  $\Xi$  на подобласти на шаге 1 является непростой задачей. Конечно, начальное разбиение может состоять из всей области  $\Xi$ . Однако в этом случае задача (7.34) – (7.36) может не иметь решения. В связи с этим на шаге 1 можно вычислять значение индекса гибкости  $\gamma_1$  ХТС. Эта величина находится решением задачи

$$\gamma_1 = \min_{a,d} \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$$

или 
$$\gamma_1 = \min_{a \in A, d \in D} u; \tag{7.53}$$

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq u. \tag{7.54}$$

Ясно, что если  $\gamma_1 > 0$ , то ДЗИП1 не имеет решения. Если  $\gamma_1 \leq 0$ , то, решая задачу (7.53), (7.54), мы получаем некоторые значения  $a^*, d^*$  и некоторое разбиение области  $\Xi$ , для которой задача ДЗИП1

$$C_1 = \min_{a,d,z^i} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i); \tag{7.55}$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_1; \tag{7.56}$$

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0 \tag{7.57}$$

имеет решение. Множество подобластей, найденное решением задачи (7.53), (7.54), может быть использовано как начальное разбиение области  $\Xi$  на подобласти  $\Xi_i^{(1)}$  на шаге 1 алгоритма 7.6.

До сих пор мы предполагали, что аппроксимационные точки в дискретном варианте ДЗИП1 (см. задачу (7.55) – (7.57)) задаются пользователем, и что число этих точек невелико. В данном случае главной проблемой является вычисление значения критерия, т.е. вычисление многомерного интеграла. Для этого используются два подхода.

Первый подход основывается на использовании квадратурных формул Гаусса. Предположим для простоты изложения, что вектор  $\xi$  имеет только две компоненты (т.е. область  $\Xi$  – прямоугольник); тогда, если все неопределенные параметры независимы, необходимо вычислить интеграл

$$I = \int_{\xi_2^L}^{\xi_2^U} \int_{\xi_1^L}^{\xi_1^U} C(a, d, z(\xi), (\xi)P(\xi)) d\xi_1 d\xi_2. \tag{7.58}$$

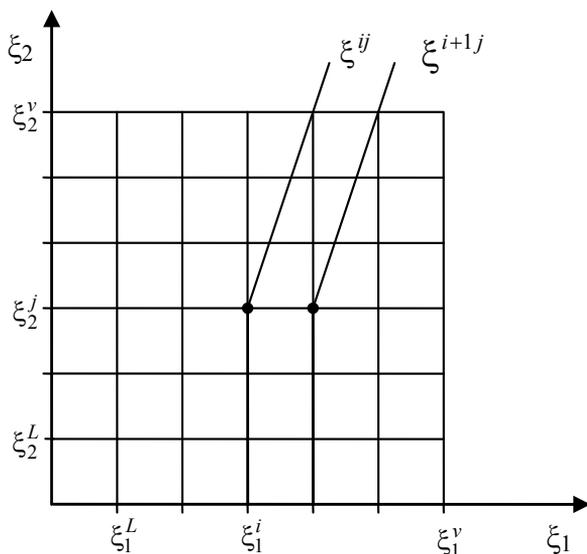


Рис. 7.2. Узловые точки двумерного интеграла

Введем  $p$  точек  $(\xi_1^k)$  и  $(\xi_2^k)$  на интервалах  $[\xi_1^L, \xi_1^U]$  и  $[\xi_2^L, \xi_2^U]$ , соответственно:

$$\begin{aligned} \xi_1^k &= \xi_1^L + k\Delta\xi_1, \quad k = 0, 1, \dots, (p-1); \\ \xi_2^k &= \xi_2^L + k\Delta\xi_2, \end{aligned}$$

где  $\Delta\xi_1 = \frac{(\xi_1^U - \xi_1^L)}{p}$ ,  $\Delta\xi_2 = \frac{(\xi_2^U - \xi_2^L)}{p}$ .

Пересечения прямых (рис. 7.2):  $\xi_1 = \xi_1^i$ ,  $i = 0, 1, \dots, (p-1)$  и  $\exists j \in J \max_{\xi \in \Xi_j^{l,(v)}} g_j(a^{(v)}, d^{(v)}, z^{l,(v)}, \xi) = 0$ ,  $j = 0, 1, \dots, (p-1)$ , образуют  $p^2$  точек пересечения (узлов)  $\xi^{ij} = (\xi_1^i, \xi_2^j)$  ( $i = 0, \dots, p-1$ ,  $j = 0, \dots, p-1$ ), где  $\xi_2^j = \xi_2^L + j\Delta\xi_2$ ,  $\xi_1^j = \xi_1^L + j\Delta\xi_1$ , и квадратурная формула Гаусса приближенного значения интеграла (7.58) имеет вид

$$I \approx \frac{(\xi_1^U - \xi_1^L)}{2} \frac{(\xi_2^U - \xi_2^L)}{2} \sum_{i=0}^{p-1} \gamma_1^i \sum_{j=0}^{p-1} \gamma_2^j C(a, d, z^{ij}, \xi_1^i, \xi_2^j),$$

где  $z^{ij}$  – управляющая переменная, соответствующая точке  $\xi^{ij}$ . Квадратурная формула легко обобщается на  $n$ -мерный случай. В этом случае для аппроксимации многомерного интеграла потребуется  $p^{n_\xi}$  узловых точек, где  $n_\xi$  – размер-

ность вектора  $\xi$ . Заменяя целевую функцию ее гауссовым приближением, получим дискретный вариант ДЗИП1 (7.55) – (7.57). Здесь узловые точки используются в качестве аппроксимационных точек. Следовательно, множество  $S_1 = \{\xi^i : i \in I_1\}$  аппроксимационных точек в задаче (7.55) – (7.57) будет состоять из  $p^{n_\xi}$  точек. Для вычисления целевой функции в задаче (7.55) – (7.57) следует найти значение функции  $C(a, d, z, \xi)$   $p^{n_\xi}$  раз. Размерность задачи (7.31) – (7.33) вычисления нижней границы будет равна  $n_d + (p^{n_\xi} + N_{c,p})n_z$ , где  $n_d$  и  $n_z$  – размерности векторов  $d$  и  $z$ , соответственно,  $N_{c,p}$  – число критических точек. Очевидно, что решение практических задач большой размерности может потребовать огромных вычислительных затрат.

Второй подход к вычислению интегралов основывается на процедуре Монте-Карло и близких к ней процедурах (латинского гиперкуба и последовательности проб Хаммерслея (HSS)). Для этих методов известно, что число аппроксимационных точек, необходимых для вычисления интеграла с заданной точностью, не зависит от размерности вектора  $\xi$  и техника HSS наиболее эффективна по сравнению со всеми подобными подходами. При этом даже метод HSS требует нескольких сотен аппроксимационных точек для получения разумной точности вычисления интеграла.

Техника Монте-Карло для оценки многомерного интеграла достаточно проста. Пусть имеется последовательность, состоящая из  $N$  векторов  $\xi^i$ , имеющих плотность распределения вероятностей  $P(\xi)$ . Тогда интеграл можно вычислить по формуле

$$\int_{\Xi} C(a, d, z(\xi), P(\xi)) d\xi \approx \frac{1}{N} \sum_{i \in I} C(a, d, z(\xi^i), \xi^i).$$

В качестве аппроксимационных точек можно использовать номинальную точку и все критические точки, получаемые в итерациях этого метода. Весовой коэффициент, соответствующий номинальной точке, выбирался равным 0,5, остальные коэффициенты выбирались равными  $0,5 / (n - 1)$ .

Видно, что выбор множества аппроксимационных точек в данном случае достаточно субъективен. В связи с этим рассмотрим более объективный подход к построению целевой функции в ДЗИП1. В каждой задаче можно выделить три характерные точки. Первая точка – номинальная точка  $\xi^N$ . Если распределение (неизвестное) является симметричным, то это наиболее вероятная точка. Вторая и третья точки соответствуют точкам с наилучшим и наихудшим значениями функции при фиксированных  $a, d, z$ . На основе этих точек можно сформулировать три целевые функции и три внутренние задачи оптимизации ДЗИП1:

- 1)  $C_1^*(a, d) = \min_z C(a, d, z, \xi^N)$  при условии  $g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j = 1, \dots, m$ ;
- 2)  $C_2^*(a, d) = \min_z \min_{\xi \in \Xi} C(a, d, z, \xi)$  при условии  $g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j = 1, \dots, m$ .
- 3)  $C_3^*(a, d) = \min_z \max_{\xi \in \Xi} C(a, d, z, \xi)$  при условии  $g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j = 1, \dots, m$ .

На основе этих внутренних задач сформируем следующие три варианта ДЗИП:

$$C_i = \min_{a,d} C_i^*(a, d), \quad i = 1, 2, 3;$$

$$\chi_1(a, d) \leq 0.$$

Существуют неравенства  $C_2^* \leq C \leq C_3^*$ , где  $C$  получается решением ДЗИП

$$C_1 = \min_{a,d,z^i \in Z} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(a, d, z^i, \xi^i);$$

$$g(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad i \in I_1;$$

$$\chi_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{z \in Z} \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$$

для любого набора аппроксимационных точек и весовых коэффициентов. Таким образом, решив задачу ДЗИП для вариантов  $i = 2, 3$ , можно оценить диапазон, в котором будет лежать оптимальное значение целевой функции ДЗИП.

Для устранения трудоемкой операции вычисления многомерного интеграла при решении задачи ДЗИП используем формулировку двухэтапной задачи оптимизации, в которой минимизируется верхняя граница целевой функции. Введем семейство  $\Xi$  областей  $\Xi_\alpha$ , обладающих свойством

$$\Pr\{\xi \in \Xi_\alpha\} = \alpha.$$

Тогда эта задача может быть записана следующим образом:

$$C = \min_{a,d,z(\xi),u,\Xi_\alpha} u; \tag{7.59}$$

$$\max_{\xi \in \Xi_\alpha} C(a, d, z(\xi), \xi) \leq u; \tag{7.60}$$

$$\chi_1(a, d) \leq 0. \tag{7.61}$$

Обозначим решение этой задачи через  $a^*, d^*, z^*(\xi), u^*, \Xi_\alpha^*$ . Поскольку ограничение  $C(a^*, d^*, z^*(\xi), \xi) - u^* \leq 0$  удовлетворяется в каждой точке области  $\Xi_\alpha^*$ , то вероятность удовлетворения этого неравенства равна  $\alpha$ . Это означает, что с вероятностью  $\alpha$  целевая функция будет меньше, чем  $u^*$ .

Рассмотрим задачу получения верхней оценки величины  $u^*$ . Для этого выберем какую-либо одну область  $\Xi_\alpha^1$  из семейства  $\Xi$  и решим задачу (7.59) – (7.61) при фиксированной области  $\Xi_\alpha = \Xi_\alpha^1$

$$\begin{aligned} & \min_{a,d,z(\xi),u} u; \\ & \max C(a, d, z(\xi), \xi) \leq u, \\ & \chi_1(a, d) \leq 0. \end{aligned}$$

Пусть получено оптимальное значение  $u_1$ . Поскольку взята произвольная область из семейства  $\Xi$ , то имеет место соотношение  $u^1 \geq u^*$ . Таким образом, с вероятностью  $\alpha$  целевая функция будет меньше, чем  $u^1$ . Поскольку при  $\alpha = 1$  семейство  $\Xi$  состоит из одной области  $\Xi$ , то в этом случае получается точное решение. Отсюда ясно, что чем ближе  $\alpha$  к единице, тем ближе  $u^1$  к  $u^*$ .

Если все параметры  $\xi_i$  являются независимыми и имеют нормальное распределение, то область  $\Xi_\alpha$  является многомерным прямоугольником вида

$$\Xi_\alpha = \{ \xi : \xi_i^N - k_i \sigma_i \leq \xi_i \leq \xi_i^N + k_i \sigma_i, I = 1, \dots, n_\xi \},$$

где  $\xi^N$  – номинальная точка и величина  $k_i$  определяются следующим образом:  $\text{Pr} \{ \xi_i^N - k_i \sigma_i \leq \xi_i \leq \xi_i^N + k_i \sigma_i \} = \alpha^{1/n_\xi}$ .

Если параметры  $\xi_i$  не являются независимыми, но имеют нормальное распределение, то область  $\Xi_\alpha$  является многомерным эллипсоидом.

Структура задачи (7.59) – (7.61) близка к структуре ДЗИП1 и не требует вычисления многомерных материалов, но трудоемкость ее решения будет намного меньше трудоемкости решения ДЗИП1.

При интегрированном проектировании возможно оценить средние потери энергии, связанные с необходимостью выполнения регламентных требований, проектных ограничений и неточности исходной математической модели ХТС –  $y = \mathfrak{Z}(a, d, z, \xi)$ . Пусть  $a^*, d^*$  – решение задачи ДЗИП1, а  $z^*(a^*, d^*, \xi)$  – решение внутренней задачи (7.17) при фиксированных  $a^*, d^*$  и параметре  $\xi$ . Чтобы поддерживать значение управляющей переменной на уровне  $z^*(a^*, d^*, \xi)$ , необходимо расходовать энергию. Например, если  $z_l$  – температура, то необходимо тепло, чтобы поддерживать температуру  $z_l^*$ ; если  $z_l$  – расход некоторого потока, то необходима энергия для насоса или компрессора, поддерживающего требуемое значение потока. Таким образом, величина  $z^*(a^*, d^*, \xi)$  непосредственно связана с потребляемой энергией. Предположим, что потребляемая энергия пропорциональна величине  $z^*(a^*, d^*, \xi)$  с коэффициентом пропорциональности  $k_i$ .

Тогда среднее потребление энергии, связанное с реализацией оптимального значения  $i$ -й управляющей переменной, определяется величиной

$$\bar{I}^* = \int \sum_{\xi=1}^{n_z} k_i z_i^*(a^*, d^*, \xi) P(\xi) d\xi.$$

В этом случае аналогично коэффициентам запаса конструктивных переменных можно ввести понятие энергетического коэффициента запаса  $\eta_E$ :

$$\eta_E = (\bar{I}^* - I_N) / I_N,$$

где  $I_N$  – потребляемая энергия при номинальных значениях неопределенных параметров.

### Двухэтапная задача оптимизации с мягкими (вероятностными) ограничениями

Предположим, что на этапе функционирования ХТС можно определить точные значения всех неопределенных параметров, при этом все ограничения являются мягкими и должны быть выполнены с заданной вероятностью  $\rho$ .

В качестве критерия оптимизации в задаче ДЗИП2 как и в задаче ДЗИП1 используем математическое ожидание исходной целевой функции  $C(a, d, z, \xi)$

$$I^* = \min_{a, d, z(\xi), \alpha} M_{\xi} \{C(a, d, z, \xi)\};$$

$$\Pr_{\xi} \{g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, \quad j \in J_1,$$

или верхнюю границу  $\alpha$  исходной целевой функции  $C(a, d, z, \xi)$ :

$$I^* = \min_{a, d, z(\xi), \alpha} \alpha; \tag{7.62}$$

$$\Pr_{\xi} \{g_0 = C(a, d, z(\xi), \xi) - \alpha \leq 0\} \geq \rho_0; \tag{7.63}$$

$$\Pr_{\xi} \{g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, \quad j \in J_1. \tag{7.64}$$

В задаче (7.62) – (7.64)  $\alpha$  – скалярная переменная (зависящая от значений конструктивных и режимных переменных);  $\Pr\{\bullet\}$  – вероятность выполнения ограничения  $\{\bullet\}$ ;  $g_0, g_j$  – функции ограничений;  $g_0(a, d, z(\xi), \xi) = C(a, d, z(\xi), \xi)$  – целевая функция (критерий) задачи оптимизации;  $\rho_0, \rho_j$  – заданные значения вероятности выполнения ограничений.

$$\text{Введем обозначения } \bar{g}_j(a, d, z, \xi) = \begin{cases} g_j(a, d, z, \xi) - \alpha, & j = 0, \\ g_j(a, d, z, \xi), & j \in J, \end{cases} \quad j \in \bar{J} = 0 \cap J$$

и множество  $S^{(v)} = \{\xi^i : i \in I^{(v)}\}$  накопления точек  $\xi$ , в которых нарушаются

ограничения (7.63)–(7.64). Кроме того, в алгоритме используем вспомогательную задачу нелинейного программирования вида (В):

$$\begin{aligned} I^*(a, d, z^i, \xi) &= \min_{a, d, z^i, \alpha} \alpha; \\ \bar{g}_j(a, d, z^i, \xi^i) &\leq 0, \quad j \in \bar{J}, \quad i \in I^{(v)}. \end{aligned} \quad (B)$$

Решение задачи (В) заключается в нахождении типа аппаратного оформления ТС  $a^*$ , значений векторов конструктивных  $d^*$  и режимных (заданий регуляторам САС) переменных  $z^{i*}$ , при которых достигается минимальное значение скалярной переменной  $\alpha$  при условии выполнения всех ограничений задачи (В) в заданном наборе точек  $\xi^i, i \in I^{(v)}$ .

**Алгоритм 7.7.**

**Шаг 1.** Принимаем  $\mu = 1$ , число альтернативных типов аппаратного оформления ТС  $\mu_{\text{зад}}$  и начальное приближение для конструкции ТС  $a^{(\mu)}$ .

**Шаг 2.** Принимаем  $v = 1$ , задаем начальное множество  $S^{(v-1)} = \{\xi^i : i \in I^{(v-1)}\}$  из условия наилучшей аппроксимации функций  $z(\xi)$  и начальные приближения  $d^{(v-1)}, z^{i,(v-1)}, \xi^i, i \in I^{(v-1)}$ .

**Шаг 3.** Решаем вспомогательную задачу (В)

$$\begin{aligned} I(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{i(v)}, \xi) &= \min_{a, d, z^i, \alpha} \alpha; \\ \bar{g}_j(a^{(\mu)}, d, z^i, \xi^i) &\leq 0, \quad j \in \bar{J}, \quad i \in I^{(v-1)} \end{aligned}$$

и пусть  $a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{i,(v)}$  есть решение этой задачи.

**Шаг 4.** Вычисляем

$$\text{Pr}_{\xi} \{ \bar{g}_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0 \} \geq \rho_j, \quad j \in J_1. \quad (7.65)$$

Для аппроксимации функции  $z = z(\xi)$  используем значения этих функций в дискретных точках  $\xi^i, i \in I^{(v-1)}$ .

Если условие (7.65) выполняется, то переходим к шагу 6, в противном случае – к шагу 5.

**Шаг 5.** Вычисляем значение функции гибкости ТС  $a^{(\mu)}, d^{(v)}$

$$\chi(a^{(\mu)}, d^{(v)}) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in \bar{J}} \bar{g}_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, \alpha^{(v)}, z, \xi), \quad (7.66)$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации.

Обозначим через  $\bar{\xi}^{(v)}$  решение задачи (7.66) и дополним точкой  $\bar{\xi}^{(v)}$  множество точек  $S^{(v-1)}$ , в которых нарушаются мягкие ограничения (7.63)–(7.64):

$$S^{(v)} = S^{(v-1)} \cup \bar{\xi}^{(v)}, \quad I^{(v)} = I^{(v-1)} \cup (n+1),$$

увеличиваем число критических точек  $n$  на 1, т.е.  $n = n + 1$ , и переходим к шагу 3.

**Шаг 6.** Решение для  $\mu$ -го типа конструкции ТС получено  $a^{(\mu)}, d^{(\mu)} = d^{(v)}, z^{(\mu)} = z^{i, (v)}$ .

**Шаг 7.** Проверяем выполнение условия «Множество альтернативных типов аппаратурного оформления ТС исчерпано?», т.е.  $\mu \geq \mu_{\text{зад}}$ . Если «да», то получаем окончательное решение  $a^* = a^{(\mu)}, d^* = d^{(\mu)}, z^* = z^{i, (\mu)}(\xi^i), i \in I^{(v)}$ , и алгоритм заканчивает свою работу. В противном случае переходим к альтернативному типу аппаратурного оформления, т.е. увеличиваем число  $\mu$  на единицу,  $\mu = \mu + 1$ , и переходим к шагу 2.

Дадим некоторые пояснения алгоритму 5.

На шаге 4 осуществляется многомерная интерполяция с помощью функций  $z = z(\xi)$  по известным дискретным точкам  $\xi^i, z^i, i \in I^{(v)}$ . Это можно сделать с помощью многомерных кубических сплайнов или с использованием процедуры приближенной аппроксимации, суть которой заключается в следующем. При реализации математической модели для каждого полученного случайного значения  $\xi$  в качестве соответствующего  $z(\xi)$  используем значение  $z^l(\xi^l), l \in I^{(v)}$ , которое соответствует точке  $\xi^l$ , наиболее близкой к точке  $\xi$ , т.е.

$$r^i(\xi, \xi^i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_\xi} (\xi_j - \xi_j^i)^2}, \quad i \in I^{(v)}, \quad n_\xi = \dim \xi;$$

$$\xi^l = \min_{i \in I^{(v)}} r^i(\xi, \xi^i) \Rightarrow l = \arg \min_{i \in I^{(v)}} r^i(\xi, \xi^i).$$

Фактически в описанной процедуре используем кусочно-постоянную аппроксимацию функций  $z = z(\xi)$ .

На шаге 5 неравенство  $\chi(a^{(\mu)}, d^{(v)}) \leq 0$  означает, что мягкие ограничения выполняются с вероятностью 1. Поэтому, если не выполняется условие (7.65), то заведомо не выполняется условие  $\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(v)}) \leq 0$  и, следовательно, получим точку  $\bar{\xi}^{(k)}$ , в которой нарушаются мягкие ограничения.

При использовании дополнительной переменной  $\alpha$  проводим масштабирование поисковых переменных, чтобы диапазоны их изменения были примерно одинаковы.

**Двухэтапная задача оптимизации со смешанными ограничениями**

Предположим, что на этапе функционирования ХТС можно определить точные значения всех неопределенных параметров, при этом имеются смешанные ограничения: ограничения с номерами  $j \in J_1 = \{1, \dots, m_1\}$  являются мягкими, а ограничения с номерами  $j \in J_2 = \{m_1 + 1, \dots, m\}$  – жесткими и должны быть удовлетворены с заданной вероятностью  $p$ .

В качестве критерия оптимизации в задаче ДЗИПЗ как и в задачах ДЗИП1, ДЗИП2 используем математическое ожидание исходной целевой функции  $C(a, d, z, \xi)$

$$I^* = \min_{a, d, z(\xi), \alpha} M_{\xi} \{C(a, d, z, \xi)\};$$

$$\Pr_{\xi} \{g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0\} \geq p_j, \quad j \in J_1;$$

$$\chi_1(a, d, J_2) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_2} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$$

или верхнюю границу  $\alpha$  исходной целевой функции  $C(a, d, z, \xi)$ :

$$I^* = \min_{a, d, z(\xi), \alpha} \alpha; \tag{7.67}$$

$$\Pr_{\xi} \{g_0 = C(a, d, z(\xi), \xi) - \alpha \leq 0\} \geq p_0; \tag{7.68}$$

$$\Pr_{\xi} \{g_j(a, d, z(\xi), \xi) \leq 0\} \geq p_j, \quad j \in J_1; \tag{7.69}$$

$$\chi_1(a, d, J_2) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_2} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0. \tag{7.70}$$

В задаче (7.67) – (7.70)  $\chi_1(d)$  – функция гибкости ТС. Введем обозначения

$$\bar{g}_j(a, d, z, \xi) = \begin{cases} g_j(a, d, z, \xi) - \alpha, & j = 0, \\ g_j(a, d, z, \xi), & j \in J_1, \end{cases} \quad j \in \bar{J}_1 = 0 \cup J_1$$

и множество  $S^{(v)} = \{\xi^i : i \in I^{(v)}\}$  накопления точек  $\xi$  с индексами  $i \in I^{(v)}$ , в которых нарушаются ограничения (7.69)–(7.70), причем во множестве точек  $S_1^{(v)}$  накапливаются точки, в которых нарушаются мягкие ограничения, а во множестве  $S_2^{(v)}$  – точки, в которых нарушаются жесткие ограничения.

Кроме того, в алгоритме используем вспомогательную задачу нелинейного программирования вида ( $\Gamma$ ):

$$I^*(a, d, z^i, \xi) = \min_{a, d, z^i, \alpha} \alpha;$$

$$\bar{g}_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in \bar{J}_1, \quad i \in I^{(v)};$$

$$g_j(a, d, z^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J_2, \quad i \in I^{(v)}.$$
( $\Gamma$ )

Решение задачи (Г) заключается в нахождении типа аппаратного оформления ТС  $a^*$ , значений векторов конструктивных  $d^*$  и режимных (заданий регуляторам САС) переменных  $z^{i*}$ , при которых достигается минимальное значение скалярной переменной  $\alpha$  при условии выполнения всех ограничений задачи в заданном наборе точек  $\xi^i$ ,  $i \in I^{(v)}$ .

**Алгоритм 7.8.**

**Шаг 1.** Принимаем  $\mu=1$ , число альтернативных типов аппаратного оформления ТС  $\mu_{\text{зад}}$  и начальное приближение для конструкции ТС  $a^{(\mu)}$ .

**Шаг 2.** Принимаем  $v=1$ , задаем начальные множества  $S^{(v-1)} = S_1^{(v-1)} + S_2^{(v-1)}$ ,  $I^{(v-1)}$  из условия наилучшей аппроксимации функций  $z(\xi)$ , число  $n$  номеров точек  $\xi^i$ ,  $i \in I^{(v-1)}$  и начальные приближения  $d^{(v-1)}$ ,  $z^{i,(v-1)}$ ,  $i \in I^{(v-1)}$ .

**Шаг 3.** Решаем вспомогательную задачу (Г)

$$\begin{aligned} I(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z^{i(v)}, \xi) &= \min_{a, d, z^i, \alpha} \alpha; \\ \bar{g}_j(a^{(\mu)}, d, z^i, \xi^i) &\leq 0, \quad j \in \bar{J}_1, \quad i \in I^{(v-1)}; \\ g_j(a^{(\mu)}, d, z^i, \xi^i) &\leq 0, \quad j \in J_2, \quad i \in I^{(v-1)}, \end{aligned}$$

и пусть  $a^{(\mu)}$ ,  $d^{(v)}$  есть решение этой задачи.

**Шаг 4.** Вычисляем

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(v)}) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_2} g_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z, \xi) \quad (7.71)$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации. Обозначим через  $\bar{\xi}^{(v)}$  решение задачи (7.71) и проверяем выполнение условия

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(v)}) \leq 0 \quad (7.72)$$

в точке решения  $\bar{\xi}^{(v)}$  задачи (7.71). Если условие (7.72) не выполняется, то переходим к шагу 5, в противном случае – к шагу 6.

**Шаг 5.** Дополним множество точек  $S_2^{(v)}$ , в которых нарушаются ограничения (7.72), точкой  $\bar{\xi}^{(v)}$ , т.е.

$$S_2^{(v)} = S_2^{(v-1)} \cup \bar{\xi}^{(v)}, \quad I_1^{(v)} = I_1^{(v-1)} \cup (n+1),$$

увеличиваем число критических точек  $n$  на 1,  $n = n+1$ ,  $p = a5$  и переходим к шагу 9.

**Шаг 6.** Проверяем выполнение мягких (вероятностных) ограничений

$$\Pr\{\bar{g}_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, z(\xi), \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, \quad j \in J_1. \quad (7.73)$$

Для аппроксимации функции  $z = z(\xi)$  используем значения этих функций в дискретных точках  $\xi^i, i \in I^{(v-1)}$ .

Если условие (7.72) выполняется, а условие (7.73) не выполняется, то переходим к шагу 8.

Если условия (7.72), (7.73) выполняются, то решение для заданного типа аппаратурного оформления найдено:  $a^{(\mu)}, d^{(\mu)} = d^{(v)}, z^{(\mu)} = z^{i,(\mu)}$ .

**Шаг 7.** Проверяем выполнение условия «Множество альтернативных типов аппаратурного оформления ТС исчерпано?», т.е.  $\mu \geq \mu_{\text{зад}}$ . Если «да», то получаем окончательное решение  $a^* = a^{(\mu)}, d^* = d^{(\mu)}, z^* = z^{i,(\mu)}, i \in I^{(v)}$ , и алгоритм заканчивает свою работу. В противном случае переходим к альтернативному типу аппаратурного оформления, т.е. увеличиваем число  $\mu$  на единицу и переходим к шагу 2.

**Шаг 8.** Вычисляем

$$\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(v)}) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_1} \bar{g}_j(a^{(\mu)}, d^{(v)}, \alpha^{(v)}, z, \xi), \quad (7.74)$$

где  $\bar{J}_1 = (0, 1, 2, \dots, m_1)$ , с использованием алгоритма внешней аппроксимации. Обозначим через  $\bar{\xi}^{(v)}$  решение задачи (7.74) и дополним точкой  $\bar{\xi}^{(v)}$  множество точек  $S_1^{(v)}$ , в которых нарушаются мягкие ограничения (7.73), т.е.

$$S_1^{(v)} = S_1^{(v-1)} \cup \bar{\xi}^{(v)}, \quad I_2^{(v)} = I_2^{(v-1)} \cup (n+1), \quad p = a8$$

и увеличиваем число критических точек  $n$  на 1,  $n = n + 1$ .

**Шаг 9.** Если  $p = a5$ , то переобозначим множества  $S_2^{(v-1)}, I_2^{(v-1)}$ , т.е.  $S_2^{(v)} = S_2^{(v-1)}, I_2^{(v)} = I_2^{(v-1)}$ , если  $p = a8$ , то  $S_1^{(v)} = S_1^{(v-1)}, I_1^{(v)} = I_1^{(v-1)}$ . Сформируем множества  $S^{(v)} = S_1^{(v)} \cup S_2^{(v)}, I^{(v)} = I_1^{(v)} \cup I_2^{(v)}$ , присвоим числу итераций  $v$  значение  $v + 1$  и переходим к шагу 3.

Результаты решения задачи (7.67) – (7.70) в соответствии с методологией интегрированного проектирования используются при определении оптимальных значений конструктивных параметров  $a^*, d^*$  ТС и оптимальных заданий  $z^*(\hat{\xi})$  регуляторам САС автоматизированного комплекса «ТС-САУ» в зависимости от уточнения (измерения)  $\hat{\xi}$  вектора неопределенных параметров  $\xi$ .

### 7.3. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ САПР

Универсальные программные пакеты компьютерного моделирования ХТС представляют специальный инструментарий для инженеров-проектировщиков этих систем [39]. Основные приложения универсальных пакетов связаны с компьютерным моделированием ХТС и явлений в фундаментальных науках (физике, химии, биологии и др.) и связанных с ними прикладных научных направлениях (теплотехнике, строительной механике, пищевой технологии, различных видах машиностроения и др.), а также с дальнейшим развитием САПР ХТС. Универсальные программные пакеты позволяют на основе данных, полученных в САПР, построить виртуальную полную электронную модель (макет) готового химико-технологического объекта. Понятие виртуального полномасштабного макетирования (прототипирования) уже используется в САПР ХТС.

С помощью электронных макетов в настоящее время решаются следующие задачи:

- оценка на ранних стадиях проектирования ХТС общего вида, его дизайна и удобства для потребителя;
- компоновка (сборка) ХТС, трассировка трубопроводных и электрических коммуникаций, контроль удобства доступа к отдельным узлам технического объекта обслуживающего персонала.

Особенно интересны перспективы использования электронных макетов вместо реальных физических макетов на стадии испытания (ввода в действие) сложных ХТС. В этом направлении можно ожидать значительной экономии средств и существенного ускорения процесса создания принципиально новых химических производств. Средства электронного макетирования включают наборы трехмерных физических моделей механики, гидродинамики, тепловых процессов, электромагнитных явлений, акустики и других, представленных как в статике, так и в динамике. Они позволяют применять физические и мультифизические модели не только к отдельным элементам и узлам ХТС, но и к «сборкам» для оценки эффективности функционирования ХТС в целом как системы (например, специальные аналитические блоки известной САПР фирмы SolidWorks).

Представим наиболее известные программные продукты САПР:

**SolidWorks.** Ядро интегрированного программного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка жизненного цикла изделия в соответствии с концепцией CALS-технологий. Решаемые задачи: проектирование деталей и сборок без ограничения сложности, изделий из листового металла, сварных конструкций, оснастки; проектирование «от концепции», промышленный дизайн, сложные поверхности, проверка сборок на «собираемость»; выпуск чертежей в соответствии с требованиями ЕСКД.

**IPD.Plan, IPD.Log.** Платформа IPD.Log является программным инструментом, при помощи которого можно в интерактивном режиме синхронизировать работу поточных линий и сборочных станций. IPD.Log работает на основе макета цеха и изображает результаты с помощью трехмерной CAD-модели.

**Unigraphics NX.** САПР высокого уровня, предназначенная для решения всего комплекса задач, стоящих перед инженерами на этапах создания сложных ХТС (предварительное проектирование, этап инженерного анализа и оптимизации конструкции, изготовление).

**Project Expert.** Программа позволяющая «прожить» планируемые инвестиционные решения без потери финансовых средств, предоставить необходимую финансовую отчетность потенциальным инвесторам и кредиторам, обосновать для них эффективность участия в проекте.

**AutoCAD.** Универсальная система для выполнения графических работ, довольно часто принимаемая в качестве базиса для создания САПР (разработана американской фирмой Autodesk). В среде системы пользователь может подготавливать и выпускать конструкторскую и технологическую документацию в электронном виде, изображать детали машин, создавать плоские, двумерные графические объекты, трехмерные проволочные, каркасные и твердотельные модели реальных объектов, описывать поведение графических объектов во времени посредством демонстрации слайд-фильмов. Сетевые версии AutoCAD поддерживают совместную работу над проектом нескольких участников, взаимодействующих через сеть Internet.

Традиционно базовым языком программирования приложений AutoCAD является AutoLisp, в последних версиях AutoCAD появилась возможность обращения к интегрированным средам разработки программ на языках Visual AutoLisp и Visual Basic for Application и соответственно, написания на них AutoCAD-приложений.

AutoCAD является наиболее распространенной САПР в мире. На современном этапе включает в себя полный набор средств, обеспечивающих комплексное трехмерное моделирование, в том числе работу с произвольными формами, создание и редактирование 3D-моделей тел и поверхностей, улучшенную 3D-навигацию и эффективные средства выпуска рабочей документации. Начиная с версии 2010, в **AutoCAD** реализована поддержка параметрического черчения.

**КОМПАС-3D.** Система трехмерного моделирования, ставшая стандартом для тысяч предприятий, благодаря удачному сочетанию простоты освоения и легкости работы с мощными функциональными возможностями твердотельного и поверхностного моделирования, которые решают все основные задачи пользователей.

Ключевой особенностью продукта является использование собственного математического ядра и параметрических технологий, разработанных специалистами АСКОН.

Основные компоненты КОМПАС-3D – собственно система трехмерного твердотельного моделирования, универсальная система автоматизированного проектирования КОМПАС-График и модуль проектирования спецификаций. Все они легки в освоении, имеют русскоязычные интерфейс и справочную систему.

Система КОМПАС-3D имеет возможность оформления проектной и конструкторской документации, согласно стандартам серии ЕСКД и СПДС.

**T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM.** Программные решения для электронного документооборота (PDM), САПР, подготовки производства и управленческой деятельности на предприятии, подготовки программ для станков с ЧПУ.

Единый комплекс T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM включает в себя T-FLEX DOCs – PLM-комплекс для решения задач конструкторско-технологического документооборота, организационно-распорядительного документооборота и комплексного управления инженерными данными предприятия, T-FLEX CAD – система автоматизации черчения, параметрического проектирования и трехмерного параметрического твердотельного и поверхностного моделирования. Программа T-FLEX CAD 3D также содержит в себе полный набор средств параметрического 2D-проектирования, 3D-моделирования, оформления чертежей и конструкторской документации в полном соответствии с ЕСКД. САПР T-FLEX CAD 3D построена на геометрическом ядре Parasolid, которое сегодня считается лучшим ядром для 3D-моделирования. На сегодняшний день системы на Parasolid установлены на более чем 1 000 000 рабочих мест по всему миру. T-FLEX Технология – система для автоматизации технологической подготовки производства, T-FLEX Нормирование – нормирование технологических процессов. Также сюда включаются расчетные инженерные системы: T-FLEX Анализ – система конечно-элементного анализа изделий, T-FLEX Динамика – система динамического анализа механических систем, T-FLEX Расчеты / Зубчатые передачи – система проектирования зубчатых передач, T-FLEX Пружины – система проектирования пружин и др.

**APM WinMachine.** CAD/CAE система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения, разработанная с учетом последних достижений в вычислительной математике, области численных методов и программирования, а также теоретических и экспериментальных инженерных решений. Эта система в полном объеме учитывает требования государственных стандартов и правил, относящихся как к оформлению конструкторской документации, так и к расчетным алгоритмам.

APM WinMachine обладает широкими функциональными возможностями для создания моделей конструкций, выполнения необходимых расчетов и визуализации полученных результатов. Использование этих возможностей позволит сократить сроки проектирования и снизить материалоемкость конструкций, а также уменьшить стоимость проектных работ и производства в целом.

«ПАССАТ» (разработана российской фирмой – НТП «Трубопровод»). Программа предназначена для расчета прочности и устойчивости сосудов, аппаратов и их элементов с целью оценки несущей способности в рабочих условиях, а также в условиях испытаний и монтажа. Программа состоит из ядра – базового модуля «ПАССАТ», который осуществляет расчет прочности и устойчивости горизонтальных и вертикальных сосудов и аппаратов по отечественным нормативным документам. Расчет на прочность и устойчивость аппаратов колонного типа с учетом ветровых нагрузок и сейсмических воздействий осуществляется

с помощью модуля «ПАССАТ-Колонны». Расчет кожухотрубчатых теплообменных аппаратов (ТА), включающий в себя расчет трубных решеток, труб, перегородок, кожуха, компенсатора, расширителя, плавающей головки проводится с помощью модуля «ПАССАТ-Теплообменники».

Дополнительной функцией является расчет штуцера в обечайки и выпуклые днища, а также соединений арматурных фланцев от воздействия давления и внешних нагрузок по зарубежным документам (модуль «ПАССАТ-Штуцер»).

Удобный графический интерфейс с трехмерным отображением позволяет проверять правильность ввода геометрических характеристик как отдельных элементов, так и всей модели в целом.

**ANSYS.** Универсальная программная система конечно-элементного анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в области компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Система работает на основе геометрического ядра Parasolid.

Программная система КЭ анализа ANSYS разрабатывается американской компанией ANSYS Inc. Предлагаемые фирмой ANSYS Inc средства численного моделирования и анализа совместимы с некоторыми другими пакетами, работают на различных ОС. Программная система ANSYS сопрягается с известными CAD-системами Unigraphics, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor и некоторыми другими.

Программная система ANSYS является довольно известной CAE-системой, которая используется на таких известных предприятиях, как ABB, BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon, FIAT, Ford, General Electric, Lockheed Martin, MeyerWerft, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi и других, а также применяется на многих высокотехнологичных предприятиях Российской Федерации.

**Aspen Plus.** Программа представляет собой высокоэффективную компьютерную систему, позволяющую инженерам быстро производить моделирование ХТС и анализировать полученные результаты – благодаря новейшему программному обеспечению и промышленным технологиям, обеспечивающим оптимизацию производительности и рентабельности химических производств.

Компания AspenTech является ведущим поставщиком программного обеспечения для оптимизации технологических процессов в нефтегазовой, химической и фармацевтической промышленности, проектировании и строительстве, а также других отраслях, в которых для производства конечной продукции применяются химические процессы. Простая в использовании и гибкая система для

разработки технологии и аппаратурного оформления процессов химической технологии, оптимизации работы ХТС.

Aspen Plus является частью семейства Aspen Engineering Suite – интегрированного набора программных продуктов, разработанного специально для внедрения лучшего инженерного опыта, а также в целях оптимизации и автоматизации инновационного технологического процесса на уровне отдельной ХТС. Кроме того, данное решение обеспечивает интеграцию моделей процесса и баз данных инженерных знаний, анализа капиталовложений, оптимизации производства и других разнообразных бизнес-процессов. Aspen Plus содержит данные, свойства, модели работы ХТС, настройки по умолчанию, отчеты и другие характеристики и возможности, разработанные специально для промышленных приложений.

**ChemCAD.** Программный пакет, разработанный фирмой ChemStations, Inc. Представленный пакет включает средства статического моделирования основных процессов, основанных на фазовых и химических превращениях, а также средства для расчета геометрических размеров и конструктивных характеристик технических объектов.

Пакет представляет собой эффективный инструмент для компьютерного моделирования процессов химической технологии при разработке, модернизации и оптимизации химических и нефтехимических производств.

ChemCAD позволяет решать задачи расчетно-технологического проектирования ХТП и разработки технологического регламента для произвольного процесса химической технологии.

ChemCAD – это пакет программ для моделирования и расчета технологических схем с рециклическими потоками органических и неорганических веществ и непрерывных смесей, а также энергетических потоков.

ChemCAD позволяет создавать, анализировать и оптимизировать различные варианты технологического оформления сложных ХТС, оценивать их эффективность и выбирать наилучший из них.

Следует особо подчеркнуть, что универсальные коммерческие пакеты ANSYS и FemLab служат важной инструментальной базой для компьютерного моделирования статических и динамических режимов функционирования большинства ХТС, математические модели которых представляют различные дифференциальные уравнения с частными производными.

### 7.3.1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

Техническое обеспечение (ТО) САПР включает в себя различные технические средства, используемые для выполнения проектных работ, а именно: ЭВМ, периферийные устройства, сетевое оборудование, а также оборудование некоторых вспомогательных систем (например, измерительных), поддерживающих автоматизированное проектирование.

Технические средства должны обеспечивать:

- 1) выполнение всех необходимых проектных процедур, для которых имеется соответствующее программное обеспечение;
- 2) взаимодействие между проектировщиками и ЭВМ, поддержку интерактивного режима работы;
- 3) взаимодействие между членами коллектива, выполняющими последовательно-параллельно и итерационно работу над общим проектом.

В результате общая структура технического обеспечения САПР представляет собой сеть узлов, связанных между собой средой передачи данных. Узлами (станциями данных) являются рабочие места проектировщиков, называемые автоматизированными рабочими местами (АРМ) или рабочими станциями, которыми могут быть большие ЭВМ, отдельные периферийные или измерительные устройства. Именно в АРМ должны быть снабжены средствами для интерфейса проектировщика с ЭВМ. Среда передачи данных представлена каналами передачи данных, состоящими из линий связи и коммутационного оборудования.

В САПР небольших проектных организаций, насчитывающих не более единиц-десятков компьютеров, которые размещены на малых расстояниях один от другого, объединяющая компьютеры сеть является локальной. Локальная вычислительная сеть имеет линию связи, к которой подключаются все узлы сети. При этом топология соединений узлов может быть шинная, кольцевая, звездная.

В более крупных по масштабам проектных организациях в сеть включены десятки-сотни и более компьютеров, относящихся к разным проектным и управленческим подразделениям и размещенных в помещениях одного или нескольких зданий. Такую сеть называют корпоративной. В ее структуре можно выделить ряд локальных вычислительных сетей, называемых подсетями, и средства связи между ними.

Для многих корпоративных сетей возможность выхода в Internet является желательной не только для обеспечения взаимосвязи удаленных сотрудников собственной организации, но и для получения других информационных услуг. Развитие виртуальных предприятий, работающих на основе CALS-технологий, подразумевает информационные обмены через территориальные сети, как правило, через Internet.

В типичной структуре крупных корпоративных сетей САПР, называемых клиент-серверами, выделяется один или несколько серверов, которые выполняют в сети управляющие или общие для многих пользователей проектные функции. Остальные узлы (рабочие места) являются терминальными и на них работают пользователи. В общем случае сервером называют совокупность программных средств, ориентированных на выполнение определенных функций. Сети клиент-сервер различают по характеру распределения функций между серверами; другими словами, их классифицируют по типам серверов. Различают файл-серверы для хранения файлов, разделяемых многими пользователями, серверы баз данных автоматизированной системы, серверы приложений для решения конкретных прикладных задач, коммутационные серверы для взаимосвязи сетей и подсетей, специализированные серверы для выполнения определенных телекоммуникационных услуг, например, серверы электронной почты.

АРМ создают, как правило, на базе рабочих станций или персональных компьютеров с типичным составом устройств: ЭВМ с одним или несколькими микропроцессорами, внешней, оперативной и кэш-памятью и шинами, служащими для взаимной связи устройств; устройств ввода-вывода, включающие в себя, как минимум, клавиатуру, мышь, дисплей; дополнительно в состав АРМ могут входить принтер, сканер, плоттер, дигитайзер и другие периферийные устройства.

Рабочие станции по сравнению с персональными компьютерами представляют собой вычислительную систему, ориентированную на выполнение определенных функций. Специализация обеспечивается как набором программ, так и аппаратно за счет использования дополнительных специализированных процессоров. Так, в САПР в машиностроении преимущественно применяют графические рабочие станции для выполнения процедур геометрического моделирования и машинной графики, что требует мощного процессора, высокоскоростной шины, памяти достаточно большой емкости.

Высокая производительность процессора необходима по той причине, что графические операции (например, перемещение изображений, их повороты, удаление скрытых линий и др.) часто выполняются по отношению ко всем элементам изображения. Такими элементами в трехмерной (3D) графике при аппроксимации поверхностей полигональными сетками являются многоугольники, их число может превышать  $10^4$ . С другой стороны, для удобства работы проектировщика в интерактивном режиме задержка при выполнении указанных выше операций не должна превышать нескольких секунд. Но поскольку каждая такая операция по отношению к каждому многоугольнику реализуется большим числом машинных команд, требуемое быстродействие составляет десятки миллионов машинных операций в секунду. Такое быстродействие при приемлемой цене достигается применением наряду с основным универсальным процессором также дополнительных специализированных (графических) процессоров, в которых определенные графические операции реализуются аппаратно.

В наиболее мощных рабочих станциях в качестве основных обычно используют высокопроизводительные микропроцессоры с сокращенной системой команд (с RISC-архитектурой), работающие под управлением одной из разновидностей операционной системы Unix. В менее мощных все чаще используют технологию Wintel (т.е. микропроцессоры Intel и операционные системы Windows). Графические процессоры выполняют такие операции, как, например, растеризация – представление изображения в растровой форме для ее визуализации, перемещение, вращение, масштабирование, удаление скрытых линий и т.п.

В АРМ конструкторах (графических рабочих станциях) используются растровые мониторы с цветными трубками. Типичные значения характеристик мониторов находятся в следующих пределах: размер экрана по диагонали 17...24 дюйма (фактически изображение занимает площадь на 5...8% меньше, чем указывается в паспортных данных). Разрешающая способность монитора, т.е. число различ-

мых пикселей (отдельных точек, из которых состоит изображение), определяется шагом между отверстиями в маске, через которые проходит к экрану электронный луч в электронно-лучевой трубке. Этот шаг находится в пределах 0,21...0,28 мм, что соответствует количеству пикселей изображения от 800×600 до 1920×1200 и более. Чем выше разрешающая способность, тем шире должна быть полоса пропускания электронных блоков видеосистемы при одинаковой частоте кадровой развертки. Полоса пропускания видеоусилителя находится в пределах 110...150 МГц и поэтому частота кадровой развертки обычно снижается с 135 Гц для разрешения 640×480 до 60 Гц для разрешения 1600×1200. Отметим, что чем ниже частота кадровой развертки, а это есть частота регенерации изображения, тем заметнее мерцание экрана. Желательно, чтобы эта частота была не ниже 75 Гц.

Специально выпускаемые ЭВМ как серверы высокой производительности обычно имеют структуру симметричной многопроцессорной вычислительной системы. В них системная память разделяется между всеми процессорами, каждый процессор может иметь свою сверхоперативную память сравнительно небольшой емкости, число процессоров невелико (единицы, редко более десяти).

Для ввода графической информации с имеющихся документов в САПР используют дигитайзеры и сканеры. Дигитайзер применяют для ручного ввода. Он имеет вид кульмана, по его электронной доске перемещается курсор, на котором расположен визир и кнопочная панель. Курсор имеет электромагнитную связь с сеткой проводников в электронной доске. При нажатии кнопки в некоторой позиции курсора происходит занесение в память информации о координатах этой позиции. Таким образом может осуществляться ручная «сколка» чертежей.

Для автоматического ввода информации с имеющихся текстовых или графических документов используют сканеры планшетного или протяжного типа. Способ считывания – оптический. В сканирующей головке размещаются оптоволоконные самофиксирующиеся линзы и фотоэлементы. Разрешающая способность в разных моделях составляет от 300 до 800 точек на дюйм. Считанная информация имеет растровую форму, программное обеспечение сканера представляет ее в одном из стандартных форматов, например, TIFF, GIF, PCX, JPEG, и для дальнейшей обработки может выполнить векторизацию – перевод графической информации в векторную форму, например, в формат DFX.

Для вывода информации применяют принтеры и плоттеры. Первые из них ориентированы на получение документов малого формата (A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>), вторые – для вывода графической информации на широкоформатные носители.

В этих устройствах преимущественно используется растровый (т.е. построчный) способ вывода со струйной технологией печати. Печатающая система в струйных устройствах включает в себя картридж и головку. Картридж – баллон, заполненный чернилами (в цветных устройствах имеется несколько картриджей, каждый с чернилами своего цвета). Головка – матрица из сопел, из которых мельчайшие чернильные капли поступают на носитель. Физический прин-

цип действия головки термической или пьезоэлектрической. При термопечати выбрасывание капель из сопла происходит под действием его нагревания, что вызывает образование пара и выбрасывание капелек под давлением. При пьезоэлектрическом способе пропускание тока через пьезоэлемент приводит к изменению размера сопла и выбрасыванию капли чернил. Второй способ дороже, но позволяет получить более высококачественное изображение.

Типичная разрешающая способность принтеров и плоттеров 300 dpi, в настоящее время она повышена до 720 dpi. В современных устройствах управление осуществляется встроенными микропроцессорами. Типичное время вывода монохромного изображения формата A<sub>1</sub> находится в пределах 2...7 мин, цветного – в два раза больше.

Дигитайзеры, сканеры, принтеры, плоттеры могут входить в состав АРМ или разделяться пользователями нескольких рабочих станций в составе локальной вычислительной сети.

### 7.3.2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

Одним из условий успешного функционирования САПР является наличие необходимой информации и, в частности, данных, характеризующих сырье, целевые продукты, энергетику, экономику и т.д. Причем точность этих данных имеет решающее значение для определения оптимальных параметров проектируемой ХТС. Совокупность данных, характеризующих проектируемую ХТС (физико-химические, термодинамические свойства веществ, конструктивные параметры и показатели эффективности машин, аппаратов, агрегатов, технологических линий и процессов химической технологии) составляют информационную базу САПР.

Основными данными при решении задач технологического проектирования и оптимизации являются физико-химические и теплофизические данные. Они обычно представляются в трех формах – в виде таблиц, диаграмм и уравнений. Наиболее распространенным способом является аналитическое представление, допускающее непосредственный расчет соответствующих параметров при заданных входных условиях. В пищевых технологиях к наиболее распространенным данным обычно относятся: давление пара, теплота испарения, удельная теплоемкость, плотность, теплопроводность, вязкость, теплота реакций, поверхностное натяжение, фазовое равновесие (жидкость – пар, жидкость – жидкость, жидкость – жидкость – пар, жидкость – твердое вещество, твердое вещество – пар, растворимость), кинетические данные и т.д. Ясно, что эти данные необходимы в требуемом диапазоне по температуре и давлению.

Имеется два источника для создания информационной базы САПР. Это экспериментальные и расчетные данные. По степени достоверности предпочтение отдается экспериментальным данным, особенно если эксперимент проводится целенаправленно, т.е. с учетом области применения результата. Использование литературных данных по свойствам не всегда представляется возможным из-за специфических условий проведения эксперимента и ограниченности интервала

по температуре, давлению, составу и другим параметрам. К тому же часто отсутствует достоверная информация о точности публикуемых данных.

Расчет также не всегда обеспечивает требуемую точность, но часто является единственным способом пополнения данных. В настоящее время имеется большое число методов для определения отдельных свойств веществ, однако выбор соответствующего метода сопряжен с рядом трудностей, поскольку большинству из них свойственны следующие недостатки:

1. Низкая точность.

2. Ориентация на традиционный расчет и использование номограмм, таблиц и графиков для определения свойств веществ. Номограммы и таблицы не только снижают точность методов, но и затрудняют компьютерную реализацию.

3. Узость области применения по классу веществ и диапазону изменения параметров. Это приводит к тому, что одно и то же свойство нужно рассчитывать по различным формулам в зависимости от вещества и интервала изменения параметров. Такие методы не только сложны в применении, но и не обеспечивают непрерывности зависимости свойств от параметров.

4. Невозможность экстраполяции функциональной зависимости за область определения параметров.

5. Термодинамическая несовместимость методов.

Определение физико-химических, теплофизических и других свойств веществ должно проводиться на единой методологической основе, включая экспериментальные и расчетные методы с учетом области применения данных. При разработке новых технологических процессов потребуются вещества, свойства которых в литературных источниках практически отсутствуют. Это относится к альтернативным сырьевым источникам, синтетическим топливам, продуктам биотехнологии и т.д., представляющим собой сложные гомогенные и гетерогенные системы. В методологическом аспекте определение свойств веществ и соединений должно базироваться на интеграции лабораторных измерений свойств тщательно отобранных систем, критической оценки получаемых данных и теоретических исследований для получения расчетных методов, обладающих прогнозирующими характеристиками. Прогнозирующие алгоритмы, оформленные в виде комплексов программ, становятся все более предпочтительным методом получения данных о свойствах. Интенсивное развитие также получают экспериментальные методы в рамках автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). АСНИ, по существу, выполняют функции сбора, накопления и обработки экспериментальных данных для САПР. Тем более, что большинство зависимостей для определения свойств можно применять лишь при наличии определенного набора экспериментальных данных. Это, например, фазовое равновесие, транспортные свойства неньютоновских жидкостей при высоких температурах, полидисперсные системы, межфазный перенос и т.д.

Организационно получение и накопление данных целесообразно оформить в виде группы или лаборатории, в функции которой входит следующее: литературный поиск данных, разработка расчетных методов получения данных, разработка экспериментальных методов получения данных, их оценка.

### 7.3.3. ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

1. CASE-технология в широком смысле представляет собой совокупность методологий анализа, автоматического проектирования, разработки и сопровождения программного обеспечения технических объектов [39]. Аббревиатура CASE используется для двух направлений проектирования систем. Первое – Computer Aided System Engineering – направлено на решение задач концептуального проектирования сложных слабоструктурированных систем. CASE-технологии этого направления называют системами CASE для концептуального проектирования. Второе направление – Computer Aided Software Engineering – решает задачи автоматизированного проектирования программного обеспечения. Эти CASE-системы называют или инструментальными средами разработки ПО (инструментальными CASE-системами).

Среди систем CASE первого направления выделяют системы функционального и информационного (поведенческого) проектирования. Наиболее распространенной методикой функционального проектирования сложных систем является методика SADT (Structured Analysis and Design Technique). Эта методика стала основой стандарта IDEF0 (Integrated Definition 0). Программные средства информационного проектирования реализуют методики инфологического проектирования баз данных. Широкое распространение получила методика создания информационных моделей IDEF1X. Применение инструментальных CASE-систем позволяет сократить затраты на разработку ПО за счет уменьшения числа итераций и числа ошибок, а также улучшить качество ПО вследствие лучшего взаимопонимания разработчика и заказчика. При этом облегчается сопровождение готового программного продукта.

CASE-средства представляют собой программные продукты, используемые как для автоматизированной разработки определенных видов моделей, например, функциональных, информационных, так и для автоматизированного создания программного обеспечения технических объектов. В последнем случае CASE-средства поддерживают все этапы проектирования прикладного программного обеспечения и баз данных от формулировки требований до генерации кода, тестирования документирования и сопровождения в процессе эксплуатации.

С позиции решения задач моделирования CASE-технологии широко применяются для моделирования технических систем. Исключительно большое значение CASE-технологии имеют для разработки моделей технических объектов, в частности функциональных и информационных, которые необходимы для решения задач системного анализа, проектирования, реинжиниринга и др.

Большинство CASE-средств основано на парадигме методология – метод – нотация – средство. Методология определяет руководящие указания для оценки и выбора проекта разрабатываемого ПО, шаги работы и их последовательность, а также правила распределения и назначения методов. Метод – это систематическая процедура или техника генерации описаний компонент ПО, например, проектирование потоков и структур данных. Нотация представляет собой формат опи-

сания структуры системы, элементов данных, этапов обработки; нотации обычно включают графы, диаграммы, таблицы, блок-схемы, формальные и естественные языки. Средства – инструментарий для поддержки и усиления методов, они поддерживают работу пользователей при создании и редактировании графической части проекта в интерактивном режиме, способствуют организации проекта в виде иерархии уровней абстракции, выполняют проверки соответствия компонентов.

Основными достоинствами CASE-технологий для моделирования технических объектов являются следующие:

- значительно сокращается время на разработку моделей;
- исследователь (разработчик, проектировщик) освобождается от рутинной работы, связанной с оформлением, представлением и хранением результатов моделирования за счет автоматизации соответствующих процессов, это позволяет ему основное внимание уделять творческой части разработки;
- разрабатываемые модели соответствуют действующим нормативным документам, их описание пригодно для широкого использования без дополнительных пояснений;
- улучшается качество создаваемых моделей за счет средств автоматического контроля;
- автоматизирован процесс развития и сопровождения результатов моделирования.

Современные CASE-системы характеризуются следующими особенностями:

1. Единство графического языка описания проекта. Все участники проекта, использующие CASE-технологии, обеспечиваются единым, наглядным и понятным графическим языком, в соответствии с которым документация представляется двумерными схемами. Это позволяет заказчику и разработчикам, в том числе экспертам предметной области, системным аналитикам, программистам и другим участникам проекта быстро вносить необходимые изменения и облегчает выполнение проекта, сопровождение систем при эксплуатации.

2. Единство базы данных проекта, которая составляет основу CASE-технологии. База данных (репозиторий) содержит всю информацию о выполняемом и предыдущих проектах. Она включает информационные объекты различных типов, отношения между их компонентами, правила использования и обработки этих компонентов. В репозитории хранятся объекты самых различных типов, в том числе структурные диаграммы, описания и модели данных, отчеты проектов, исходные коды и т.п.

3. Интеграция всех используемых средств и разделение системной информации между участниками проекта в соответствии с правами доступа. CASE-средства предусматривают несколько уровней интеграции, которые охватывают общий пользовательский интерфейс, передачу данных между средствами, интеграцию этапов, разработку через единую систему представления стадий жизненного цикла проекта, а также передачу данных между различными платформами компьютерных систем.

4. Поддержка коллективной работы над проектом и управление проектом. CASE-средства обеспечивают возможность работы в режиме удаленного доступа, выполнять экспорт-импорт фрагментов проекта по сети для их развития или модификации, планирование, контроль и обеспечение безопасности и руководство проектом.

5. Автоматическая генерация документации по проекту – документация выполняется в соответствии с требованиями действующих стандартов и всегда соответствует текущему состоянию дел, так как любые изменения в проекте автоматически без запаздывания отражаются в репозитории.

6. Возможность макетирования разрабатываемой системы – позволяет заказчику на ранних стадиях жизненного цикла проекта оценить эффективность системы при реальной эксплуатации.

7. Автоматическая генерация программного кода – позволяет построить до 80...90% текстов на языках высокого уровня в автоматическом режиме.

8. Автоматическая верификация и контроль проекта на полноту и состоятельность на ранних этапах разработки, благодаря чему снижается риск неудачного завершения работ и повышается конкурентоспособность создаваемого изделия.

9. Сопровождение проекта и реинжиниринг модели технического объекта – позволяет интегрировать получаемые модели в проект, автоматически обновлять документацию при изменении кодов и изменять спецификации при редактировании кодов.

Разработка любой сложной технической, в том числе программной, системы должна начинаться с функционального анализа и моделирования технического объекта в целом и всех его подсистем вплоть до неделимых элементов. Для этой цели разработана методология IDEF0, представляющая собой совокупность методов, правил и процедур, предназначенных для построения функциональной структуры сложных иерархических объектов.

Необходимым инструментом совершенствования сложных технических объектов является функциональное моделирование бизнес-процессов.

Под бизнес-процессом понимается совокупность взаимосвязанных последовательно или параллельно выполняемых операций (действий), которая преобразует материальные или информационные потоки (вход процесса) в соответствующие потоки с другими свойствами (выход процесса). Бизнес-процесс протекает в соответствии с управляющими директивами (командами), вырабатываемыми на основе целей деятельности. В ходе выполнения бизнес-процесса потребляются ресурсы (материальные, энергетические, трудовые, финансовые) и выполняются ограничения со стороны других процессов, а также внешней среды. Основная цель процесса – добавление ценности продукта при минимальных затратах.

Предполагается, что бизнес-процессы одного подразделения объединены общей задачей, заключающейся в оказании услуг друг другу, например, в виде изготовления и поставки продукта. При этом оказание услуг осуществляется согласно единой процедуре.

Функциональная модель бизнес-процессов представляет собой многоуровневую систему взаимосвязанных диаграмм, содержащую полное описание процессов жизненного цикла продукта, с выделением узлов действий (блоков), входов, выходов, управлений (условий) и требуемых механизмов (ресурсов).

Каждый узел характеризует действие (процесс, работу, функцию, операцию) по переработке информационных или материальных ресурсов и обозначается прямоугольником. Вход представляет собой то, что перерабатывается процессом (стрелка слева прямоугольника), а выход – результат переработки (стрелка справа). Управлением служит информация, необходимая для выполнения процесса (стрелка сверху). Механизмы обеспечивают выполнение (реализацию) процесса, т.е. оборудование, персонал и т.д.

Построение и вид функциональной модели бизнес-процессов регламентируются на международном уровне федеральными рекомендациями FIPS PUB 183 (США) и стандартом IDEF0. В них описывается метод (язык), правила и методика структурированного графического описания бизнес-процессов.

В отличие от простейших математических функций, использующих в качестве переменных только числовые величины, в объект-функциях могут использоваться кроме числовых и нечисловые переменные. Все стрелки в диаграммах IDEF0 получают стрелочными надписями, в качестве которых могут использоваться идентификаторы или наименования переменных.

С точки зрения ИИ диаграмма в среде IDEF0 представляет собой семантическую сеть, т.е. граф с помеченными вершинами (объект-функциями) и ребрами. С математической точки зрения такая диаграмма эквивалентна сложной функции

$$Y = \Phi(F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_k(X_k)).$$

При построении функциональной модели сложного технического объекта используется метод декомпозиции, т.е. сначала описывается общее действие получения продукта (нулевой уровень), затем общее действие раскладывается на несколько основных крупных действий (первый уровень), далее каждое крупное действие описывается с помощью более мелких операций (второй уровень) и т.д. Соответственно раскладываются управления и механизмы при переходе от крупных структур к более мелким.

Важной особенностью функционального моделирования бизнес-процессов является то, что описание строится вокруг действий, а не вокруг организационной структуры. Функциональная модель показывает непосредственных участников бизнес-процессов, элементы оргструктуры предприятия, задействованные в получении продукции, наглядно представляют работы, выполняемые различными подразделениями, и оборудование.

Представление информационных структур и данных, используемых в функциональной модели, описывается и графически изображается с помощью информационной модели, которая отражает структуру баз данных и информационные потоки с позиций семантики, т.е. описании данных в контексте их взаимосвязи с другими данными. Конструктивными элементами этой модели являются

сущности, изображаемые блоками, отношения между сущностями, которые обозначаются линиями, соединяющими блоки, и атрибуты (имена внутри блоков).

Например, основными сущностями в информационной модели процессов проектирования ХТС являются модель динамики объекта, минимизируемый функционал, накладываемые ограничения и связи, стратегия реализации оптимального управления.

Построение информационной модели регламентируется стандартом IDEF1X (FIPS 184).

Разработанные функциональные и информационные модели могут служить основой для проектирования новых и совершенствования существующих ХТС.

CASE-системы часто отождествляют с инструментальными средами разработки программного обеспечения, называемыми средами быстрой разработки приложений (RAD – Rapid Application Development). Примерами широко известных инструментальных сред RAD являются Visual Basic, Delphi, PowerBuilder фирм Microsoft, Borland, PowerSoft соответственно. Применение инструментальных средств существенно сокращает объем ручной работы программистов, особенно при проектировании интегративных частей программ.

Большое практическое значение имеют инструментальные среды для разработки прикладных программ, предназначенных для работы под управлением операционных систем Windows, в связи с широкой распространенностью последних. Простейшая система для написания Windows-программ на языке C++ основана на использовании библиотеки Dynamic Link Library, которая содержит модули, реализующие функции Application Programming Interface для связи прикладных программ с операционной системой Windows. Эта система получила развитие в Microsoft Foundation Classes, представляющей собой библиотеку классов для автоматического создания каркасов программного обеспечения многоуровневых приложений. В библиотеке имеются средства для поддержания оконного интерфейса, работы с файлами и др. [39].

В средах быстрой разработки приложений RAD обычно реализуется способ программирования, называемый управлением событиями. При этом достигается автоматическое создание каркасов программ, существенно сокращается объем ручного кодирования. В этих средах пользователь может работать одновременно с несколькими экранами (окнами). Типичными являются окна из следующего списка:

1. Окно меню с пунктами «file», «edit», «window» и т.п., реализующими функции, очевидные из названия пунктов.
2. Окно формы, на котором собственно и создается прототип экрана будущей прикладной программы.
3. Палитра инструментов – набор изображений объектов пользовательского интерфейса, из которых можно компоновать содержимое окна формы.
4. Окно свойств и событий, с помощью которого ставятся в соответствие друг другу объекты окна формы, события и обработчики событий. Событием в прикладной программе является нажатие клавиши или установка курсора мыши в объект формы. Каждому событию должна соответствовать событийная процедура.

ра (обработчик события), которая проверяет код клавиши и вызывает нужную реакцию. В RAD имеются средства для удобства разработки обработчиков событий.

5. Окно редактора кода, в котором пользователь записывает создаваемую вручную часть кода.

6. Окно проекта – список модулей и форм в создаваемой программе.

Для написания событийных процедур в Visual Basic используется язык и текстовый редактор одноименного языка, в Delfi – язык и редактор языка Object Pascal. В CASE-системе фирмы IBM, включающей части VisualAge (для клиентских приложений) и VisualGen (для серверных приложений), базовым языком выбран SmallTalk. В среде разработки приложений клиент-сервер SQLWindows оригинальные фрагменты программ пишутся на специальном языке SAL [39].

Помимо упрощения написания пользовательского интерфейса в средах RAD предусматриваются средства для реализации и ряда других функций. Так, в наиболее развитой версии Visual Basic к ним относятся средства выполнения следующих функций:

- поддержка ODBC, что дает возможность работы с различными СУБД;
- разработка баз данных;
- разработка трехзвенных систем распределенных вычислений;
- интерактивная отладка процедур на SQL Server;
- управление версиями при групповой разработке программного обеспечения;
- моделирование и анализ сценариев распределенных вычислений.

Для создания сред в RAD в случае сетевого программирования требуется решить ряд дополнительных проблем, обусловленных многоплатформенностью в гетерогенных сетях, обилием применяемых форматов данных, необходимостью защиты информации и т.п. Решение этих проблем достигнуто в объектно-ориентированных технологиях на базе языка сетевого программирования Java. Кроме того, с помощью Java удастся решить еще одну актуальную для Internet и Intranet задачу – сделать Web-страницы интерактивными.

Платформенная инвариантность в Java достигается благодаря введению виртуальной метамшины с системой команд, максимально приближенной к особенностям большинства машинных языков. Любой Web-сервер при наличии запроса на Java-программу со стороны клиента транслирует (компилирует) эту программу на язык метамшины. Скомпилированный модуль, называемый байт-кодом, пересылается клиенту. Клиент должен выполнить интерпретацию байт-кода. Соответствующие интерпретаторы в настоящее время имеются в браузерах всех основных разработчиков Web-технологий.

Java используется двояким образом. Во-первых, как средство «оживления» Web-страниц. В этом случае программный Java-компонент называют апплетом, который встраивается в страницу с помощью специального тега, имеющегося в языке HTML. Во-вторых, Java – универсальный язык программирования и может быть использован для написания любых приложений, не обязательно привязанных к Web-технологии.

Хотя и ранее были известны технологии на базе промежуточных р-кодов, именно технология Java оказалась наилучшим образом приспособленной для использования в гетерогенной сетевой среде. Она последовательно отражает принципы объектно-ориентированного программирования и обеспечивает приемлемую эффективность (производительность) исполнения программ. Эту эффективность можно еще более повысить, если в браузерах заменить интерпретацию на компиляцию.

Для разработки программного обеспечения на языке Java создан ряд инструментальных средств. Основной средой является Java Developer's Kit, в которой имеются:

1) библиотеки классов, в том числе библиотеки основных элементов языка, часто используемых оболочек (wrapper), процедур ввода-вывода, компонентов оконного интерфейса и др.;

2) инструментальные средства такие, как компилятор байт-кодов, интерпретатор, просмотрщик апплетов, отладчик, формирователь оконных форм и т.п. Развитую RAD-среду – PowerJ – предлагает фирма Sybase.

Появление компонентно-ориентированных технологий вызвано необходимостью повышения эффективности разработки сложных программных систем, являющихся в условиях использования корпоративных и глобальных вычислительных сетей распределенными системами. Компонентно-ориентированные технологии основаны на использовании предварительно разработанных готовых компонентов.

Компиляция программ из готовых компонентов – идея не новая. Уже первые шаги в области автоматизации программирования были связаны с созданием библиотек подпрограмм. Конечно, для объединения этих подпрограмм в конкретные прикладные программы требовалась ручная разработка значительной части программного кода на языках третьего поколения. Упрощение и ускорение разработки прикладного программного обеспечения достигается с помощью языков четвертого поколения (4GL), но имеющиеся системы на их основе являются специализированными и не претендуют на взаимодействие друг с другом.

Современные системы интеграции программного обеспечения построены на базе объектной методологии.

Выше приведены примеры библиотек классов, применяя которые прикладные программисты могут создавать subclasses в соответствии с возможностями наследования, заложенными в используемые объектно-ориентированные языки программирования. При этом интероперабельность компонентов в сетевых технологиях достигается с помощью механизмов, подобных удаленному вызову процедур RPC.

Преимущества использования готовых компонентов обусловлены тщательной обработкой многократно используемых компонентов, их соответствием стандартам, использованием лучших из известных методов и алгоритмов.

В то же время в компонентах библиотек классов спецификации интерфейсов не отделены от собственно кода, следовательно, использование библиотек клас-

сов непрофессиональными программистами проблематично. Именно стремление устранить этот недостаток привело к появлению компонентно-ориентированных технологий разработки программного обеспечения.

Возможны два способа включения компонентов (модулей) в прикладную программу – модернизация (reengineering) или инкапсуляция (wrapping).

Модернизация требует знания содержимого компонента, интероперабельность достигается внесением изменений собственно в сам модуль. Такой способ можно назвать способом «белого ящика». Очевидно, что модернизация не может выполняться полностью автоматически, требуется участие профессионального программиста.

Инкапсуляция выполняется включением модуля в среду с помощью интерфейса – его внешнего окружения (оболочки – wrapper). При этом компонент рассматривается как «черный ящик»: спецификации, определяющие интерфейс, выделены из модуля, а детали внутреннего содержимого скрыты от пользователя. Обычно компоненты поставляются в готовом для использования виде скомпилированного двоичного кода. Обращения к модулю возможны только через его интерфейс. В спецификации интерфейса включаются необходимые для интероперабельности сведения о характеристиках модуля – модульная абстракция. В состав этих сведений могут входить описания всех входных и выходных для модуля данных, структура командной строки для инициализации процедур, сведения о требуемых ресурсах.

Компонентно-ориентированные системы построены на основе инкапсуляции компонентов. В архитектуре этих систем можно выделить следующие части:

- 1) прикладная программа (клиент), создаваемая для удовлетворения возникшей текущей потребности;
- 2) посредник (брокер или менеджер), служащий для установления связи между взаимодействующими компонентами и для согласования их интерфейсных данных;
- 3) множество компонентов, состоящих каждый из программного модуля (объекта), реализующего некоторую полезную функцию, и оболочки (интерфейса).

В спецификации интерфейса могут быть указаны характеристики модуля, реализуемые методы и связанные с модулем события.

Собственно интерфейс представляет собой обращения к функциям модуля, называемым в CBD-технологиях методами. Эти обращения переводятся в двоичный код, что обеспечивает при их использовании независимость от языка программирования. Один и тот же модуль может реализовывать несколько разных функций, поэтому у него может быть несколько интерфейсов или методов. Каждый новый создаваемый интерфейс обеспечивает доступ к новой функции и не отменяет прежние возможно еще используемые интерфейсы.

Схематично взаимодействие компонентов можно представить следующим образом. Клиент обращается с запросом, выраженным на языке IDL, на выполнение некоторой процедуры. Запрос направляется менеджеру. В менеджере имеется предварительно сформированный каталог (реестр или репозиторий) интерфейсов

процедур с указанием компонентов-исполнителей. Менеджер перенаправляет запрос соответствующему исполнителю. Исполнитель может запросить параметры процедуры. После выполнения процедуры полученные результаты возвращаются клиенту.

В большинстве случаев реализуется синхронный режим работы, заключающийся в приостановке процесса клиента после выдачи запроса до получения ответа.

Наиболее популярными в настоящее время являются следующие CBD-технологии [39]:

OpenDoc – технология, основанная на спецификациях CORBA, разработанных в начале 90-х гг. XX в. В OpenDoc реализуется технология распределенных вычислений на базе программ-посредников ORB.

Common Object Model – технология, развиваемая корпорацией Microsoft на базе механизмов OLE. Сетевой вариант этой технологии (для распределенных вычислений) известен под названием DCOM (в частности, объекты, которые можно вставлять в HTML-документы или к которым можно обращаться из Web-браузеров) известны под названием компонентов ActiveX. В COM/DCOM, как и в OpenDoc, можно использовать компоненты, написанные на разных объектно-ориентированных языках программирования. Но в отличие от OpenDoc в COM/DCOM остается естественная для Microsoft ориентация только на операционные системы Windows (реализация DCOM предусмотрена в ОС Windows NT 4.0). Технология ActiveX обеспечивает интерфейс для управления объектами одного приложения из другого. В общем плане ActiveX – технология интеграции программного обеспечения фирмы Microsoft. Например, используя эту технологию, можно в среде VBA организовать доступ к объектам AutoCAD.

JavaBeans – сравнительно новая технология, в которой используются компоненты, написанные на языке Java.

Основные идеи компонентно-ориентированной (объектной) технологии с созданием расширенных специализированных библиотек компонентов реализованы в системе CAS.CADE (Computer Aided Software / Computer Aided Design Engineering) фирмы Matra Datavision. Система CAS.CADE состоит из нескольких частей. Основными частями являются библиотеки классов и инструментальная среда для создания программного обеспечения технических и научных приложений.

Библиотеки (Object Libraries) в CAS.CADE представляют собой специализированные наборы заранее разработанных компонентов на языке C++. Совокупность библиотек имеет иерархическую структуру. Базовые компоненты соответствуют классам объектной методологии. Примерами компонентов являются строки, списки, точки, матрицы, линии, поверхности, деревья, решатели уравнений, операторы сортировки, поиска на графах и т.п. Классы группируются в пакеты, пакеты – в наборы, наборы – в домены.

В CAS.CADE выделено несколько библиотек. Во-первых, это библиотеки 2D- и 3D-моделирования, включающие компоненты для определения, создания и

манипулирования геометрическими моделями. Во-вторых, ряд библиотек предназначен для связи с ОС и управления данными, обмена с внешними CAD системами, создания сеточных моделей и др. Необходимо отметить, что основные приложения, на которые ориентирована CAS.CADE, – это приложения машинной графики и геометрического моделирования, поэтому в системе наиболее развиты библиотеки графических и геометрических компонентов.

С помощью CAS.CADE создают специализированные САПР при сравнительно малых затратах времени и средств.

\* \* \*

Компьютерные технологии моделирования позволяют, таким образом, в ходе проектирования, расчета и конструирования ХТС оценить качество проекта, не прибегая к изготовлению экспериментальных образцов, что позволяет ускорить процесс совершенствования разработки ХТС до требований, предъявляемых заказчиком.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите источники неопределенности при проектировании ХТС.
2. Сформулируйте одноэтапную задачу интегрированного проектирования с жесткими ограничениями в условиях неопределенности. Запишите дискретный аналог этой задачи.
3. Запишите алгоритм решения одноэтапной задачи интегрированного проектирования с жесткими ограничениями в условиях неопределенности.
4. Сформулируйте одноэтапную задачу интегрированного проектирования с мягкими ограничениями в условиях неопределенности. Запишите дискретный аналог этой задачи.
5. Запишите алгоритм решения одноэтапной задачи интегрированного проектирования с мягкими ограничениями в условиях неопределенности.
6. Сформулируйте одноэтапную задачу интегрированного проектирования со смешанными ограничениями в условиях неопределенности. Запишите дискретный аналог этой задачи.
7. Запишите алгоритм решения одноэтапной задачи интегрированного проектирования со смешанными ограничениями в условиях неопределенности.
8. Сформулируйте двухэтапную задачу интегрированного проектирования с жесткими ограничениями в условиях неопределенности. Запишите дискретный аналог этой задачи.
9. Запишите алгоритм решения двухэтапной задачи интегрированного проектирования с жесткими ограничениями в условиях неопределенности.
10. Опишите наиболее известные программные продукты САПР.
11. Охарактеризуйте техническое обеспечение САПР.
12. Охарактеризуйте информационное обеспечение САПР.
13. Охарактеризуйте лингвистическое обеспечение САПР.



глава

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Типичными представителями многоассортиментных химических производств являются малотоннажные производства органических полупродуктов и красителей, лакокрасочных материалов, реактивов и особо чистых веществ, химико-фармацевтических препаратов, пестицидов, масел и смазок, отдельных видов пластических масс и изделий из них. Многоассортиментные химические производства характеризуются обширным ассортиментом продукции непостоянной номенклатуры, многообразием видов перерабатываемого сырья, возможностью получения одного и того же продукта из сырья разных видов, сложностью и многостадийностью ХТС, возможностью получения одного и того же продукта разными способами, множеством связей по сырьевым и полупродуктовым потокам.

### **8.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХТС**

По мнению академика В. В. Кафарова термин, обозначающий гибкие автоматизированные производственные системы (ГАПС) химической технологии, должен отражать способность ХТС изменять свою структуру и цель функционирования в зависимости от изменяющейся обстановки во внешней среде и требований потребителей с обязательным использованием для достижения этого средств автоматизации, робото- и вычислительной техники [40, 41].

Типовая ХТС многоассортиментного производства химических продуктов состоит из стадий подготовки сырья, химического синтеза, выделения и очистки продуктов. Практически все стадии представляют собой совокупность разнообразных технологических процессов, классифицируемых в соответствии с их физико-химической природой. Типовыми процессами химической технологии являются механические, гидромеханические, тепловые, диффузионные, химические, микробиологические.

Приведем основные понятия и определения.

*Технологическая операция* – типовой физико-химический процесс, осуществляемый в машине, аппарате, агрегате (например, нагревание, химическое превращение, массообмен, теплообмен, перемешивание и т.п.).

*Технологическая стадия* – совокупность отдельных технологических операций (типовых физико-химических процессов), объединенных единым циклом функционирования и представляющих технологический процесс преобразования сырья (полупродукта) в промежуточный (конечный) продукт.

*Партия продукта* – количество продукта, выгружаемого из последнего аппарата химико-технологической системы.

*Технологический цикл стадии* химико-технологической системы – интервал времени между началом (окончанием) производства следующих друг за другом партий продукта.

*Лимитирующая стадия* – самая медленная стадия производства, определяющая технологический цикл работы схемы при производстве одной партии продукта.

*Материальный индекс (расходный коэффициент)* – параметр, характеризующий нормы расхода сырья или полупродуктов для производства единицы продукции.

*Технологический маршрут* – последовательность обработки материальных потоков при производстве конечного продукта.

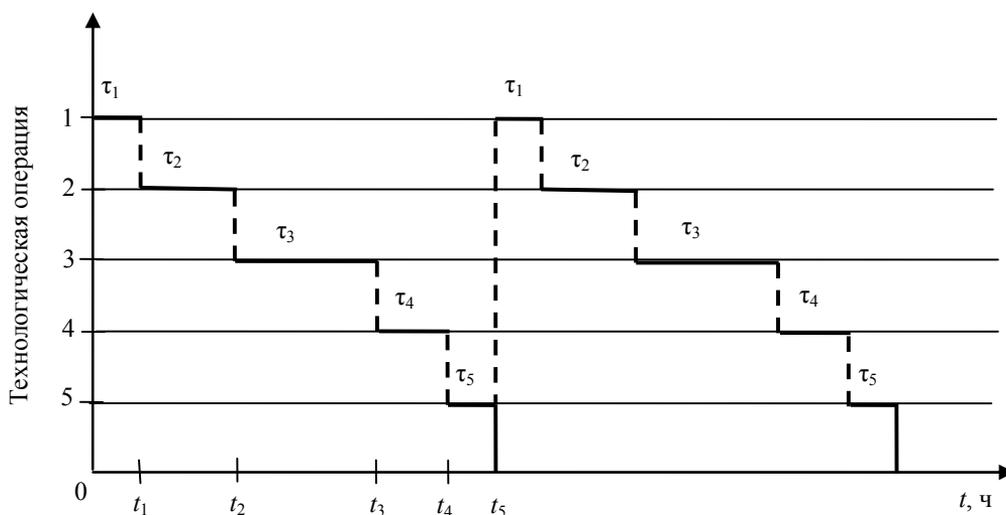
*Диаграмма Гантта* – представление во времени технологического цикла работы аппаратов ХТС при производстве конечного продукта или полупродукта.

*Расписание* – представление во времени графика выпуска многоассортиментной продукции (времени и последовательности выпуска продуктов ассортимента).

В многоассортиментных химических производствах преобладают периодические процессы, для которых характерны: строгая последовательность технологических операций и стадий во времени, обособленность технологических процессов и аппаратов в пространстве, инвариантность технологических процессов относительно их аппаратного оформления. Большинство периодических технологических процессов реализуется в стандартных аппаратах. В аппаратах периодического действия, работающих в циклическом режиме, технологический процесс представляет собой упорядоченную последовательность технологических операций, имеющих конечную продолжительность и заканчивающихся конечным состоянием аппарата. Упорядоченная последовательность операций образует технологический цикл работы аппарата периодического действия, а сум-

марное время операции равно времени его технологического цикла  $\tau = \sum_{k=1}^K \tau_k$ , где

$\tau_k$  – продолжительность операции;  $K$  – число операций, образующих технологическую стадию.



**Рис. 8.1.** Временной график функционирования аппарата периодического действия ( $t$  – текущее время)

Продолжительность технологических операций в аппарате периодического действия изображают в виде временных графиков Гантта (рис. 8.1).

Абсцисса является осью времени, а на ординате представлены номера технологических операций. Каждой операции соответствует прямая, параллельная оси времени, а длина расположенного на ней отрезка – длительности операции. Соответственно границы отрезка изображают моменты начала и окончания операции.

На рисунке 8.1 изображены два последовательных цикла аппарата периодического действия, каждый цикл которого образован последовательностью пяти операций: 1 – загрузка реагента; 2 – нагревание реакционной массы; 3 – осуществление основного технологического процесса; 4 – охлаждение реакционной массы; 5 – выгрузка содержимого из аппарата.

Технологические операции в аппарате периодического действия делятся на основные и вспомогательные. К основным относят операции, в результате которых образуется новый продукт, изменяется состав системы или ее агрегатное состояние, к вспомогательным – подготовка аппарата и его содержимого к основным операциям.

Аппараты периодического действия характеризуются тем, что транспортные операции (загрузка реагентов и выгрузка продуктов) и основные технологические операции разделены во времени. Таким образом, основной технологический процесс в аппарате периодического действия прерывается вспомогательными операциями.

Иногда в многоассортиментных ХТС применяют аппараты непрерывного и полунепрерывного действия.

В аппарате непрерывного действия основной технологический процесс совмещен во времени с транспортом вещества через аппарат, т.е. на вход аппарата непрерывно поступает поток реагентов, а на выходе также непрерывно отводится поток продуктов.

Промежуточное положение занимают аппараты полунепрерывного действия. Они функционируют в непрерывном режиме только в пределах интервала времени, необходимого для переработки некоторой конечной порции сырья или промежуточного продукта. В этих пределах на вход аппарата непрерывно поступают реагенты, а с выхода отводятся продукты. Между интервалами времени работы аппарат находится в режиме ожидания.

В многоассортиментных химических производствах преобладают аппараты периодического действия. Наряду с ХТС, состоящими только из аппаратов периодического действия, функционируют также системы, содержащие оборудование как периодического, так и полунепрерывного действия. Небольшое число технологических процессов, в основном крупно- и среднетоннажных, организовано по непрерывному способу.

Гибкие автоматизированные системы химической технологии создаются главным образом на базе оборудования периодического действия. Поэтому специалист, имеющий дело с проектированием и эксплуатацией гибких ХТС, должен прежде всего обладать методикой моделирования, анализа, синтеза и управления ХТС, основным элементом которых является аппарат периодического действия. Поэтому в дальнейшем в главе рассматриваются вопросы моделирования как отдельных аппаратов, так и ХТС периодического действия, а также их синтез, управление ими и создаваемые на их основе гибкие автоматизированные производственные системы химической технологии.

Технологическое оборудование делится на основное, предназначенное для проведения основных технологических процессов (химический синтез, выделение продуктов и т.п.), и вспомогательное, предназначенное для временного хранения исходных реагентов, промежуточных и конечных продуктов, осуществления транспортных операций и т.п.

К основному оборудованию относятся химические реакторы, ректификационные колонны, адсорберы, абсорберы, экстракторы, выпарные аппараты, кристаллизаторы, аппараты для разделения суспензии – фильтры и центрифуги, сушильное оборудование, аппараты для измельчения, диспергирования, гранулирования, смесители и др. К вспомогательному оборудованию относятся мерники, сборники, насосы, компрессоры, теплообменники и т.п.

В последние годы постоянно расширяется и обновляется ассортимент продукции, растут требования к качеству продукции, появляются новые технологические процессы и нетрадиционные виды сырья. Современный уровень химического производства требует высокоэффективных, селективных технологических процессов, сокращения технологической цепочки для уменьшения потерь про-

межуточных продуктов, быстрой переналадки оборудования и, следовательно, разработки нового оборудования по направлениям:

- оборудование для нетрадиционных высокоинтенсивных процессов;
- совмещение разных процессов в одном аппарате (унификация, многофункциональность);
- создание блочно-модульной аппаратуры.

Наряду с традиционными процессами – химическим синтезом под действием тепла – все большую роль играют процессы химического синтеза под действием нетрадиционных источников энергии. В последние годы ряд ценных химических продуктов в промышленном масштабе начали получать с использованием фотохимических, радиационно-химических, плазмохимических, звукохимических реакций, под воздействием лазерного излучения, увеличивается удельный вес микробиологического синтеза и других прогрессивных химико-технологических процессов.

Для уменьшения числа аппаратурных стадий и, следовательно, общего числа технологических аппаратов в ХТС используют многофункциональные аппараты, в которых совмещают различные технологические процессы. Такое совмещение может быть организовано как во времени (процессы протекают одновременно), так и последовательно. Например, часто совмещают процесс химического синтеза с его выделением.

Совмещение технологических процессов в одном аппарате позволяет значительно сократить число стадий многостадийной ХТС и, следовательно, уменьшить число транспортных операций, а также связанные с ними потери промежуточных продуктов. Использование комбинированных аппаратов приводит к снижению материалоемкости конструкции, энергетических затрат, упрощению аппаратурного оформления технологических процессов и их обслуживанию.

В комбинированных аппаратах новых конструкций совмещают процессы химического синтеза с выделением целевого продукта, химического синтеза с транспортными операциями, выпаривания и кристаллизации, упаривания и сушки, фильтрования, отжима и сушки, сушки и механического измельчения продукта. В производстве пластических масс применяют многофункциональные аппараты, в которых осуществляются стадии перемешивания, пластификации и гранулирования полимерных материалов. Разработаны комбинированные сушилки кипящего слоя для сушки и гранулирования термолабильных и гигроскопических солей; сушильные установки, в которых одновременно с процессом сушки осуществляется механическое измельчение с получением высокодисперсных порошкообразных материалов. В производстве азокрасителей и пигментов применяют турбулентные трубчатые реакторы для осуществления непрерывных процессов тонкого органического синтеза – diazotирования и азосочетания.

Большое внимание уделяют комбинированным аппаратам многофункционального назначения в производстве химических реактивов и особо чистых хи-

мических веществ. Так как обработка проводится в одном аппарате, гарантируется высокая чистота производимого продукта. Разработаны комбинированные технологические аппараты, в которых совмещены процессы фильтрации суспензии и сушки осадка.

Упорядоченная последовательность технологических процессов производства одного или нескольких целевых или промежуточных продуктов и множество технологических аппаратов с системой материальных и энергетических связей между ними, необходимое и достаточное для производства этих продуктов, образуют ХТС. По режиму функционирования различают ХТС периодического действия, непрерывного действия, а также смешанного (комбинированного) типа, когда в пределах одной ХТС содержатся аппараты периодического и непрерывного или периодического и полунепрерывного действия.

Традиционно принято считать непрерывные процессы более прогрессивными, главным образом, потому, что они более производительны. Действительно, периодическому способу организации технологических процессов свойственны такие недостатки, как большое число вспомогательных операций, низкий коэффициент использования основного оборудования, обусловленный несогласованностью функционирования взаимодействующих аппаратурных стадий ХТС. Однако периодические процессы имеют и преимущества перед непрерывными:

- относительная независимость отдельных технологических стадий, их пространственная и временная обособленность;
- осуществление в технологических аппаратах процессов в течение заданного времени, что обеспечивает высокое качество продукции;
- возможность промежуточной, постадийной корректировки технологических параметров и, следовательно, возможность управления качеством промежуточных продуктов;
- инвариантность технологических стадий относительно аппаратурного оформления, заключающаяся в возможности реализации данной стадии в аппаратах различных типов, отличающихся конструктивно, и использования одного и того же аппарата для осуществления разных стадий процесса;
- отсутствие «жестких» материальных и энергетических связей между отдельными аппаратурными стадиями;
- относительная простота проектирования и эксплуатации ХТС периодического действия.

Такие свойства, как обособленность аппаратурных стадий, их инвариантность относительно аппаратурного оформления и отсутствие «жестких» связей между стадиями, присущие ХТС периодического действия, являются предпосылками для организации химического производства по принципу гибких автоматизированных производственных систем.

ХТС периодического действия можно классифицировать по следующим основным признакам: характер ассортимента, число продуктов, число аппаратур-

ных стадий, тип технологической структуры, способ производства продуктов, временной режим работы оборудования, характер технологического маршрута, сложность аппаратурного оформления стадиии.

По числу продуктов ХТС делятся на однопродуктовые, называемые также индивидуальными, и многопродуктовые, а по числу стадий – на одностадийные и многостадийные.

Многопродуктовые ХТС, в свою очередь, делятся на совмещенные (с жесткой структурой) и гибкие, в которых технологические маршруты совпадают не полностью, и переход от выпуска одного продукта к выпуску другого продукта сопровождается изменением структуры ХТС.

Любая ХТС состоит из трех основных частей: технологических процессов, аппаратурного оформления и ассортимента выпускаемой продукции (рис. 8.2).

На рисунке 8.2 цифрами обозначены взаимосвязи между структурными составляющими и задачи, которые необходимо решить [42]:

- 1) подобрать аппаратурное оформление для реализации технологических процессов;
- 2) разместить на выбранном наборе оборудования технологию (технологические процессы) производства;
- 3) в соответствии с технологическим регламентом производства выпустить заданный ассортимент продукции в определенном количестве;
- 4) для производства заданного ассортимента продукции подобрать или разработать новые технологические процессы получения этих продуктов;
- 5) на выбранном наборе технологического оборудования организовать выпуск заданного ассортимента продукции;
- 6) подобрать или сконструировать технологическое оборудование для выпуска заданного ассортимента продукции.

Классификация ХТС и ее структурные составляющие представлены на рис. 8.3.

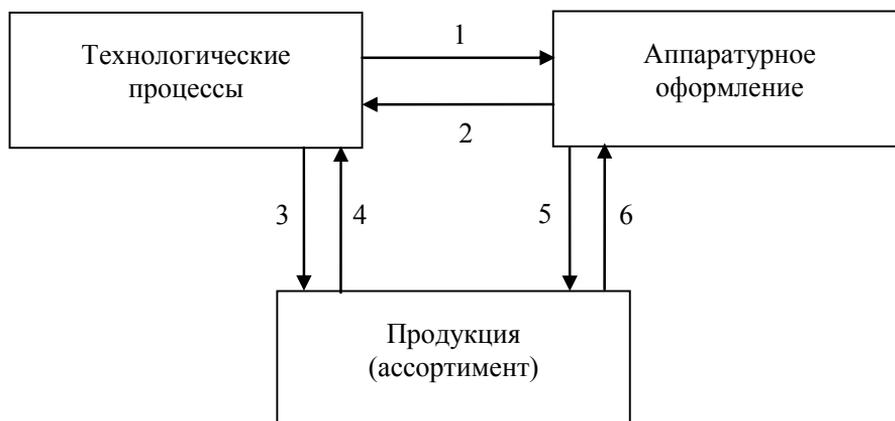


Рис. 8.2. Структурная схема ХТС

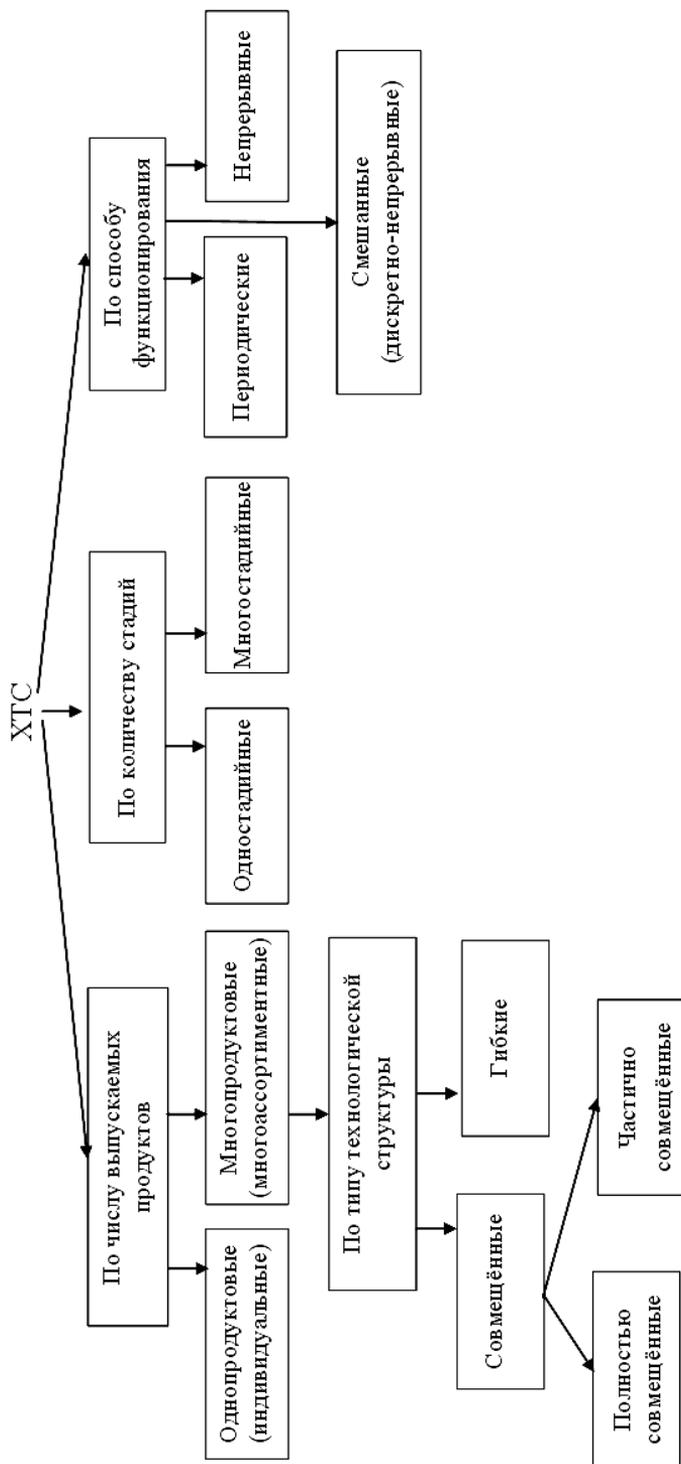


Рис. 8.3. Классификация ХТС

Промышленная ХТС непрерывного действия характеризуются тем, что в любой момент времени все переменные состояния системы и связи между технологическими процессами фиксированы.

В отличие от непрерывных ХТС, при периодическом способе организации производства (рис. 8.4) переменные состояния ХТС изменяются во времени.

В дискретные моменты времени ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots$ ) в ХТС протекает определенный процесс:

$\tau_1$  : загрузка реакционной массы в аппарат  $R_1$ , а аппараты  $R_2$  и  $R_3$  не работают;

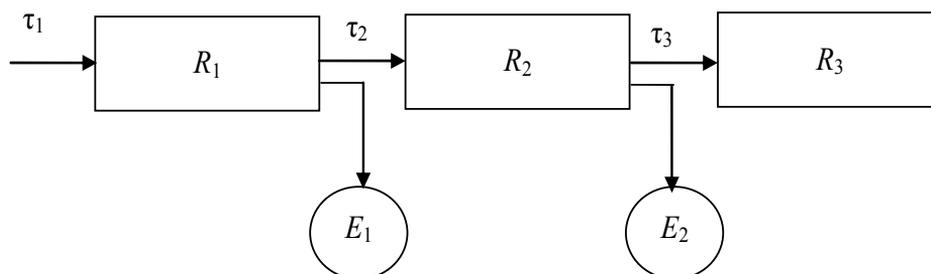
$\tau_2$  : выгрузка реакционной массы в  $R_2$  или в емкость  $E_1$ , аппарат  $R_3$  не работает;

$\tau_3$  : аппарат  $R_1$  не работает и находится как в режиме ожидания следующей партии загрузки реакционной массы, так и в режиме промывки и переналадки для выпуска другого продукта, в аппарате  $R_2$  осуществляется технологический процесс, в емкости  $E_1$  может находиться реакционная масса, которая будет передаваться в аппарат  $R_3$  в последующий момент времени.

Факторами, определяющими организацию выпуска многоассортиментной продукции ХТС периодического действия, являются:

- 1) устойчивость ассортимента выпускаемой продукции к неопределенному спросу;
- 2) подобие технологических стадий выпуска продукции и их аппаратного оформления;
- 3) близкие количества (производительности ХТС) выпускаемой продукции;
- 4) возможность использования многофункционального оборудования;
- 5) частота обновления ассортимента выпускаемой продукции;
- 6) надежность технологического оборудования многоассортиментной ХТС.

*Одностадийная* ХТС – это последовательность типовых технологических операций, объединенных единым циклом функционирования, предназначенная для преобразования исходного сырья или полупродукта в промежуточный продукт.



**Рис. 8.4. ХТС периодического действия:**

$R_1, R_2, R_3$  – аппараты периодического действия;  $E_1, E_2$  – промежуточные емкости

*Многостадийная ХТС* – это множество химико-технологических стадий, объединенных единой целью функционирования для получения из сырья готовой продукции. Отдельная технологическая стадия реализуется на отдельном оборудовании.

*Схема химико-технологического производства* – совокупность взаимосвязанных технологическими потоками и действующих как единое целое машин и аппаратов, в которых осуществляется определенная последовательность технологических операций (подготовка сырья, собственно химическое превращение и выделение целевых продуктов).

*Индивидуальная схема химико-технологического производства* ориентирована на выпуск только одного продукта.

*Совмещенная схема химико-технологического производства* позволяет на одном и том же оборудовании выпускать ассортимент продуктов. Она характеризуется неизменностью технологической структуры. Совмещенная схема состоит из множества технологических стадий, предназначенных для выпуска ассортимента продукции последовательно. Разрабатывается эта схема на основе многофункционального оборудования модульного типа, т.е. каждый аппарат или модуль предназначен для реализации отдельной технологической стадии, маршруты выпуска ассортимента продукции совпадают полностью или частично.

Другим вариантом организации технологической структуры в многопродуктовых ХТС являются гибкие ХТС. Гибкая ХТС имеет переменную технологическую структуру. Гибкие ХТС предназначены для выпуска широкого ассортимента продукции на одном и том же оборудовании. Как правило, такое производство имеет избыточное оборудование, которое используется лишь при выпуске некоторых продуктов. Наличие свободного оборудования позволяет организовать одновременный выпуск нескольких продуктов заданного ассортимента.

*Гибкость* – способность ХТС сохранять свою работоспособность при случайном изменении внешних и внутренних неопределенных параметров.

*Гибкая ХТС* – многостадийная схема химико-технологического производства, ориентированная на производство множества целевых или промежуточных продуктов, имеющая перенастраиваемую технологическую структуру.

*Аппаратурный модуль гибкой ХТС* – конструктивно законченная аппаратурная единица, состоящая из основного и вспомогательного оборудования и системы трубопроводов, предназначенная для реализации одной или нескольких многостадийных ХТС.

Гибкая автоматизированная производственная система (ГАПС) в химической технологии – это интегрированная производственная система, ориентированная на выпуск многоассортиментной продукции. Она строится на основе многофункционального технологического оборудования, средств транспорта и системы автоматизированных складов. ГАПС способна при минимальных затратах труда и материальных ресурсов адаптироваться к изменению ассортимента про-

дукции, видов и состава сырья, технологических процессов. Отличительными чертами ГАПС химической технологии являются:

- новые принципы и архитектура организации многоассортиментных химических производств, обладающих гибкой структурой и перестраиваемых с помощью специальных коммутирующих центров (стыковочных узлов) и робототехнических автоматизированных систем управления;
- новые конструкции технологических аппаратов с перенастраиваемой структурой под различные технологические режимы и процессы, оптимально приспособленные для обслуживания робототехническими системами;
- автоматизированная система оптимального планирования и комплектования технологических маршрутов многоассортиментного производства;
- робототехническая система контроля за ходом технологических процессов и оценивание их состояния (отбор и анализ проб);
- автоматизированная система оптимального управления технологическими и робототехническими подсистемами;
- робототехнические автоматизированные системы подготовки и подачи сырья в аппараты, упаковки и складирования готовой продукции, ремонта, очистки и подготовке к работе химических аппаратов.

Понятие сложности ГАПС химической технологии относится как к ее структуре, так и к способу функционирования. Структурой ГАПС называется инвариантная во времени фиксация связей между ее элементами и подсистемами. ГАПС обладает мобильной структурой, которая многократно изменяется в течение времени ее функционирования. При этом изменяется назначение ГАПС и осуществляется ее переориентация на производство другой продукции. Следовательно, различают структурную и функциональную сложность ГАПС.

*Структурная сложность* ГАПС определяется числом ее элементов и числом внутрисистемных взаимодействий. Элементами ГАПС как сложной развивающейся системы могут быть многостадийные ХТС, аппаратурные модули ХТС, отдельные технологические аппараты, системы автоматического управления технологическими процессами ХТС, виды сырья, промежуточные и целевые продукты.

Элементный состав ГАПС изменяется с течением времени, т.е. осваиваются новые технологические процессы, новые виды сырья (вместо ранее используемых), обновляется аппаратурный состав ХТС.

Под взаимодействиями элементов ГАПС понимаются фиксированные материальные, энергетические и информационные связи между элементами и подсистемами с помощью трубопроводов, электрических проводов и коммуникаций.

*Управляемость* ХТС – свойство системы целенаправленно изменять функционирование в желаемом направлении под воздействием управляющих переменных. Применительно к ГАПС – это изменение технологической структуры

ХТС (схема химико-технологического производства) для выпуска другого ассортимента продукции. Изменение технологической структуры ХТС и режимов ее функционирования достигается с помощью информационно-управляющей подсистемы автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), которая обеспечивает гибкость технологической и организационной структуры ГАПС.

Управление ХТС осуществляется на основе математических моделей, обладающих прогностическими свойствами. Поэтому важным является вопрос моделируемости ХТС, т.е. возможности формализации ее структуры, способа функционирования, а также законов изменения структуры во времени.

*Моделируемость* ХТС – возможность формализованного представления и описания технологической и организационной структур функционирования ХТС.

*Гибкость* ХТС – способность ХТС перестраиваться на выпуск другого ассортимента продукции при минимальных затратах времени, трудовых и материальных ресурсов. При этом предполагается, что изменению подвержена технологическая и организационная структура ХТС.

Различают три вида гибкости.

*Технологическая* – способность ХТС обеспечить переход с выпуска одного ассортимента продукции на другой с использованием имеющейся технологии (совокупности технологических процессов производства) и многофункционального оборудования.

*Аппаратурная* – способность быстро и с минимальными затратами перестраивать аппаратное оформление ХТС (как заменой отдельных конструктивных элементов, так и подключением отдельных единиц вспомогательного оборудования).

*Структурная* – возможность изменения структуры (схемы) химико-технологического производства при переходе с одного ассортимента выпускаемой продукции на другой.

Организация гибкой ХТС по модульному принципу заключается в использовании унифицированного технологического оборудования многофункционального назначения. Многофункциональность оборудования заключается в возможности реализации на едином технологическом оборудовании разнообразных, технологически подобных процессов, а также возможность их совмещения в одном аппарате (перемешивание, нагревание, химическая реакция, массо- и теплообмен и т.п.).

Модульный принцип заключается в создании типовых и индивидуальных модулей, предназначенных для реализации в них одного или нескольких одностадийных химико-технологических процессов. Модульный способ организации предполагает использование готовых элементов – аппаратных модулей типового или многофункционального назначения, включающих оборудование различных типоразмеров.

### Вопросы для самоконтроля

1. *Каковы основные атрибуты гибких автоматизированных ХТС?*

- низкая производительность;
- изменчивость ассортимента;
- многопродуктовость;
- переменная структура;
- возможность выпуска на одном оборудовании нескольких продуктов;
- интеграция всего цикла производства;
- использование средств автоматизации.

2. *Выберите правильные определения (А – ХТС; Б – гибкие автоматизированные ХТС; В – ГАПС):*

– Интегрированная производственная система, ориентированная на выпуск многоассортиментной продукции нефиксированной номенклатуры; она создается на основе многофункционального технологического оборудования, средств транспорта и система складов. Система способна за непродолжительное время и при минимальных затратах труда и материальных ресурсов адаптироваться к изменению ассортимента продукции, видов и состава сырья, технологических процессов.

– Совокупность взаимосвязанных технологическими потоками и действующих как единое целое аппаратов, в которых осуществляется определенная последовательность технологических операций (подготовка сырья, собственно химическое превращение и выделение целевых продуктов).

– Непрерывные, дискретно-непрерывные или периодические (дискретные) производства многономенклатурной продукции с часто меняющимся ассортиментом и планом выпуска.

3. *Классифицируйте ХТС в соответствии со следующими классификационными признаками (А – по способу функционирования; Б – по количеству выпускаемой продукции; В – по типам технологической и организационных структур; Г – по количеству стадий):*

- многостадийные;
- гибкие;
- многоассортиментные;
- непрерывные;
- совмещенные;
- одностадийные;
- периодические;
- индивидуальные;
- полностью совмещенные;
- дискретно-непрерывные;
- частично совмещенные.

4. *Перечислите: А – общесистемные принципы создания ГАПС и Б – специфические особенности:*

- иерархичность;
- гибкость;
- открытость;
- управляемость;
- модульность;
- устойчивость;
- интегрированность;
- эмерджентность;
- целенаправленность.

5. *Выберите правильные сопоставления (А – модульный принцип организации схем позволяет ....; Б – многостадийная ХТС позволяет ...; В – аппаратурный блок позволяет ...):*

- реализовать выпуск одного или нескольких целевых продуктов (полупродуктов) на единой технологической схеме;
- реализовать выпуск одного целевого продукта (полупродукта) в технологическом цикле последовательных ХТП;
- реализовать несколько одностадийных химико-технологических процессов на одном аппаратурном оформлении.

6. *Укажите возможные и предпочтительные способы выпуска продукции для (А – полностью совмещенных или гибких схем; Б – частично совмещенных или гибких схем):*

- последовательная наработка в полном объеме;
- выпуск группами;
- по одной партии продукта в одном цикле.

7. *Укажите специфические признаки гибких химических производств периодического действия:*

- наличие переналадки оборудования;
- промывка (чистка) оборудования;
- дискретность конструктивных параметров;
- различие материальных потоков при производстве продуктов;
- необходимость согласования работы соседних аппаратов;
- избыточность оборудования;
- многостадийность;
- изменяемость ассортимента;
- простой оборудования;
- низкий выход целевого продукта по отношению к исходному сырью.

## 8.2. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХТС

Стратегия исследования многоассортиментных ХТС представляет собой многоэтапный итерационный процесс (рис. 8.5) [42].

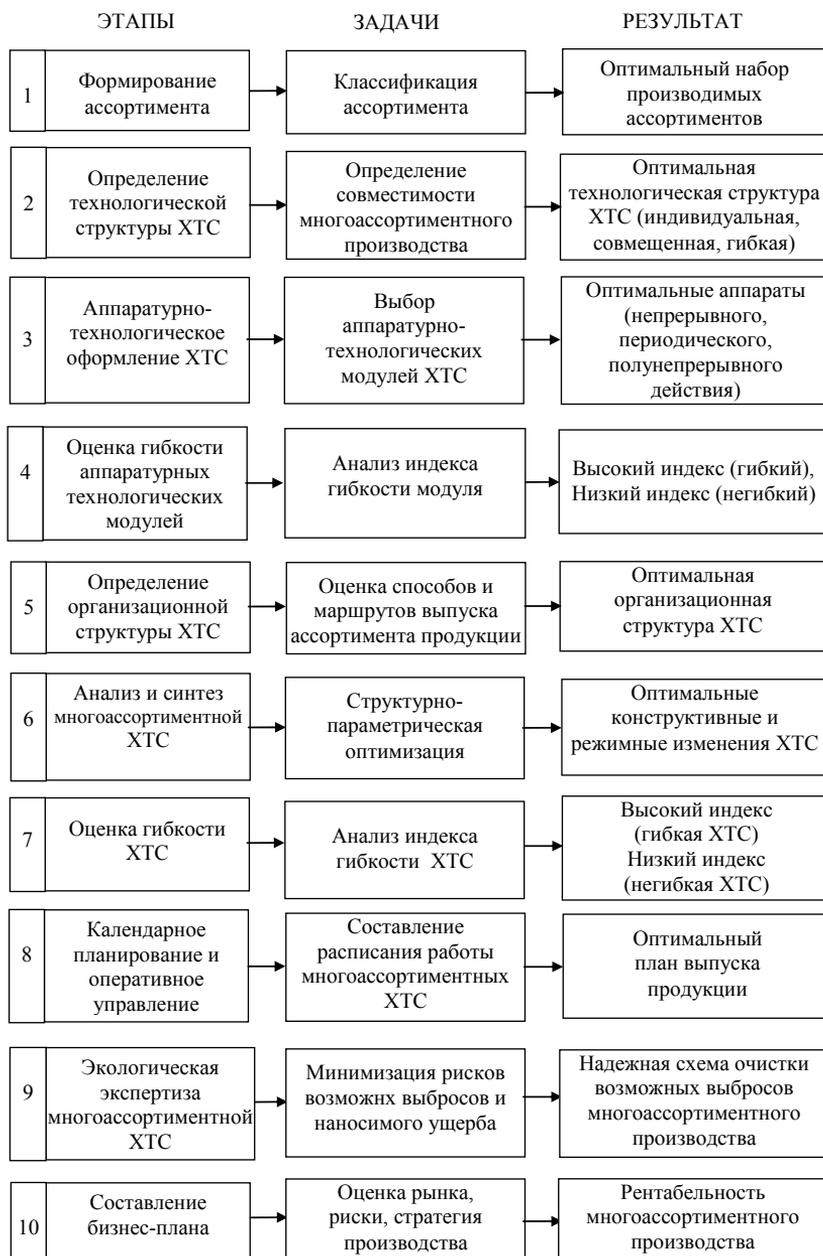


Рис. 8.5. Этапы исследования многоассортиментных ХТС

1. При формировании оптимального набора ассортиментов выпускаемой продукции решается задача синтеза многоассортиментной ХТС, обеспечивающей безусловное производство заданного ассортимента продукции и возможность производства дополнительного (перспективного в будущем) ассортимента продукции.

2. При определении технологической структуры многоассортиментной ХТС анализируется возможность совместного выпуска набора ассортиментов и выбора минимального количества типов модулей для реализации совмещенной или гибкой ХТС в случае, если ассортименты совместимы, или формулируются рекомендации по их выпуску на индивидуальных ХТС.

3. При аппаратурно-технологическом оформлении многоассортиментных ХТС осуществляется выбор аппаратурно-технологических модулей и построение принципиальной схемы гибкой ХТС в модульном исполнении.

4. При оценке гибкости аппаратурно-технологического модуля решается задача вычисления индекса гибкости, характеризующего робастность модуля к случайному изменению его внешних и внутренних неопределенных параметров и возмущающих воздействий.

5. При определении организационной структуры многоассортиментной ХТС выбирается временной режим выпуска многоассортиментной продукции (последовательный, параллельный, группами фиксированного или переменного состава и т.п.).

6. При анализе и синтезе многоассортиментной ХТС осуществляется структурно-параметрическая оптимизация с использованием различных критериев: минимум капитальных или приведенных затрат, минимум времени выпуска заданного ассортимента продукции, максимум коэффициента загрузки оборудования, максимум индекса гибкости и т.п. В общем случае задача синтеза многоассортиментных ХТС представляет собой смешанно-целочисленную задачу линейного или нелинейного программирования.

7. При оценке гибкости многоассортиментной ХТС решается задача вычисления индекса гибкости, характеризующего работоспособность ХТС при случайном изменении внешних и внутренних возмущающих воздействий в ходе ее эксплуатации.

8. Оптимальное календарное планирование многоассортиментного производства в условиях реальной производственной ситуации.

9. При проведении экологической экспертизы многоассортиментной ХТС определяется степень негативных воздействий многоассортиментного производства на окружающую среду и обслуживающий персонал и вырабатываются рекомендации по их уменьшению, созданию надежной схемы очистки стоков и выбросов, регенерации растворителей и ценных компонентов, утилизации твердых отходов.

10. На заключительном этапе выполняется технико-экономическое обоснование целесообразности и эффективности многоассортиментной ХТС, составляется бизнес-план многоассортиментного производства.

Каждый этап представляет собой самостоятельную и сложную научно-техническую задачу, оптимальность решения которой в значительной степени зависит от успешности принимаемых решений на предыдущих этапах. Изложенная стратегия применима для исследования индивидуальных, совмещенных и гибких ХТС в модульном исполнении.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные этапы анализа (исследования) и синтеза многоассортиментных ХТС.

2. Какие задачи решаются при аппаратурно-технологическом оформлении многоассортиментных ХТС?

3. Укажите возможные способы синтеза ГАПС и предпочтительный: А – структурный; Б – параметрический; В – структурно-параметрический.

4. В чем заключается основное назначение параметрического синтеза?

- определение технологических параметров производства;
- поиск конструктивных параметров оборудования;
- определение местоположения согласующих емкостей;
- определение местоположения параллельных аппаратов;
- оптимизация маршрута получения продуктов.

5. Каково назначение структурного синтеза?

- определение аппаратурного состава и технологических связей аппаратов при производстве продуктов;
- оценка необходимости использования параллельных аппаратов и определение их местоположения;
- оценка необходимости установки согласующих емкостей, определение их местоположения и размеров;
- определение оптимальных маршрутов получения продуктов;
- определение геометрических размеров оборудования.

### 8.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХТС

Модели многоассортиментных ХТС формируются в соответствии с системным подходом:

- 1) осуществляется декомпозиция иерархической ХТС на подсистемы;
- 2) формируются модели подсистем каждого уровня иерархии;
- 3) производится объединение моделей нижележащих уровней в обобщенную модель целостной ХТС.

Обобщенная модель многоассортиментной ХТС включает в себя модели отдельных аппаратов и дополнительные условия, определяющие функционирова-

ние ХТС. В свою очередь, модель аппарата представляется как совокупность моделей отдельных операций и координирующих условий.

Иерархическая структура моделей многоассортиментной ХТС представлена на рис. 8.6 [42].

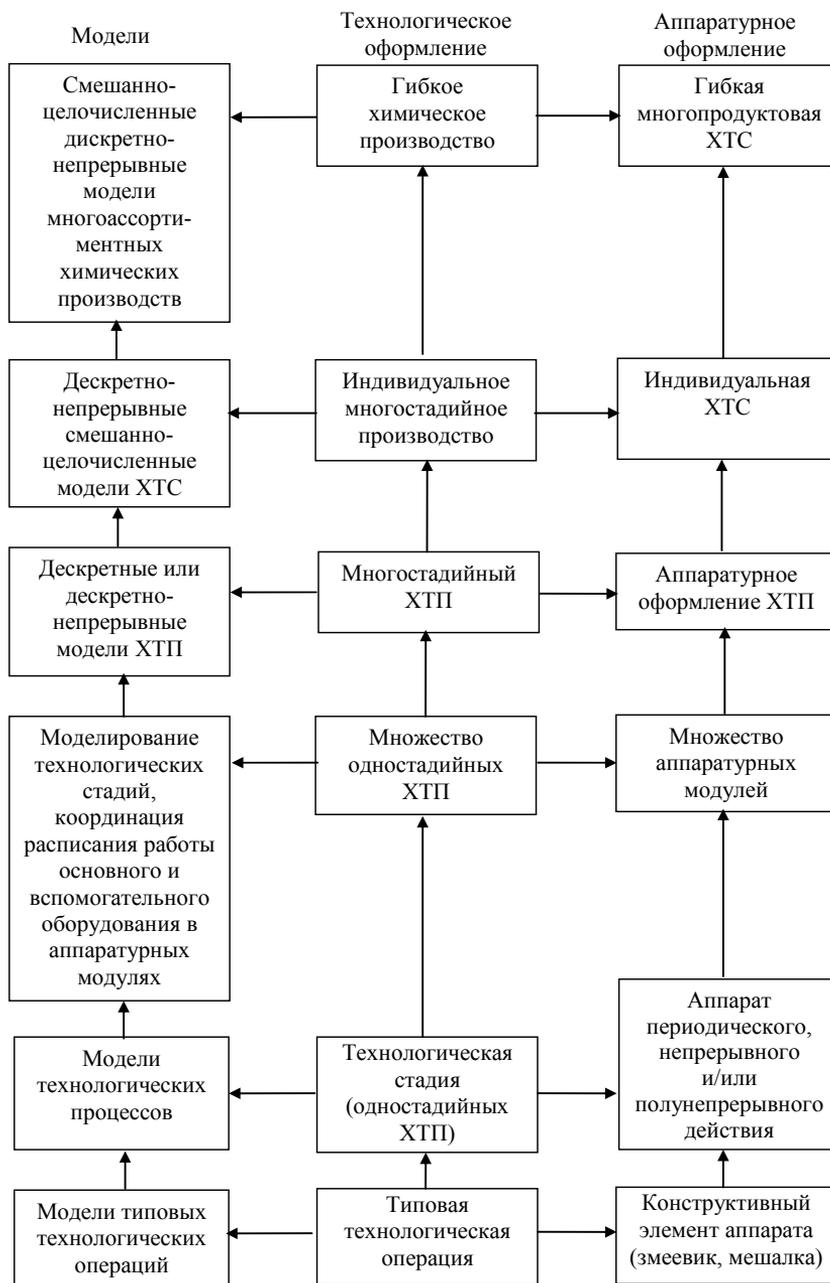


Рис. 8.6. Иерархическая структура моделей многоассортиментных ХТС

При математическом моделировании одностадийной ХТС одновременно составляется расписание работы аппаратного модуля периодического действия и определяются длительности технологических операций во вспомогательном оборудовании (рис. 8.7).

На представленной диаграмме время  $\tau'_1$  подготовки реагента в емкости  $E_1$  не оказывает влияния на длительность технологического цикла  $\tau_{\text{ЦАМ}}$ , так как время проведения вспомогательной операции совпадает со временем проведения основной операции, т.е.  $\tau_1 = \tau'_1$ . В свою очередь, время  $\tau'_2$  отбора полупродукта из емкости  $E_2$  оказывает влияние на величину  $\tau_{\text{ЦАМ}}$ .

Длительность технологического цикла работы аппаратного модуля одностадийной ХТС определяется следующим образом:

$$\tau_{\text{ЦАМ}} = \sum_{k=1}^K \tau_k + \sum_{i=1}^I \tau'_i,$$

где  $\tau_k$  – длительности основных технологических операций в аппаратном модуле;  $\tau_i$  – длительности технологических операций во вспомогательном оборудовании, влияющие на длительность цикла в аппаратном модуле.

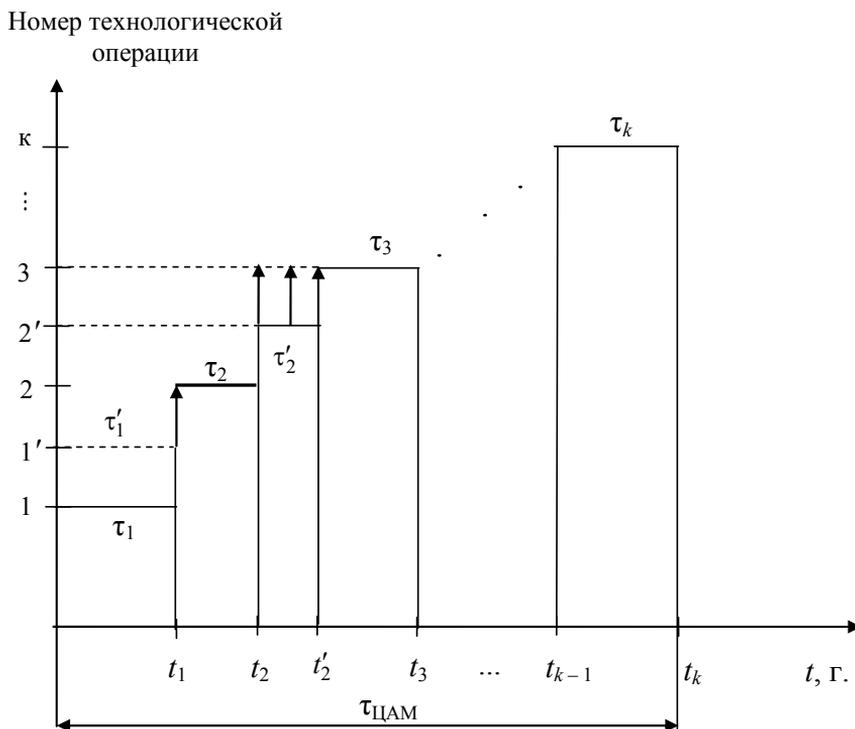


Рис. 8.7. Технологический цикл работы аппаратного модуля

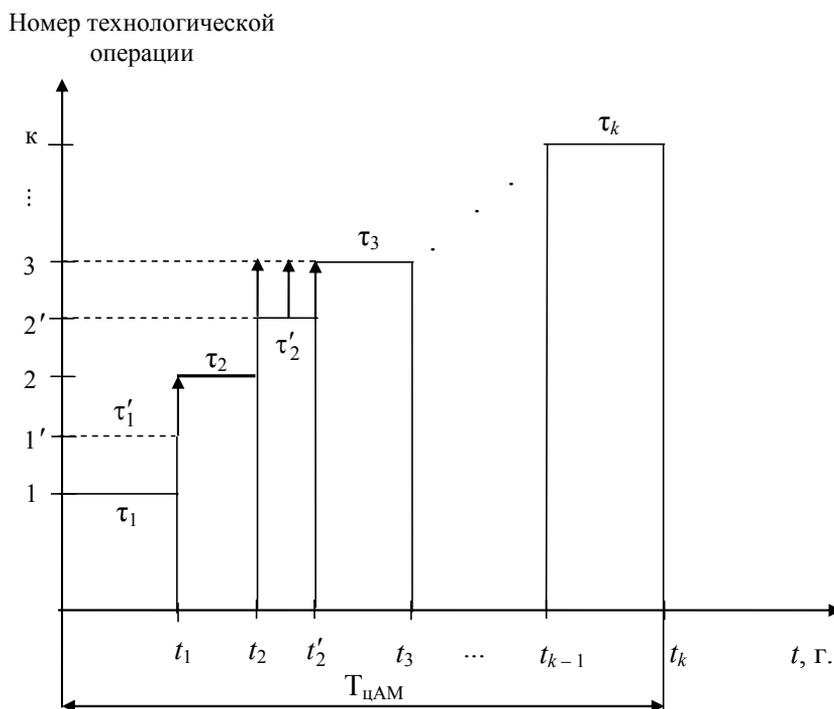


Рис. 8.8. Технологический цикл работы многостадийной ХТС

Модель многостадийной ХТС наряду с моделями одностадийных ХТС, протекающих в аппаратурных модулях, должна включать расписание работы многостадийной ХТС (рис. 8.8).

Длительность цикла работы многостадийной ХТС определяется по формуле

$$\tau_{\text{ц ХТС}} = \sum_{j=1}^N \tau_{\text{ц АМ}_j},$$

где  $N$  – количество аппаратурно-технологических модулей, включенных в состав многостадийной ХТС.

Задача моделирования многостадийной ХТС заключается в том, чтобы согласовать длительности работы аппаратурно-технологических модулей одностадийных ХТС [43].

Наиболее важными характеристиками режима работы многостадийных ХТС, во многом определяющими состав аппаратурного оформления стадий и эффективность их функционирования, являются:

- длительность цикла переработки партий каждого продукта – минимально возможный промежуток времени между моментами начала (завершения) процессов выпуска партий продукта  $T_{\text{ци}}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , 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

$$T_i = \sum_j \tau_{ij} + \left( \frac{Q_i}{w_i} - 1 \right) T_{цi}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (8.1)$$

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  $T_{цi}$  для продуктов ХТС определяются независимо, поэтому дальнейшие рассуждения проводим 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  $J$  аппаратных модулей системы.

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

$$T_{ц} = \max\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J\}, \quad (8.2)$$

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 аппаратных модулей, входящих в состав аппаратного оформления ХТС, и способа переработки партий продукта с помощью этих аппаратов. Продолжительность реализации стадий выпуска продукта  $\tau_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  складывается 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.  $\tau_j = \tau_{lj} + \tau_{0j} + \tau_{ij} + \tau_{cj}$ , где  $\tau_{lj}$ ,  $\tau_{0j}$ ,  $\tau_{ij}$ ,  $\tau_{cj}$  – 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»). Длительность операций очистки, как правило, нормируется

в зависимости от типа, размеров аппарата и вида реализуемых в нем процессов. Порядок определения длительности физико-химических превращений, загрузки и выгрузки зависит от типа основных аппаратурных модулей рассматриваемой ХТС.

Если основным оборудованием стадий ХТС 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 транспортировки, расположения аппаратурных модулей стадий ХТС друг относительно друга. Этап компоновки технологического оборудования выполняется по окончании определения аппаратурного определения ХТС, поэтому длительности операций загрузки и выгрузки емкостных аппаратов в расчетах оборудования ХТС многоассортиментных химических производств 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):

$$\tau_j = \frac{g_j w}{X_j a_j}, \quad (8.3)$$

где  $g_j$  – основной материальный индекс стадии (результат пересчета материального баланса процесса синтеза продукта на 1 т): 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 кг/м<sup>2</sup>·ч:

$$\tau_j = \frac{m_j w}{X_j a_j} = \frac{m_j \delta_j}{v_j a_j}, \quad (8.4)$$

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  $\varphi_j$ , который не может

быть больше максимально допустимого  $\varphi_j^*$ , т.е.  $V_j = \frac{v_j w}{\varphi_j} \geq \frac{v_j w}{\varphi_j^*}$ . Продолжи-

тельность реализации стадии сушки партии продукта определяется массой испаренной влаги на 1 т продукта, рабочей поверхностью сушилки  $F_j$  и ее удельной производительностью по влаге в кг/м<sup>2</sup>·ч, следовательно:

$$\tau_j = \frac{m_j w}{F_j a_j} = \frac{m_j V_j \varphi_j}{v_j F_j a_j} \leq \frac{m_j V_j \varphi_j^*}{v_j F_j a_j}. \quad (8.5)$$

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  $\tau_{ij}$  и  $\tau_{uj}$  предварительно не включаются в  $\tau_j$ , а определяются в процессе выбора аппаратурного оформления ХТС.

Возможные варианты организации совместной работы стадий ХТС, оснащенных фильтрами и емкостными аппаратами с перемешивающими устройствами иллюстрирует рис. 8.9, а [43].

Для варианта, показанного на рис. 8.9, 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 единовременна (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  $\tau_{uj-1} = \tau_{lj+1} = \tau_j h_j$  и  $\tau_{j\pm 1} = \tau_{j\pm 1}^0 + \tau_j h_j$ , где  $\tau_{j\pm 1}^0$  – 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. 8.9, в, предусматривает введение в ХТС дополнительных аппаратурных 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 буферную емкость ( $\tau_{i_1}^0$ ) или партии фильтрата из буферной емкости ( $\tau_{i_2}^0$ ), которая обычно принимается равной 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

$$\tau_{j\pm 1} = \tau_{j\pm 1}^0 + z_{j\pm 1} \tau_j h_j, \quad (8.6)$$

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. 8.10):

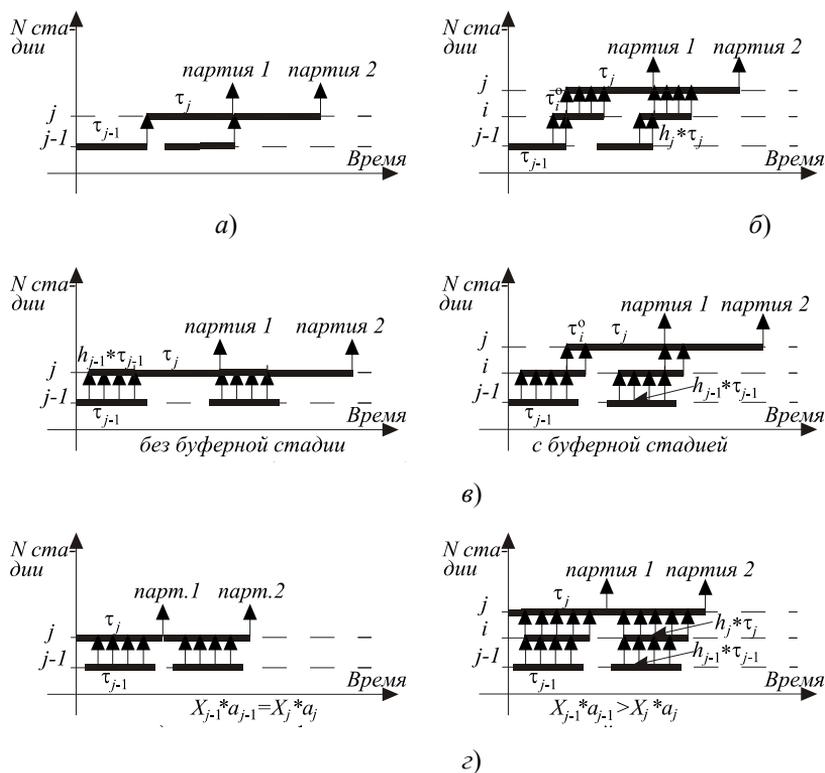
а) стадии  $j - 1$  и  $j$  оснащены аппаратами периодического действия, т.е. перегрузка партии пасты из фильтра (например, фильтр-пресса) в сушилку (например, роторную вакуумную) производится единовременно и продолжительность перегрузки заранее включается в  $\tau_{j-1}$  и  $\tau_j$  (значения  $a_{j-1}$  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 (8.6);

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  $j - 1$ :

$$\tau_j = \frac{g_j w}{X_j a_j} + h_{j-1} \tau_{j-1}, \tag{8.7}$$

а если между ними вводится буферная стадия  $i$ , то значения  $\tau_{j+1}$  и  $\tau_i$  определяются по формулам (8.3) – (8.6);



**Рис. 8.10. Диаграммы совместной работы основных аппаратов стадий фильтрации и сушки:**

- а – на стадиях  $j - 1$  и  $j$  – аппараты периодического действия;
- б – на стадии  $j - 1$  – аппарат периодического действия, на стадии  $j$  – непрерывного;
- в – на стадии  $j - 1$  – аппарат непрерывного действия, на стадии  $j$  – периодического;
- г – на стадиях  $j - 1$  и  $j$  – аппараты непрерывного действия

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:

$$\tau_i = \max \{ \tau_{j-1} h_{j-1}, \tau_j h_j \}. \quad (8.8)$$

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, аппаратурное оформление которых включает несколько основных аппаратов.

Для идентификации вариантов используем указатель  $p_j$ :

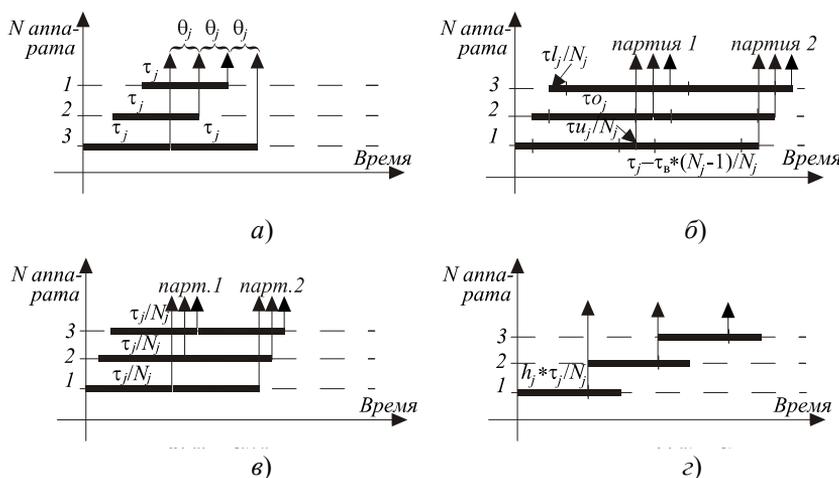
1)  $p_j = 0$  – каждый из аппаратов стадии  $j$  принимает партию сырья или полупродукта целиком, причем следующие друг за другом партии перерабатываются в разных аппаратах в порядке поступления, т.е. циклы работы разных аппаратов не совпадают по времени;

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. 8.11, а). В случае, когда равные доли партии продукта перерабатываются в разных аппаратах, значение  $\theta_j$  зависит от их типа.

На рисунке 8.11, 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 [43]. 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, длительность операций загрузки и выгрузки емкостных аппаратов существенно меньше длительности физико-химических превращений, поэтому в данном случае обычно принимают  $\theta_j = \tau_j$ .



**Рис. 8.11. Диаграммы работы основных аппаратов стадий при  $N_j = 3$ :**  
 $a - 2\tau_j = N_j\theta_j + \tau_j \rightarrow \theta_j = \tau_j / N_j$ ;  $б - \theta_j = \tau_j$ ;  $в - \theta_j = \tau_j / N_j$ ;  $з - \theta_j = \tau_j$

На стадиях фильтрации 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 фильтрации и сушки прямо пропорциональна количеству обрабатываемой массы, в расчетах оборудования ХТС принимается  $\theta_j = \tau_j / N_j$ , (см. рис. 8.11, в). Этот вывод не распространяется на стадии, оснащаемые фильтр-прессами, когда целью фильтрации 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. 8.11, з). При таком режиме минимально возможный промежуток времени между моментами окончания переработки двух последовательно выпускаемых партий продукта  $\theta_j = \tau_j$ .

Рассмотренные в этом разделе особенности функционирования оборудования многоассортиментной ХТС должны учитываться при постановке и решении задач определения характеристик режима функционирования многоассортиментной ХТС и аппаратурно-технологическом оформлении ее стадий.

### Вопросы для самоконтроля

1. Расположите в правильной последовательности от низшего уровня к высшему процессную составляющую гибкой ХТС:
  - многостадийный ХТП;
  - технологическая стадия;

- множество одностадийных ХТП;
- индивидуальная производственная ХТС;
- типовая технологическая операция;
- гибкое производство.

2. *Модель технологического аппарата периодического действия формируется из следующих составляющих (выберите правильные):*

- модели смены состояний;
- модели расписания работы аппаратов;
- отображения, ставящего в соответствие множеству технологических операций множество их моделей;
- отображения, ставящего в соответствие множеству технологических аппаратов множество их моделей;
- модели технологических операций;
- модели взаимодействия аппаратов.

3. *Модель гибкой ХТС формируется из следующих составляющих (выберите правильные):*

- моделей расписания работы аппаратов;
- моделей индивидуальных ХТС;
- моделей взаимодействия аппаратов;
- моделей технологической структуры;
- моделей организационной структуры ХТС;
- отображения, ставящего в соответствие множеству аппаратов множество их моделей;
- отображения, ставящего в соответствие индивидуальной (или совмещенной) ХТС множество их моделей;
- моделей совмещенных ХТС.

4. *Сформулируйте основные допущения, принимаемые при определении режима функционирования многостадийной ХТС периодического действия.*

5. *Запишите выражение для целевой функции задачи аппаратурно-технологического оформления многостадийной ХТС.*

6. *Запишите условия выбора допустимых значений размеров и числа основных аппаратурных модулей стадий ХТС периодического действия.*

7. *Сформулируйте задачу параметрического синтеза многостадийной ХТС.*

#### **8.4. ГИБКИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ**

Гибкие автоматизированные производственные системы (ГАПС) химической промышленности – это непрерывные, квазинепрерывные или периодические производства с часто меняющимся ассортиментом и планом выпуска, в которых полностью или в значительной степени автоматизированы процессы:

планирования многоассортиментного производства и оптимизации расписания работы оборудования ХТС; перевода производства с выпуска одного ассортимента на другой; контроля технологических параметров и управления процессами (режимами) производства; диагностики аварийных ситуаций и выхода из них; подготовки и подачи сырья в аппараты; упаковки и складирования готовых форм; ремонта, очистки и подготовки к работе химических аппаратов; монтажа и демонтажа оборудования; очистки и утилизации отходов многоассортиментного производства [41]. Гибкие производственные системы строятся в соответствии с достижениями научно-технического прогресса путем сочетания новейших образцов техники, инновационных технологий и современных систем управления с высокой квалификацией персонала.

ГАПС химической промышленности должны обеспечивать (основные принципы функционирования):

1) выпуск требуемого множества видов (ассортиментов) продукции за календарный период времени с заданными потребительскими свойствами на уровне мировых стандартов;

2) комплектование технологических маршрутов и оборудования для каждого продукта (ассортимента) из заданного множества;

3) роботизированный контроль технологических параметров и обслуживание аппаратов в случае ручного выполнения технологических операций, опасности технологии для здоровья людей, тяжести, монотонности или непристужности труда;

4) автоматическую перестройку структуры ГАПС и аппаратов, системы управления в случае перехода на выпуск новых ассортиментов продукции;

5) автоматический контроль и диагностику аварийных и предаварийных ситуаций, синтез и реализацию мероприятий безопасного выхода из них;

6) утилизацию отходов и очистку выбросов при производстве каждого продукта (ассортимента) из заданного множества ассортиментов.

Создание ГАПС малотоннажной химии, организованной и функционирующей в соответствии с вышеназванными принципами, предусматривает решение целого комплекса взаимосвязанных задач, а именно: определение целей ГАПС; синтез ее структуры и аппаратурно-технологического оформления; синтез структуры иерархической распределенной системы управления гибким многоассортиментным производством и роботами-лаборантами; разработка гибкой системы очистки и утилизации отходов; создание системы искусственного интеллекта для прогнозирования рыночной конъюнктуры, распознавания производственных ситуаций и принятия решений.

Сложность решения этих задач обусловливается особенностями производств малотоннажной химии, к которым в первую очередь следует отнести структурную и функциональную сложность процессов тонкого органического синтеза, частую сменяемость ассортимента продукции, переработку широкого ассортимента на одной ХТС, использование как непрерывно, так и периодических работающих аппаратов в одной и той же схеме, использование отдельных технологи-

ческих аппаратов на различных стадиях многоассортиментного производства. Типичными представителями малотоннажных химических производств, организация которых по принципам ГАПС целесообразна, являются производства лакокрасочных материалов, органических полупродуктов и красителей, реактивов и особо чистых веществ, химико-фармацевтических препаратов, пестицидов, масел и смазок, пластических масс и изделий из них.

Для успешного решения задач синтеза ГАПС малотоннажной химии необходимы разработки методологии и принципов автоматизированного проектирования, новых подходов к созданию химических аппаратов, пригодных для использования в ГАПС. Основными принципами проектирования ГАПС малотоннажной химии являются [33, 41]:

- принцип сопряженности аппаратурного оформления ГАПС с требуемым ассортиментом продукции (при этом в качестве исходного множества принимается множество существующих на сегодняшний день ассортиментов продукции);
- принцип потенциальной гибкости (в качестве исходного множества принимаются не только существующие на сегодняшний день ассортименты продукции, но и возможные ассортименты будущего);
- принцип эволюционируемости ГАПС (конструктивно оформленная способность модернизации ГАПС с течением времени в соответствии с успехами научно-технического прогресса);
- принцип модульной структуры ХТС и аппаратов, позволяющий разрешить противоречие между ростом надежности и долговечности оборудования и сокращением времени, в течение которого существует потребность в производимом продукте;
- принцип сопряженности конструкций технологических аппаратов непрерывного и периодического действия с множеством оптимальных статических и динамических режимов, соответствующих производству требуемого множества продукции;
- принцип сопряженности конструкций технологических аппаратов с подсистемой роботов-лаборантов;
- принцип экологической безопасности ГАПС, заключающийся в необходимости обеспечения требуемой степени очистки отходов для каждого продукта (ассортимента) из заданного множества ассортиментов.

ГАПС обеспечивают быструю переналаживаемость производства на новые виды продукции и сырья, максимальную загрузку технологического оборудования, высокий уровень энерго- и ресурсосбережения, экологическую безопасность, стабильность и «предсказуемость» качества многоассортиментной продукции.

ГАПС представляют собой сложные производственные системы, ориентированные на выпуск многоассортиментной продукции переменного состава, способные оперативно и с минимальными затратами перестраиваться на переработку других видов сырья, изменение производительности, осуществление новых

технологических процессов. ГАПС позволяют повысить качество продукции, обеспечить ритмичность работы и повышение коэффициента использования оборудования, снизить себестоимость выпускаемой многоассортиментной продукции.

Отличительными чертами ГАПС химической промышленности являются:

- новые принципы и архитектура организации многоассортиментных химических производств, обладающих гибкой структурой и перестраиваемых с помощью специальных коммутирующих центров (стыковочных узлов) и робототехнических автоматизированных систем управления;

- алгоритмы и автоматизированные системы оптимального планирования и комплектования технологических маршрутов многоассортиментного производства;

- новые конструкции технологических аппаратов с перенастраиваемой структурой под различные технологические режимы и процессы, оптимально приспособленные для обслуживания робототехническими системами;

- робототехнические системы контроля за ходом технологических процессов и оценивание их состояния (отбор и анализ проб);

- алгоритмы и автоматизированные системы оптимального управления технологическими процессами и робототехническими подсистемами;

- робототехнические автоматизированные системы подготовки продукции, ремонта, очистки и подготовки к работе химических аппаратов.

ГАПС является кибернетической системой, поскольку гибкость достигается исключительно за счет ресурсов управления, которыми являются управление структурой всего многоассортиментного производства (изменением компоновки аппаратов в блоках и элементов в аппарате); управление структурой подсистем РобАСУ (изменение контуров и алгоритмов управления, состава ансамбля роботов-лаборантов и т.п.); управление статическими и динамическими режимами технологических процессов.

Создание ГАПС химической промышленности возможно только при системном подходе к решению взаимосвязанных задач интегрированного проектирования технологических аппаратов, алгоритмов и систем управления, робототехнических подсистем, оптимизации статических и динамических процессов с гарантированной вероятностью выполнения регламентных требований к качеству выпускаемой продукции и экологической безопасности многоассортиментного производства. При создании ГАПС химической промышленности реализуются следующие принципы [41]:

- организация производства с использованием блочно-модульного построения технологической схемы, управляемых коммутационных центров и радиального размещения технологического оборудования относительно центров, позволяющих оптимально сочетать непрерывную технологию с традиционной периодической;

- представление и конструирование технологического оборудования в виде модулей, т.е. отдельных элементов, позволяющих гибко перестраивать структуру гидродинамических потоков в аппарате в зависимости от требований технологии;
- возможность быстрого автоматизированного переналаживания гибкой ХТС на выпуск новых ассортиментов продукции и производительности;
- конструктивно оформленную возможность модернизации и роботизированного обслуживания технологического оборудования;
- обеспечение для каждого продукта оптимальных условий производства, статических и динамических свойств аппаратов, гарантирующих высокий уровень энерго- и ресурсосбережения, экологической чистоты, высокую эффективность и надежность работы системы автоматизированного управления.

ГАПС химической промышленности нового поколения отличается принципиально новыми [41]:

1) организацией многоассортиментного производства, оптимально сочетающей непрерывные и периодические процессы, позволяющей оперативно с помощью робототехнических устройств и систем перестраивать структуру производства в связи с требуемым изменением ассортиментов выпускаемой продукции;

2) конструкциями аппаратов с легко перестраиваемой структурой, обладающими заданными (оптимальными) статическими и динамическими свойствами для каждой альтернативной структуры аппарата, оптимально приспособленными для использования робототехнических обслуживающих систем и систем роботов-лаборантов;

3) системой управления, включающей в себя взаимодействующие подсистемы оптимизации технологических процессов, системы управления роботами-лаборантами и обеспечивающей комплектование технологических маршрутов и планирование производства;

4) системой автоматического контроля за ходом технологического процесса, включающей в себя подсистему роботов-лаборантов, отбирающих и анализирующих пробы, а также подсистему идентификации состояния технологических процессов, позволяющую для каждого производимого продукта (ассортимента) оперативно оценивать состояние технологического процесса;

5) алгоритмами оптимизации и системой управления, обеспечивающими выполнение технологических требований с гарантированной вероятностью;

6) гибкой системой очистки и утилизации отходов при любой совокупности производимых продуктов.

Рассмотрим особенности архитектуры ГАПС многоассортиментного производства смазочных материалов [41]. Технологическая схема ГАПС пластичных смазок (рис. 8.12) включает иерархическую систему управляющих коммутационных центров (стыковочных модулей)  $D, D_1, \dots, D_6$ . Коммутационный центр  $D$  обеспечивает централизацию технологических потоков и возможность дискретного управления им, т.е. выполняет функции «диспетчера» всего производства.

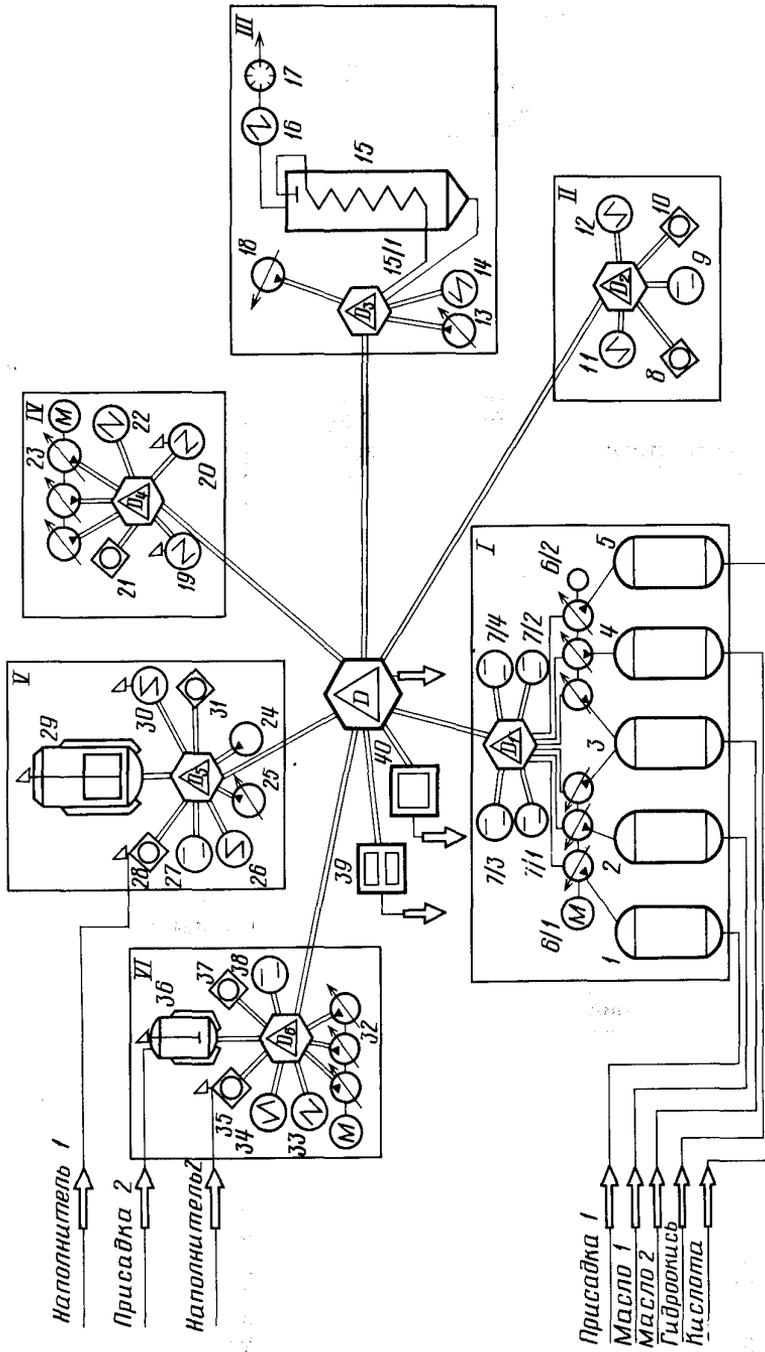


Рис. 8.12. Технологическая схема ГАПС пластичных смазок

Технологические блоки I, II, ..., VI обладают функциональной самостоятельностью и соединяются друг с другом с помощью «диспетчера»  $D$  и транспортных трубопроводов, обеспечивающих питание блоков и транспортирование целевых продуктов.

Радиальный принцип компоновки оборудования и использование специальных стыковочных модулей  $D, D_1, \dots, D_6$  позволяет оперативно управлять организационной структурой многоассортиментного производства, оптимально сочетать периодические, полунепрерывные и непрерывные процессы, снизить материалоемкость производства за счет уменьшения протяженности трубопроводов и сокращения количества малонадежной запорно-регулирующей арматуры, повысить коэффициент использования технологического оборудования.

Главный диспетчер  $D$  (рис. 8.13) обладает съемным сердечником с распределительными внутренними каналами, что позволяет сравнительно легко изменять последовательность включения блоков, настраивать ГАПС на выпуск требуемого ассортимента продукции. Главный диспетчер  $D$  и стыковочные модули  $D_1, \dots, D_6$  позволяют организовать несколько одновременно работающих установок в составе ГАПС, отключить любой блок или аппарат блока без изменения обвязки всего оборудования.

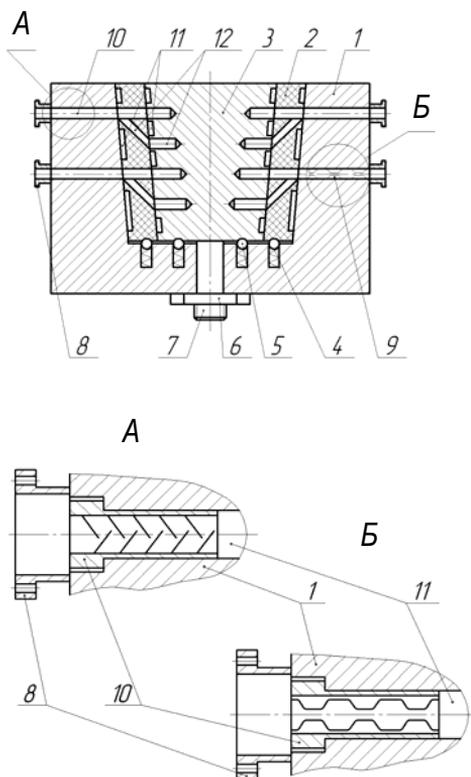


Рис. 8.13. Устройство коммутационного центра (диспетчера)

Локальные стыковочные модули  $D_i$  и модульно-элементное строение аппаратов позволят строить многофункциональные гибкие технологические узлы с легко перенастраиваемой структурой не только самого блока, но и основного технологического аппарата.

ГАПС, представленная на рис. 8.12, реализует гибкое производство пластичных смазок и других смазочных материалов. Она включает технологические блоки I, II, ..., VI, коммутационный центр  $D$  и гомогенизаторы (клапанный  $G-39$  и коллоидную мельницу  $G-40$ ).

Технологический блок I (блок дозирования и подготовки сырья) состоит из стыковочного модуля  $D_1$ , демпфирующих сырьевых емкостей  $E_1, \dots, E_5$ , а также двух блоков дозирочных насосов  $H-6/1, 2$  и фильтров  $\Phi-7/1, 2, 3, 4$ . К стыковочному модулю  $D_1$  дозирочные насосы  $H-6/1, 2$  подключаются выходами, а фильтры  $\Phi-7/1, 2, 3, 4$  подключаются входом и выходом.

Технологический блок II (блок смешения и нагревания сырьевых компонентов) состоит из стыковочного модуля  $D_2$ , многофункционального статического смесителя  $C-8$ , роторного смесителя  $C-10$ , фильтра  $\Phi-9$ , теплообменников  $T-11, T-12$ . К модулю  $D_2$  технологическое оборудование подключается входом и выходом.

Технологический блок III (блок обезвоживания и химических реакций) состоит из стыковочного модуля  $D_3$ , дозирочного насоса  $H-13$ , шестеренчатого насоса  $H-18$ , теплообменника  $T-14$ , реактора испарителя  $I-15$ , конденсатора испарителя  $X-16$  и вакуумного насоса  $HB-17$ .

Для удаления паров воды из верхней части реактора  $I-15$  предусмотрена откачка вакуумным насосом  $HB-17$  через конденсатор-холодильник  $X-16$ . Аппараты  $H-13, T-14, I-15, H-18$  подключаются к стыковочному модулю  $D_3$  входом и выходом.

Технологический блок IV (блок термообработки и охлаждения) состоит из стыковочного модуля  $D_4$ , скребковых теплообменников  $TC-19, 20$ , многофункционального смесителя  $C-21$ , блока дозирочных насосов  $H-23$  и теплообменника  $T-22$ . К стыковочному модулю  $D_4$  указанное оборудование подключается входом и выходом.

Технологический блок V (блок компаундирования и ввода наполнителей) состоит из стыковочного модуля  $D_5$ , насоса  $H-24$ , дозирочного насоса  $H-25$ , теплообменника  $TC-26$ , фильтра  $\Phi-27$ , инжекторного смесителя  $C-28$ , реактора  $P-29$ , скребкового теплообменника  $TC-30$ , многофункционального статического смесителя  $C-31$ . К стыковочному модулю  $D_5$  указанное оборудование подключается входом и выходом.

Технологический блок VI (блок ввода присадок и охлаждения) состоит из стыковочного модуля  $D_6$ , блока дозирочных насосов  $H-32$ , скребковых теплообменников  $TC-33, 34$ , инжекторного смесителя  $C-35$ , реактора  $P-36$ , многофункционального статического смесителя  $C-37$ , фильтра  $\Phi-38$ . К стыковочному модулю  $D_6$  указанное оборудование подключается входом и выходом.

Многофункциональные статические смесители  $C-8, 21, 31, 37$  состоят из трех секций, отличающихся структурой потоков и подключающихся к стыковочному модулю  $D_6$  индивидуально.

Гомогенизаторы (коллоидная мельница  $G-39$  и клапанный  $G-40$ ) подключаются непосредственно к коммутационному центру  $D$ . Как видно из функциональной схемы ГАПС производства смазочных материалов, технологическое оборудование сгруппировано по функциональной принадлежности в технологические блоки, каждый из которых включает локальный стыковочный модуль, а связь между блоками осуществляется через центральный диспетчер  $D$ .

Рассмотрим способы организации высокотемпературных непрерывных процессов получения пластичных смазок.

**Технологический блок I.** Масло 1 из демпфирующей емкости  $E-2$  дозирующим насосом  $H-6/1-2$  через стыковочный модуль  $D_1$  подается на фильтр  $\Phi-7/1$  и далее через модуль  $D_1$  в коммутационный центр  $D$ .

Присадка 1 из демпфирующей емкости  $E-1$  дозирочным насосом  $H-6/1-1$  через модуль  $D_1$  подается на фильтр  $\Phi-7/3$  и далее через модуль  $D_1$  в центр  $D$ .

Масло 2 из демпфирующей емкости  $E-3$  дозирочным насосом  $H-6/1-3$  через модуль  $D_1$  подается на фильтр  $\Phi-7/1$  и далее через модуль  $D_1$  в центр  $D$ .

Водный раствор или масляная суспензия гидроокиси щелочно-минерального металла из демпфирующей емкости  $E-4$  подается дозирующим насосом  $H-6/2-2$  через модуль  $D_1$  в центр  $D$ . Расплав кислоты с температурой  $80...90$  °С подается из демпфирующей емкости  $E-5$  дозирующим насосом  $H-6/2-3$  через модуль  $D_1$  в центр  $D$ . При необходимости повышения эффективности фильтрования какого-либо из сырьевых компонентов и в случае повышения производительности по фильтруемому сырьевому компоненту модуль  $D_1$  способен перенастроить порядок использования фильтров  $\Phi-7/1, 2, 3, 4$ , например, включая их последовательно для фильтрования любого из сырьевых компонентов.

Из технологического блока I сырьевые компоненты через модуль  $D_1$  и центр  $D$  поступают в технологический блок II (модуль  $D_2$ ). Однако при необходимости сырьевые компоненты могут быть перемешаны непосредственно в центре  $D$ , в распределительных каналах которого установлены специальные турбулизирующие элементы.

**Технологический блок II.** Сырьевые компоненты или смесь из центра  $D$  через модуль  $D_2$  подаются теплообменник  $T-11$ , где смесь подогревается до температуры  $90...100$  °С, а оттуда через модуль  $D_2$  смесь подается в смеситель  $C-8$ . Из смесителя  $C-8$  смесь через модуль  $D_2$  подается на фильтрование  $\Phi-9$ , затем – в теплообменник  $T-12$ , где нагревается до температуры  $120...140$  °С. Из теплообменника  $T-12$  смесь через модуль  $D_2$  и центр  $D$  подается в технологический блок III.

В зависимости от условий смешения и фильтрования модуль  $D_2$  обеспечивает различные последовательности включения технологического оборудования (табл. 8.1).

Кроме того, модуль  $D_2$  обеспечивает возможность посекционного подключения трехсекционного многофункционального статического смесителя  $C-8$ .

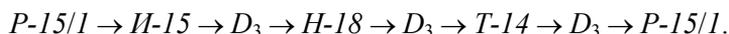
### 8.1. Последовательность включения оборудования в технологических блоках в зависимости от требований технологического регламента

Номер блока	Технологический режим	Последовательность включения оборудования
II	а) номинальный режим; б) фильтрование и смешение при высоких температурах; в) фильтрование и смешение при низких температурах	$T-12 \rightarrow C-8 \rightarrow \Phi-9 \rightarrow C-10 \rightarrow T-11$ $T-11 \rightarrow T-12 \rightarrow C-8 \rightarrow \Phi-9 \rightarrow C-10$  $\Phi-9 \rightarrow C-8 \rightarrow T-11 \rightarrow C-10 \rightarrow T-12$ ↓ $T-12$
III	а) при повышенной температуре обезвоживания; б) при температуре обезвоживания 150...180 °С	$P-15 \rightarrow И-15 \rightarrow H-18 \rightarrow T-14 \rightarrow P-5 \rightarrow D_3 \rightarrow H-13$ $P-15 \rightarrow И-15 \rightarrow H-18 \rightarrow P-15 \rightarrow D_3 \rightarrow T-4 \rightarrow H-13$
IV	а) ввод масла 2 в обезвоженный полупродукт с последующей его частичной термообработкой при температуре 220...280 °С; б) понижение максимальной температуры процесса до 220 °С	$Смесь \rightarrow D_3 \rightarrow D \rightarrow D_4 \rightarrow C-21 \rightarrow D_4 \rightarrow H-23/1 \rightarrow D_4 \rightarrow D_4$ $Масло 2 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_4 \rightarrow T-22$ $\rightarrow TC-19 \rightarrow D_4 \rightarrow H-32/2 \rightarrow D_4 \rightarrow TC-20 \rightarrow D_4 \rightarrow H-23/3 \rightarrow D_4 \rightarrow D$ $Смесь \rightarrow D_3 \rightarrow D \rightarrow D_4 \rightarrow H-23/1 \rightarrow D_4 \rightarrow TC-19 \rightarrow D_4 \rightarrow C-21 \rightarrow D_4$ $Масло 1 \text{ или } масло 2 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_4 \rightarrow H-23/2 \rightarrow T-22 \rightarrow D_4 \rightarrow TC-20 \rightarrow D_4 \rightarrow H-23/3 \rightarrow D_4 \rightarrow D$
V	а) фильтрование смазки при повышенной температуре 160...180 °С с последующим вводом наполнителя 1; б) охлаждение смазки в присутствии наполнителя 1; в) ввод наполнителя 1 в смазку после ее охлаждения;	$Смесь \rightarrow D \rightarrow D_5 \rightarrow \Phi-27 \rightarrow D_5 \rightarrow T-26 \rightarrow D_5 \rightarrow C-28 \rightarrow D_5$ ↑ Наполнитель 1 $\rightarrow M-29 \rightarrow D_5 \rightarrow H-24 \rightarrow D_5 \rightarrow C-31 \rightarrow XC-30 \rightarrow D_4 \rightarrow H-25 \rightarrow D_4 \rightarrow D$ $D \rightarrow D_5 \rightarrow C-28 \rightarrow M-29 \rightarrow D_5 \rightarrow H-24 \rightarrow D_5 \rightarrow T-26 \rightarrow D_5 \rightarrow XC-30 \rightarrow D_5 \rightarrow C-31 \rightarrow D_5 \rightarrow H-25 \rightarrow D_5 \rightarrow D$ $Смесь \rightarrow D \rightarrow D_5 \rightarrow T-26 \rightarrow D_5 \rightarrow XC-30 \rightarrow D_5 \rightarrow C-28 \rightarrow M-24 \rightarrow D_5$ ↑ Наполнитель 1 $\rightarrow D_5 \rightarrow H-24 \rightarrow D_5 \rightarrow C-31 \rightarrow D_5 \rightarrow H-25 \rightarrow D_5 \rightarrow D$

Продолжение табл. 8.1.

Номер блока	Технологический режим	Последовательность включения оборудования
V	г) стабилизация процесса структурообразования смазки с последующим вводом наполнителя	$Смесь \rightarrow D \rightarrow D_5 \rightarrow T-26 \rightarrow D_5 \rightarrow M-29 \rightarrow$ $\rightarrow D_5 \rightarrow H-24 \rightarrow D_5 \rightarrow C-31 \rightarrow D_5 \rightarrow C-28 \rightarrow$ $M-29 \rightarrow D_5 \rightarrow H-25 \rightarrow D_5 \rightarrow \uparrow$ <div style="text-align: right;"><i>Наполнитель 1</i></div> $\rightarrow XC-30 \rightarrow D_5 \rightarrow D$
VI	а) ввод наполнителя 2 в суспензию присадки 2 в масле при пониженной температуре 60...80 °С;  б) ввод наполнителя 2 в суспензию присадки 2 в масле при повышенной температуре 90...140 °С;  в) повышение требований по диспергируемости наполнителя 2 в смазке, содержащей присадку 2	$Суспензия присадки 2 в масле \rightarrow M-36 \rightarrow$ $\rightarrow D_6 \rightarrow H-32/2 \rightarrow D_6 \rightarrow \Phi-38 \rightarrow D_6 \rightarrow$ $\rightarrow C-35 \rightarrow D_6 \rightarrow T-33 \rightarrow D_6 \rightarrow M-36 \rightarrow$ $\uparrow \rightarrow D_6 \rightarrow H-32/3 \rightarrow D_6 \rightarrow$ <i>Наполнитель 2</i> $\rightarrow C-37 \rightarrow D_6 \rightarrow XC-34$  $Суспензия присадки 2 в масле \rightarrow M-36 \rightarrow$ $\rightarrow D_6 \rightarrow H-32/1 \rightarrow D_6 \rightarrow \Phi-38 \rightarrow D_6 \rightarrow$ $\rightarrow T-33 \rightarrow C-37 \rightarrow D_6 \rightarrow H-32/3 \rightarrow D_6 \rightarrow$ $\uparrow \rightarrow C-37 \rightarrow$ <i>Наполнитель 2</i> $\rightarrow D_6 \rightarrow XC-34$  $Смазка \rightarrow D \rightarrow D_5 \rightarrow T-33 \rightarrow D_5 \rightarrow H-32/1 \rightarrow$ $D_6 \rightarrow C-37 \rightarrow M-36 \rightarrow D_6 \rightarrow H-32/2 \rightarrow$ $\uparrow$ $Суспензия присадки 2 в масле$ $\rightarrow C-35 \rightarrow D_6 \rightarrow H-32/3 \rightarrow D_6 \rightarrow C-37 \rightarrow$ $\rightarrow D_6 \rightarrow XC-34 \rightarrow D_5 \rightarrow D$

**Технологический блок III.** Смесь из центра  $D$  поступает в технологический блок III (модуль  $D_3$ ). Из модуля  $D_3$  смесь поступает в трубчатый реактор  $P-15/1$ , смонтированный в камере испарителя  $I-15$ , где нагревается до температуры 150...180 °С, и далее через модуль  $D_3$  насосом  $H-18$  производится циркуляция смеси по схеме:



Пары воды откачиваются из верхней части испарителя  $I-15$  вакуум-насосом  $H-17$  и предварительно конденсируются в теплообменнике  $T-16$ . Обезвоженная смесь дозирующим насосом  $H-13$  из испарителя  $I-15$  с температурой 180...200 °С подается в центр  $D$  и далее в технологический блок IV.

В зависимости от условий перемешивания модуль  $D_3$  обеспечивает следующие последовательности включения оборудования блока III (см. табл. 8.1).

Изменение технологических условий работы блока III позволяет регулировать процессы структурообразования пластичных смазок.

**Технологический блок IV.** Смесь из центра  $D$  поступает в технологический блок IV (модуль  $D_4$ ). Из модуля  $D_4$  смесь дозирующим насосом  $H-23/1$  подается в скребковый теплообменник  $TC-19$ . Для нагревания до более высокой температуры (260...280 °С) смесь из теплообменника  $TC-19$  поступает в модуль  $D_3$ , откуда насосом  $H-23/2$  подается в теплообменник  $TC-20$ .

После термообработки продукт из теплообменника  $TC-20$  подается в многофункциональный статический смеситель  $C-21$ , где производится частичное охлаждение продукта до 200 °С маслом 2. Управление последовательностью включения оборудования блока IV в зависимости от требований технологического регламента многоассортиментного производства осуществляется модулем  $D_4$  в соответствии с табл. 8.1.

Подключение трехсекционного статического смесителя  $C-21$  посекционно через модуль  $D_4$  создает условия более точного регулирования протекающих в блоке процессов структурообразования пластичных смазок.

**Технологический блок V.** Термически обработанный и частично охлажденный до 220 °С продукт из центра  $D$  поступает в технологический блок V (модуль  $D_5$ ). Из модуля  $D_5$  продукт поступает в фильтр  $\Phi-27$ , откуда модуль  $D_5$  в теплообменник  $T-26$ , где охлаждается до 180...200 °С, и далее подается в инжекторный смеситель  $C-28$ , где производится диспергирование порошкообразного наполнителя 1 в продукте.

Из смесителя  $C-28$  продукт через модуль  $D_5$  поступает в емкость-реактор  $M-29$  компаундирования, откуда смазка через модуль  $D_5$  циркулирует по схеме

$$M-29 \rightarrow D_5 \rightarrow H-24 \rightarrow D_5 \rightarrow C-31 \rightarrow D_5 \rightarrow XC-30 \rightarrow D_5 \rightarrow M-29,$$

где смазка охлаждается до температуры 120...160 °С.

Из реактора  $M-29$  смазка через модуль  $D_5$  дозирующим насосом  $H-25$  подается в центр  $D$ . В зависимости от требований регламента реализуемого технологического процесса модуль  $D_5$  обеспечивает следующие варианты подключения оборудования блока V (см. табл. 8.1).

Заметим, что посекционное включение статического смесителя  $C-31$  к модулю  $D_5$  позволяет подбирать оптимальные режимы процессов структурообразования пластичных смазок, условия фильтрации и диспергирования компонентов, что соответствует производству смазок с высокими качественными характеристиками.

**Технологический блок VI.** Смазка из блока V поступает через модуль  $D$  в технологический блок VI (модуль  $D_6$ ). Из модуля  $D_6$  смазка дозировочным насосом  $H-32/1$  подается в статический смеситель  $C-37$ . Одновременно в емкость реактора  $M-36$  поступает суспензия присадки 2 в масле, которая из емкости-реактора  $M-36$  через модуль  $D_6$ , фильтр  $\Phi-38$  и теплообменник  $T-33$  дозирующим насосом  $H-32/2$  подается в инжекторный смеситель  $C-35$ , где производится дис-

пергирование порошкообразного наполнителя 2 в суспензии присадки 2. Суспензия присадки 2 и наполнителя 2 готовится по следующей схеме:

*Суспензия присадки 2 в масле* → *M-36* → *D<sub>6</sub>* → *T-33* → *D<sub>6</sub>* → *Φ-38* → *D<sub>6</sub>* →  
→ *H-32/2* → *D<sub>6</sub>* → *C-35* → *D<sub>6</sub>* → *M-36* → *D<sub>6</sub>* → *H-32/3* → *D<sub>6</sub>* → *C-37*.

Из статического смесителя *C-37* смазка через модуль *D<sub>6</sub>* подается в скребковый теплообменник *ТС-34*, а затем через модуль *D<sub>6</sub>* в центр *D*.

В зависимости от требований технологического регламента модуль *D<sub>6</sub>* реализует следующие варианты подключения оборудования блока VI (см. табл. 8.1). Изменение условий работы блока VI позволяет регулировать процессы диспергирования порошкообразных наполнителей 2 в суспензии присадки 2 и в смазке.

### Гомогенизация смазки

В зависимости от требований регламента реализуемого технологического процесса гомогенизация смазки может производиться как в коллоидной мельнице *Г-39*, так и в клапанном гомогенизаторе *Г-40*. Подключение гомогенизаторов к общей схеме процесса осуществляется центральным коммутирующим устройством *D*.

Благодаря наличию системы стыковочных модулей *D<sub>1</sub>...D<sub>6</sub>* и коммутационного центра (диспетчера) *D* возможны организация и управление несколькими технологическими установками, функционирующими одновременно в составе ГАПС производства смазочных материалов.

А. Непрерывное производство пластичной смазки (КТ26-Х1-Н1) при температуре 200...210 °С. Схема подключения блоков и оборудования:

*Блок I* → *D* → *Блок III* → *D* → *Г-39*.

Б. Непрерывное производство безводной кальциевой смазки (КИ1А-Х1):

*Блок I* → *D* → *Блок II* → *D* → *Блок VI* → *D* → *Г-40*.

В. Периодическое производство пластичной смазки при температуре 200...220 °С в технологическом блоке V. Сырьевые компоненты загружаются в емкость-реактор *M-29*. Наполнитель 1 подается в смазку через инжекторный смеситель *C-28*. Готовая смазка из реактора *P-29* через модуль *D<sub>5</sub>* дозирующим насосом *H-25* подается в скребковый холодильник *ХС-30* и далее через модуль *D<sub>5</sub>* и центр *D* в гомогенизатор *Г-40*.

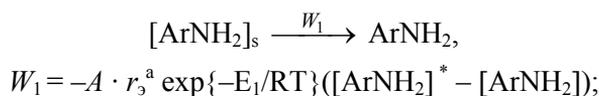
ГАПС пластичных смазок позволяет существенно повысить эффективность технологических процессов получения смазок и других смазочных материалов, расширить ассортимент выпускаемых продуктов, осуществить регулирование процессов как в технологических блоках, так и во всей системе в целом за счет изменения последовательности включения аппаратов и технологических блоков в соответствии с изменениями требований технологического регламента производства.

### ГАПС органических полупродуктов и красителей

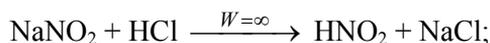
Азокрасители (азопигменты) обладают чистотой и яркостью цветового тона, высокой укрывистостью и красящей способностью, устойчивостью к растворителям и вследствие этого играют важную роль в эстетическом оформлении текстильных материалов, меха, кожи, полиграфической продукции, лакокрасочных материалов и т.д. Их качество определяется химической природой, степенью чистоты, кристаллической структурой и дисперсным составом пигментов, формируемыми, главным образом, в процессе синтеза. Действующая периодическая технология синтеза азопигментов характерна нестационарностью режимов, низким выходом и нестабильностью качества производимых пигментов. Принципиально проблемы повышения и стабилизации качества пигментов можно решить путем разработки аппаратурно-технологического оформления непрерывной технологии получения азопигментов.

Азопигменты получают при последовательном проведении реакций диазотирования и азосочетания – нелинейных процессов тонкого органического синтеза. Обзор литературных данных и анализ результатов проведенных нами экспериментальных исследований позволил установить перечень наиболее вероятных реакций, протекающих при синтезе азопигментов [44 – 47]:

– растворение твердой фазы амина в среде соляной кислоты:



– образование диазотирующего агента ( $\text{HNO}_2$ ):



– целевая реакция диазотирования:



$$W_2 = k_{02} \exp\{-E_2/RT\} [\text{ArNH}_2] [\text{HNO}_2] [\text{HCl}]^{0,87};$$

– разложение азотистой кислоты:

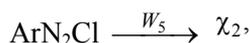


$$W_3 = k_{03} \exp\{-E_3/RT\} [\text{HNO}_2]^4 / P_{\text{NO}};$$

– образование диазосмол при диазотировании:

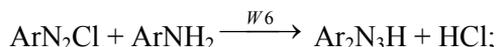


$$W_4 = k_{04} \exp\{-E_4/RT\} [\text{ArN}_2\text{Cl}] [\text{HNO}_2],$$

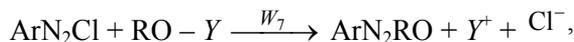


$$W_5 = k_{05} \exp\{-E_5/RT\} [\text{ArN}_2\text{Cl}];$$

– образование диазоаминосоединений:

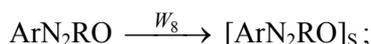


– целевую реакцию получения азопигмента:

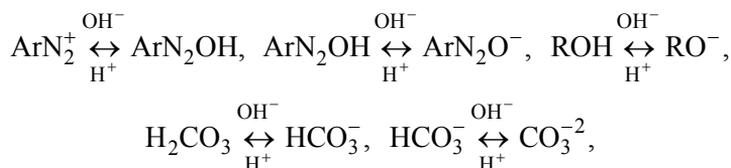


$$W_7 = k_7 [\text{ArN}_2\text{Cl}][\text{RO} - \text{Y}] = \frac{k_7^0 [\text{ArN}_2\text{Cl}][\text{RO} - \text{Y}]}{(1 + k_w / (k_b [\text{H}^+]) + k_a k_w / (k_b [\text{H}^+]^2)) (1 + [\text{H}^+] / k_p)};$$

– кристаллизацию азопигмента:



– реакции кислотно-основного обмена:



где  $\text{ArNH}_2$  – ароматический амин;  $\text{ArN}_2\text{Cl}$  – диазосоединение;  $(\text{RO} - \text{Y})$  – азосоставляющая;  $\text{ArN}_2\text{RO}$  – азопигмент;  $[X]$  – концентрация вещества  $X$ ;  $\chi_1, \chi_2, \chi$  – диазосмолы;  $A, \alpha, k_{0i}, E_i, K_5, N_5$  – кинетические константы процессов растворения твердой фазы амина и химического процесса диазотирования;  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная постоянная;  $P_{\text{NO}}$  – парциальное давление нитро-ных газов;  $k_7^0, k_w, k_b, k_a, k_p$  – кинетические коэффициенты процесса азосочетания и константы кислотно-основного равновесия;  $[\text{H}^+]$  – концентрация ионов водорода в реакционной смеси.

Поскольку целевая реакция азосочетания протекает между катионом диазотирования и анионом азосоставляющей, то для расчета концентраций ионизированных форм необходимо учитывать кислотно-основные равновесия между различными формами диазосоединения, азосоставляющей, а также между частицами  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , образующимися при добавлении в реакционную среду раствора соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Содовый раствор используют в технологии для поддержания оптимального профиля pH-среды сочетания.

В результате проведенных экспериментальных исследований [44] установлено, что скорость образования кристаллов азопигментов удовлетворительно описывается выражением

$$I = k_I ([\text{ArN}_2\text{RO}] - [\text{ArN}_2\text{RO}]^*)^{N_I},$$

где  $[\text{ArN}_2\text{RO}]$  и  $[\text{ArN}_2\text{RO}]^*$  – соответственно текущая и равновесная концентрации пигмента в растворе.

В качестве наиболее правдоподобной гипотезы о кинетике роста кристаллов, удовлетворяющей экспериментальным данным, принята гипотеза о диффузионно-кинетической области роста кристаллов:

$$\eta([\text{ArN}_2\text{RO}]) = 1/(\eta_K^{-1} + \eta_D^{-1}), \quad \eta_K = k_K([\text{ArN}_2\text{RO}] - [\text{ArN}_2\text{RO}]^*)^{N_K},$$

$$\eta_D = D([\text{ArN}_2\text{RO}] - [\text{ArN}_2\text{RO}]^*)/(\rho_{\text{п}}r),$$

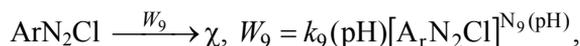
где  $\eta_K$  и  $\eta_D$  – скорости роста кристаллов соответственно в диффузионной и кинетической областях;  $k_L, N_L, k_K, N_K, D$  – кинетические коэффициенты уравнений образования и роста кристаллов пигмента;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пигмента, коэффициент диффузии  $D$  рассчитывается по уравнению Эйнштейна-Смолуховского  $D = RT/(6\pi N_A \mu r_s)$ ,  $N_A$  – число Авогадро;  $\mu$  – динамическая вязкость суспензия пигмента;  $r_s$  – эквивалентный радиус кристалла пигмента.

Связь между скоростью кристаллизации и гранулометрическим составом  $\psi(r)$  кристаллов азопигментов можно описать зависимостью

$$W_8 = \frac{\gamma \rho_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} \int_0^{\infty} r^2 \eta(r) \psi(r) dr,$$

где  $\gamma$  – коэффициент формы кристалла;  $M_{\text{п}}$  – молекулярная масса пигмента.

Экспериментальное исследование процесса разложения диазосоединения на стадии азосочетания показали, что процесс может развиваться по нескольким механизмам, роль каждого из которых зависит от кислотности среды: скорость разложения максимальна в слабощелочной области, а порядок реакции меняется с первого на второй при переходе от кислой к щелочной области. При описании кинетики разложения использовали уравнение



где аппроксимирующие зависимости для  $k_9(\text{pH})$  и  $N_9(\text{pH})$  имеют вид

$$\lg k_9 = \begin{cases} 5,987 + 0,428\text{pH}, & \text{pH} < 7, \\ 19,86 + 4,428\text{pH} - 0,286\text{pH}^2 - 4,7510^{-4}\text{pH}^3, & 7 \leq \text{pH} \leq 9,5, \\ 5,504 - \text{pH}, & \text{pH} > 9,5; \end{cases}$$

$$\lg N_9 = \begin{cases} 1, & \text{pH} < 7, \\ 0,4 - 3,32 \cdot 10^{-3}\text{pH}^2 + 2,21 \cdot 10^{-3}\text{pH}^3, & 7 \leq \text{pH} \leq 9,5, \\ 2, & \text{pH} > 9,5. \end{cases}$$

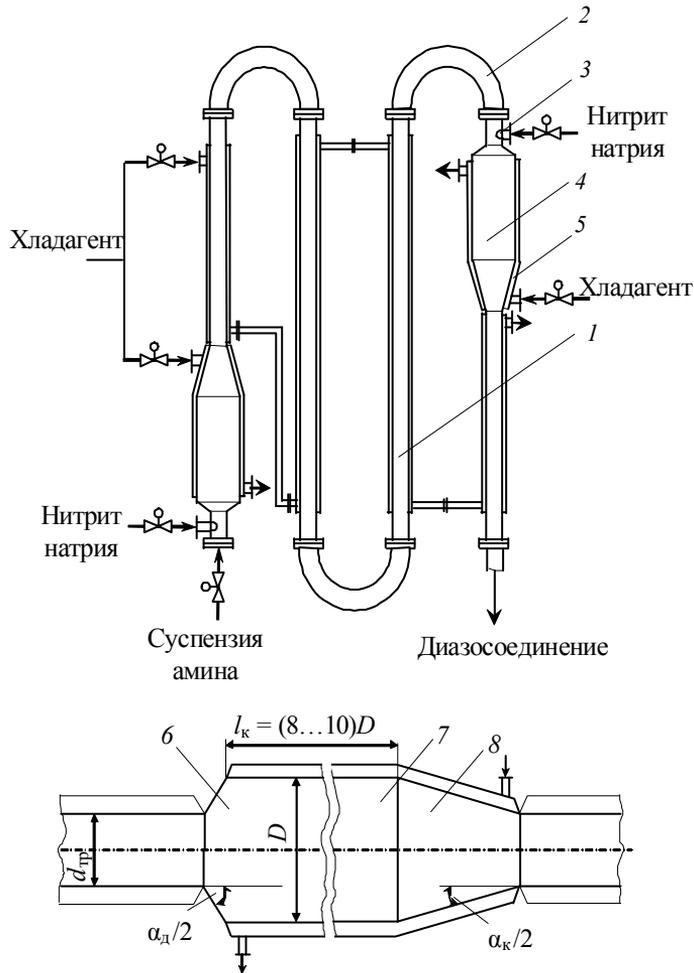
Среди проблем, наиболее актуальных для создания энерго- и ресурсосберегающих технологий высокой экологической чистоты, следует выделить разработку принципиально новых подходов к аппаратурно-технологическому оформлению прогрессивных ХТП с использованием методов интегрированного проектирования, математического моделирования, уравнений химической кинетики, теплопередачи, диффузии, конвекции и т.п. В первую очередь это касается жидкофазных процессов с участием твердой фазы, протекающих с весьма высокими скоростями реакций (характерное время химической реакции  $\sim 10^{-1} \dots 10^{-3}$  с), когда в зоне реакции наблюдается неоднородное пространственно-временное распределение температуры, концентрации реагентов и соответственно глубины реакции. Такие процессы в действующих производствах органического синтеза, где обычно используются объемные реакции смешения, плохо управляемы и, как следствие, характеризуются заметным снижением выхода конечного продукта, повышенным содержанием побочных продуктов, а при получении органических пигментов – неблагоприятным изменением гранулометрического состава кристаллов пигмента, что приводит к ухудшению их колористических показателей.

Принципиально новым решением в области аппаратурного оформления быстрых химических процессов является разработка турбулентных трубчатых реакторных установок различных модификаций [48]. Трубчатый реактор с диффузор-конфузорными устройствами, позволяющий осуществлять быстрые химические процессы в высокотурбулентных потоках, представлен на рис. 8.14.

Основными элементами турбулентного трубчатого реактора являются вертикально расположенные трубчатые модули 1, соединительные колена 2, форсунки для распыления нитрита натрия 3, диффузор-конфузорные устройства турбулизации потока 4 и теплообменная рубашка 5. Солянокислая суспензия ароматического амина непрерывно подается в реактор одновременно с водным раствором нитрита натрия, подача которого распределена по длине трубчатой части реактора. Подача раствора нитрита натрия в реактор осуществляется через форсунки непосредственно перед диффузор-конфузорными устройствами, распределенными по длине реактора.

Отличительной особенностью турбулентного трубчатого реактора является наличие диффузор-конфузорных устройств турбулизации потока, работоспособность которых определяется условиями обеспечения турбулентности гидродинамического режима течения. Основными параметрами, определяющими эти условия, являются диаметр диффузор-конфузорных камер смешения  $D$ , длина диффузор-конфузорной камеры  $l_k$ , угол расширения диффузора  $\alpha_d$  и сужения конфузора  $\alpha_k$ , а также концентрация амина в питании реактора. Конструктивными параметрами реактора являются длина реактора  $L$ , состоящего из четырехметровых модулей, внутренний диаметр трубы модуля  $d_{тр}$  и объем камеры смешения  $V_{см}$ .

В диффузор-конфузорных устройствах с углом расширения  $\alpha_d > 40$  происходит полный отрыв потока от стенок диффузора с образованием интенсивных обратных токов и завихрений. Отрыв потока распространяется дальше на участок



**Рис. 8.14. Малогабаритный турбулентный трубчатый реактор с камерами смешения диффузор-конфузорного типа (комбинированный реактор):**

$d_{\text{тр}}$  – диаметр трубчатой части реактора;  $D$  – диаметр камеры смешения;  
 $l_k$  – длина камеры смешения;  $\alpha_d$  – угол расширения диффузора;  $\alpha_k$  – угол сужения конфузора; 1 – трубчатый модуль; 2 – колено; 3 – форсунки для распыления нитрита натрия; 4 – диффузор-конфузорное устройство; 5 – теплообменная рубашка; 6 – диффузор; 7 – прямой участок; 8 – конфузор

постоянного сечения за диффузором, поэтому чтобы сгладить турбулизацию потока реакционной среды за диффузором необходимо наличие участка цилиндрической формы. На этом участке полное выравнивание потока по сечению достигается на расстоянии  $l_k = (8 \dots 10)D$ , где  $D$  – диаметр выходного сечения диффузора.

Конфузор служит для окончательного выравнивания потока при переходе из камеры смешения в трубчатую часть реактора. Для выравнивания профиля скорости потока целесообразно принять угол сужения конфузора  $\alpha_k$  равным

30...40°. Следовательно, для более интенсивного подвода нитрита натрия в реакционную зону будем применять камеры смешения с размерами: диаметр камеры –  $D = 0,1$  м, длина камеры –  $l_k = 1,0$  м, углы расширения диффузора –  $\alpha_d = 60^\circ$  и сужения конфузора –  $\alpha_k = 30^\circ$ .

Таким образом, при моделировании процесса тонкого органического синтеза учитывается смешение дозируемых в аппарат компонентов в устройстве, смонтированном на входе в аппарат; химическое взаимодействие в трубчатой части и камерах смешения; изменение условий протекания элементарных процессов химического взаимодействия при наличии в реакторе устройств турбулизации потока (диффузор-конфузоров или камер кинетического смешения).

В целом работоспособность турбулентного трубчатого реактора определяется условиями неосаждения агрегатов твердой фазы амина в вертикальных трубах, обеспечения заданной производительности и турбулентного режима течения реакционной смеси в зоне реакции. Основными параметрами, обеспечивающими выполнение этих условий при заданной производительности, являются внутренний диаметр вертикальной трубы  $d_{тр}$  и концентрация твердой фазы в питании реактора  $[C_A]_S$ . Чтобы избежать нарушения условий работоспособности реактора необходимо выбрать такой диаметр трубы, которому будет соответствовать максимально возможный интервал допустимых концентраций твердой фазы для выбранной производительности. При заданной производительности реакторной установки –  $Q = 1000$  т/год максимально допустимыми значениями диаметра трубы реактора диазотирования и концентрации  $[C_A^{(0)}]_S$  твердой фазы ароматического амина являются –  $d_{тр} = 0,04$  м и  $[C_A^{(0)}]_S = 300...400$  моль/м<sup>3</sup>.

Математическая модель непрерывного процесса синтеза азопигментов в турбулентной трубчатой реакторной установке представляет систему нелинейных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных для трубчатой части и систему нелинейных алгебраических уравнений для камер смешения реакторной установки [46, 49].

Техническое задание на проектирование турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования включает выполнение следующих требований: выход диазосоединения –  $K_D \geq 97,0\%$ ; «проскок» твердой фазы амина в реакторе диазотирования –  $\Pi_n \leq 0,25\%$ ; содержание диазо-смол в диазорастворе –  $\Pi_\chi \leq 0,9\%$ ; содержание нитрозных газов в диазорастворе –  $\Pi_\sigma \leq 5\%$ , показатели качества  $Y_i, i = 1, 2, \dots, 8$  синтезируемых азопигментов должны соответствовать показателям  $Y_i^T$  типового образца.

Выполнение вышеперечисленных требований ТЗ на проектирование реакторных установок необходимо обеспечить в условиях неопределенности отдельных кинетических параметров химических реакций, процесса кристаллизации азопигментов и ряда технологических переменных (например, концентраций твердой фазы амина и азосоставляющих в питании реакторной установки синтеза азопигментов).

Непрерывный технологический процесс синтеза азопигментов алого центрированного, лакокрасочного и желтого светопрочного в ГАПС непрерывного действия производительностью 1000 т пигментов/год осуществляется следующим образом (рис. 8.15) [50]. Солянокислую суспензию амина (например, 3-нитро-4-аминотолуола) с заданной концентрацией приготавливают в аппарате 1. Процесс diazотирования 3-нитро-4-аминотолуола нитритом натрия в присутствии 2,5...3-кратного избытка соляной кислоты осуществляют непрерывно в турбулентном трубчатом реакторе diazотирования 2, куда солянокислая суспензия амина подается центробежным насосом 3. Водный раствор нитрита натрия непрерывно и распределенно (по длине трубчатого реактора) подают в реакторную установку 2 с помощью системы дозирующих насосов 4 таким образом, чтобы избыточная концентрация азотистой кислоты (diazотирующего агента) в зоне реакции diazотирования находилась в пределах 0,2...0,5 г/л. Процесс diazотирования осуществляют при турбулентном режиме движения потока реакционной массы при заданном (оптимальном) температурном профиле. Полученный diazораствор непрерывно подается на стадию очистки, которая осуществляется с помощью ультрацентрифуги 5, и далее очищенный раствор diazосоединения самотеком поступает в турбулентный трубчатый реактор азосочетания 7. В реактор 7 одновременно подают растворы азосоставляющей ( $\beta$ -нафтолята или анилида ацетоуксусной кислоты в зависимости от марки пигмента) и наполнителя (хлористого бария, гидроокиси алюминия). Подача щелочного агента осуществляется распределенно по длине реактора 7 для формирования оптимального профиля pH-среды сочетания.

Суспензии азопигментов накапливаются в специальных аппаратах-сборниках для проведения последующих операций термообработки и транспортировки на заключительные стадии физико-механической обработки (фильтрования, сушки и размола).

Автоматическая система регулирования переменных состояния реакторных установок diazотирования и азосочетания включает контуры I – VII, реализующих найденные при решении задачи стохастической оптимизации оптимальные значения режимных (управляющих) переменных. В контуре I стабилизируется оптимальное значение расхода солянокислой суспензии амина (датчик (Д1), регулятор (Р1), клапан (К1)) с коррекцией по концентрации азотистой кислоты в третьей зоне реакторной установки diazотирования (Д2<sub>(1, 2, 3)</sub>, корректирующий регулятор (КР 1)). Оптимальное распределение подачи нитрита натрия в зоны реакторной установки diazотирования обеспечивается системой высокоточных дозирующих насосов. В контурах II – IV обеспечивается реализация оптимального профиля температуры в зонах 1, 2, 3 diazотирования (Д3<sub>(1, 2, 3)</sub>, Р2<sub>(1, 2, 3)</sub>, К2<sub>(1, 2, 3)</sub>). Соотношение расходов азосоставляющей и diazораствора в питании реакторной установки азосочетания поддерживается в контуре V с помощью Д4, Д5, Р3 и К3. Наконец, оптимальный профиль pH-среды азосочетания реализуется в контурах VI и VII (Д6<sub>(1, 2)</sub>, Д7<sub>(2)</sub>, Р4<sub>(1, 2)</sub>, КР2, К4<sub>(1, 2)</sub>).

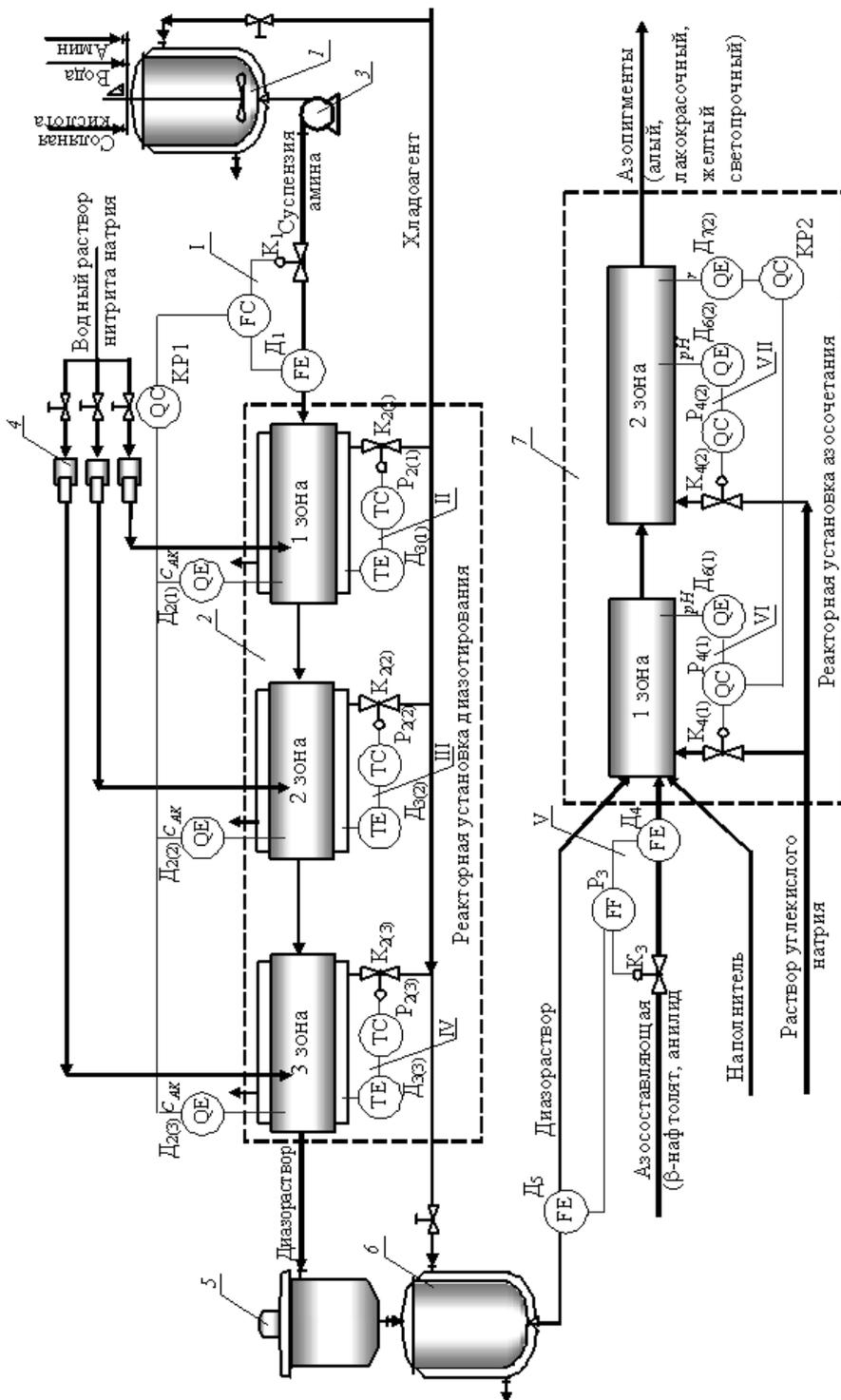


Рис. 8.15. ГАПС азокрасителей и пигментов

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите типичных представителей малотоннажных химических производств и их основные отличительные особенности.

2. Приведите основные понятия и определения: технологической операции, технологической стадии, партии продукта, технологического цикла, лимитирующей стадии, материального индекса, технологического маршрута, диаграммы Гантта, расписания.

3. Классифицируйте ХТС в соответствии со следующими классификационными признаками (А – по способу функционирования; Б – по количеству выпускаемой продукции; В – по типам технологической и организационных структур; Г – по количеству стадий):

- многостадийные;
- гибкие;
- многоассортиментные;
- непрерывные;
- совмещенные;
- одностадийные;
- периодические;
- индивидуальные;
- полностью совмещенные;
- дискретно-непрерывные;
- частично совмещенные.

4. Перечислите: А – общесистемные принципы создания ГАПС и Б – специфические особенности:

- иерархичность;
- гибкость;
- открытость;
- управляемость;
- модульность;
- устойчивость;
- интегрированность;
- эмерджентность;
- целенаправленность.

5. Каковы основные атрибуты гибких автоматизированных ХТС?

- низкая производительность;
- изменчивость ассортимента;
- многопродуктовость;

- переменная структура;
- возможность выпуска на одном оборудовании нескольких продуктов;
- интеграция всего цикла производства;
- использование средств автоматизации.

6. Выберите правильные определения (*A – ХТС; B – гибкие автоматизированные ХТС; B – ГАПС*):

– Интегрированная производственная система, ориентированная на выпуск многоассортиментной продукции нефиксированной номенклатуры; она создается на основе многофункционального технологического оборудования, средств транспорта и система складов. Система способна за непродолжительное время и при минимальных затратах труда и материальных ресурсов адаптироваться к изменению ассортимента продукции, видов и состава сырья, технологических процессов.

– Совокупность взаимосвязанных технологическими потоками и действующих как единое целое аппаратов, в которых осуществляется определенная последовательность технологических операций (подготовка сырья, собственно химическое превращение и выделение целевых продуктов).

– Непрерывные, дискретно-непрерывные или периодические (дискретные) производства многономенклатурной продукции с часто меняющимся ассортиментом и планом выпуска.

7. Выберите правильные сопоставления (*A – модульный принцип организации схем позволяет ...; B – многостадийная ХТС позволяет ...; B – аппаратурный блок позволяет ...*):

– реализовать выпуск одного или нескольких целевых продуктов (полупродуктов) на единой технологической схеме;

– реализовать выпуск одного целевого продукта (полупродукта) в технологическом цикле последовательных ХТП;

– реализовать несколько одностадийных химико-технологических процессов на одном аппаратурном оформлении.

8. Укажите возможные и предпочтительные способы выпуска продукции для (*A – полностью совмещенных или гибких схем; B – частично совмещенных или гибких схем*):

- последовательная наработка в полном объеме;
- выпуск группами;
- по одной партии продукта в одном цикле.

9. Укажите специфические признаки гибких химических производств периодического действия:

- наличие переналадки оборудования;

- промывка (чистка) оборудования;
- дискретность конструктивных параметров;
- различие материальных потоков при производстве продуктов;
- необходимость согласования работы соседних аппаратов;
- избыточность оборудования;
- многостадийность;
- изменяемость ассортимента;
- простои оборудования;
- низкий выход целевого продукта по отношению к исходному сырью.

10. Назовите особенности архитектуры ГАПС многоассортиментного производства смазочных материалов.

11. Опишите устройство технологических блоков и коммутационного центра (диспетчера) ГАПС многоассортиментного производства смазочных материалов.

12. Опишите устройство малогабаритного турбулентного трубчатого реактора тонкого органического синтеза и особенности построения ГАПС азопигментов.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ РАБОТЫ**

В соответствии с рабочими учебными планами студенты (бакалавры, специалисты, магистранты) выполняют и защищают выпускные работы и дипломные проекты.

#### **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

Проектирование и научное исследование – самостоятельная работа студента под руководством преподавателя выпускающей кафедры, основной целью которой является развитие и закрепление теоретических знаний и расчетно-графических навыков при решении практических инженерных и научно-исследовательских проблем с использованием последних достижений науки и техники, в том числе информационных технологий.

Тематика выпускных работ и дипломных проектов, как правило, направлена на решение следующих задач:

- создание новых энергосберегающих и малоотходных технологических процессов и производств;
- разработка прогрессивного технологического оборудования на основе современных достижений науки и техники;
- модернизация действующих технологических машин, аппаратов и комплексов;
- создание экспериментальных стендов и оборудования для проведения научно-исследовательских работ;
- разработка подсистем автоматизированного расчета технологических процессов, аппаратов и производственных систем, анализа эффективности их функционирования методом математического моделирования и вычислительного эксперимента;
- участие в разработке мультимедийных приложений для учебников и учебных пособий,готавливаемых на выпускающей кафедре;
- разработка прогрессивных методов монтажа и ремонта технологических машин и оборудования;
- механизация и роботизация трудоемких ручных операций при эксплуатации и ремонте технологического оборудования химических производств;
- разработка мероприятий и технологического оборудования по обеспечению экологической безопасности и охране окружающей среды.

При проектировании и научно-исследовательских работах на первый план выдвигаются вопросы повышения технического уровня производства, качества производимой продукции, эффективности использования оборудования.

В зависимости от рейтинга студенту выдается задание на выполнение типовых выпускных работ и дипломных проектов, проекта с исследовательской частью или исследовательской выпускной работы.

Выпускная работа (дипломный проект) состоит из расчетно-пояснительной записки (РПЗ) и графической части (чертежей, графиков), содержание и объем которых определяется видом выпускной работы (дипломного проекта).

## **1. ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**

Тематика выпускных работ и дипломных проектов определяется выпускающей кафедрой, исходя из предложений промышленных предприятий, НИИ и проектных организаций, которые являются базами производственной практики студентов. Темы выпускных работ, дипломных проектов и их содержание подлежат рассмотрению на заседании кафедры.

Студент, получив тему выпускной работы или дипломного проекта, заполняет совместно с руководителем перед прохождением производственной практики бланк задания с перечислением задач предстоящей работы. В соответствии с темой выпускной работы или дипломного проекта студент в процессе прохождения практики собирает исходные материалы для проектирования, намечает с руководителями от университета и базы практики пути модернизации технологических машин и оборудования с целью повышения уровня энерго- и ресурсосбережения, улучшения качества выпускаемой продукции и повышения технико-экономических показателей производства, повышения экологической безопасности и т.п.

Студент работает в дальнейшем под руководством преподавателя, который консультирует его и контролирует график выполнения выпускной работы или дипломного проекта. При дипломном проектировании выполнение студентом экономического обоснования, обеспечения БЖД обслуживающего персонала, разработки функциональной схемы автоматизации и чертежей осуществляется при участии нормоконтролера и преподавателей-консультантов соответствующих кафедр.

Следует особо подчеркнуть, что руководитель работы, консультанты и нормоконтролер помогают студенту в достижении требуемого уровня выпускной работы и научных исследований, не давая при этом готовых решений. Они не несут ответственности за график выполнения и качество работы. Студент является единоличным автором работы и несет всю ответственность за технический уровень и качество выпускной работы.

Готовый проект и результаты научных исследований студент представляет для проверки руководителю за две недели до предварительной защиты, на которой определяется степень готовности выпускной работы, научно-исследовательской работы и самого защищаемого. После предварительной защиты выпускная работа со всеми подписями и отзывом руководителя представляется студентом заведующему кафедрой (за неделю до защиты на ГАК) для просмотра и

подписи. При выполнении всех требований, предъявляемых к выпускной работе (дипломному проекту или научно-исследовательской выпускной работе), заведующий кафедрой подписывает чертежи, пояснительную записку, дает письменное заключение по представленным материалам и представляет выпускную работу (дипломный проект) на рецензию.

Студент, не вышедший по уважительной причине на защиту выпускной работы в срок, может быть допущен к защите до конца текущего календарного года. Студент, не допущенный к защите выпускной работы по неуважительной причине и отчисленный из университета, должен восстановиться в число студентов следующего учебного года и повторить заново весь цикл подготовки выпускной работы (дипломного проекта) к защите.

Для проведения защиты выпускных работ создается и утверждается приказом ректора Государственная аттестационная комиссия (ГАК), в состав которой входят ведущие специалисты промышленных предприятий, НИИ, а также профессора и доценты выпускающих и общеинженерных кафедр университета и других профильных вузов.

Графики выполнения и защиты выпускных работ составляются заранее и вывешиваются на доске объявлений выпускающей кафедры.

Защита выпускной работы (дипломного проекта) – ответственный акт подведения итогов обучения студента в вузе. Существенную роль при этом играет доклад, в котором студент должен лаконично и понятно изложить суть разработанных в выпускной работе решений и предложений. Продолжительность доклада должна быть не более 10 минут. Рекомендуется следующая структура доклада:

- раскрытие актуальности и целесообразности темы, постановка задач, решаемых в ходе работы (1 мин);
- краткое изложение методики исследований или технологии проектируемого производства (2 мин);
- изложение решений принятых при компоновке технологического оборудования (1 мин);
- изложение конструкции и принципа действия модернизируемых технологической машины, аппарата и оборудования, освещение конкретных технических решений или изложение результатов научных исследований (5 мин);
- оценка эффективности проекта (0,5 мин);
- выводы по результатам работы (0,5 мин).

Доклад должен быть неразрывно связан с графической частью проекта, несущей наглядную информацию о результатах исследований, технических разработках и сопровождаться ссылками на соответствующие графики и чертежи. Вся графическая документация должна быть расположена в порядке изложения материала в докладе.

После доклада члены комиссии задают вопросы, на которые студент должен дать исчерпывающие ответы. Затем зачитывается рецензия на проект и предоставляется слово дипломнику для ответа на замечания рецензента.

## 2. СТРУКТУРА, ОБЪЕМ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Ниже приведены рекомендации по структуре и объему пояснительной записки и графической части типовых проектов, т.е. разработанных по материалам, собранным при прохождении практики студентами на предприятиях, связанных с выпуском продукции не машиностроительного профиля. Дипломные проекты, выполненные по материалам машиностроительных заводов, могут не включать разделы по разработке принципиальной технологической схемы и компоновке оборудования. В этом случае схема автоматизации аппарата может быть представлена только в пояснительной записке выпускной работы (дипломного проекта).

Структура и объем выпускных работ для студентов всех форм обучения одинаковы. Объем пояснительной записки выпускной работы (дипломного проекта) составляет, как правило, около 100 страниц формата А4, графической части – 10 листов формата А1. Оформление пояснительной записки и графического материала должно соответствовать стандартам и требованиям настоящего пособия. Состав пояснительной записки выпускной работы (дипломного проекта) следующий:

Титульный лист (на бланке – приложение А).

Задание на выпускную работу (дипломный проект) (на бланке).

Аннотация.

Содержание.

Ведомость проекта (приложение Б).

Введение.

1. Разработка технического задания на проектирование

2. Литературно-патентный обзор методов (технологии) химического производства и аппаратурно-технологического оформления.

3. Анализ исходных данных. Выбор технологии химического производства. Составление и описание по стадиям эскизной технологической схемы химического производства. Выбор типа технологического оборудования.

4. Расчет материальных и тепловых балансов по технологическим стадиям химического производства.

5. Расчет и подбор технологического оборудования по стадиям химического производства.

6. Технологический расчет основного технологического оборудования.

7. Выбор конструкционного материала и механический расчет технологического оборудования.

8. Подбор технологического оборудования по каталогам или разработка нестандартного оборудования.

9. Разработка принципиальной технологической схемы химического производства.

10. Оформление основных, вспомогательных стадий химического производства, отгрузки готовой продукции, обезвреживания и утилизации отходов производства и т.д.

11. Автоматизация и механизация отдельного технологического узла химического производства.

12. Полное описание технологической схемы по стадиям химического производства.

13. Компоновка технологического оборудования.

14. Разработка способов монтажа и ремонта технологического оборудования.

15. Решение задач промышленной экологии.

16. Мероприятия по безопасности жизнедеятельности и производственной санитарии.

17. Экономическое обоснование проекта.

Выводы.

Список используемых источников.

Приложение.

Проекты научно-исследовательской выпускной работы или дипломного проекта с исследовательской частью включают специальный раздел, в котором описываются методика проведения экспериментальных исследований (на опытной или промышленной установках, вычислительный эксперимент на ЭВМ с использованием математической модели и т.п.), а также планирование, проведение и обработка результатов эксперимента, анализ и документирование полученных результатов. В зависимости от объема исследовательской части проекта может быть изменен состав пояснительной записки и сокращен объем обязательной графической части проекта.

Научно-исследовательская выпускная работа – комплексная, самостоятельная работа студента, главной целью и содержанием которой является всесторонний анализ и научные исследования по одному из вопросов теоретического или практического характера по профилю направления подготовки специалистов на выпускающей кафедре. Базой практики при этом для студентов-исследователей может быть выпускающая кафедра, профильный интегрированный научно-образовательный центр, НИИ, КБ и т.п.

### **3. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

Пояснительная записка выпускной работы (дипломного проекта) должна быть сброшюрована в папке формата А4, на которую наклеивается этикетка размером 65×100 мм с указанием аббревиатуры университета (например, ФГБОУ ВПО «ГГТУ»), вида документа и его обозначение, темы работы, кода учебной группы и специальности, автора проекта и года выполнения. Текст ПЗ должен быть написан аккуратно от руки чернилами или пастой одного цвета (черного, синего, фиолетового), желательно, на двух сторонах листа белой бумаги формата А4 или набран на компьютере и отпечатан на принтере ЭВМ через полтора или два межстрочных интервала 14 кеглем.

Состав пояснительной записки проекта определяется Стандартом предприятия: титульный лист (на бланке, приложение А), задание на выполнение работы (на бланке), ведомость проекта (приложение Б), содержание с основной

надписью (приложение В); основная часть, выводы, список используемых источников и приложения.

Иллюстрации (рисунки, схемы, графики и т.д.) должны быть выполнены в соответствии с действующим стандартом вуза и располагаться возможно ближе к соответствующим частям текста.

Каждый лист пояснительной записки, кроме титульного листа и задания, должен быть выполнен по ГОСТ 2.106–68 (форма 5) для первого листа и по форме 5а для последующих листов. При этом основную надпись и дополнительные графы следует выполнять в соответствии с требованиями ГОСТ 2.104–68 (формы 2 и 2а). Рамку на листах пояснительной записки наносят сплошной основной линией на расстоянии 20 мм от левой границы формата и 5 мм от остальных границ.

От рамки до границ текста в начале строк оставлять 5 мм, в конце строк – не менее 3 мм, сверху и снизу – не менее 10 мм.

Абзацы в тексте следует начинать отступом, равным 15 – 17 мм. Расстояние между строками текста должно быть 8 мм.

Расстояние от текста до следующего заголовка, а также от заголовка до следующего текста должно быть равно 16 мм. Если заголовок занимает более чем одну строку, то расстояние между строками его равно 8 мм.

Вписывать в напечатанный текст отдельные слова, формулы, условные обозначения допускается только черными чернилами (пастой) или черной тушью.

Нумерация страниц пояснительной записки сквозная, начиная с титульного листа, включая приложения, должна быть в соответствующей графе основной надписи углового штампа. На титульном листе, задании, аннотации номера страниц не ставятся.

Текст пояснительной записки следует делить на разделы, которые могут делиться на подразделы и пункты. Пункты, при необходимости, делятся на подпункты. При таком делении текста необходимо, чтобы каждый пункт, подпункт содержал законченную информацию.

Разделы, подразделы, пункты, подпункты следует нумеровать арабскими цифрами и записывать с абзацного отступа. После номера раздела, подраздела, пункта, подпункта в тексте ставят точку.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов. В качестве примера оформления разделов, подразделов и пунктов можно рассматривать настоящее пособие.

Заголовки разделов, подразделов следует записывать с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Слова: «СОДЕРЖАНИЕ», «СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ», «ВВЕДЕНИЕ», «ВЫВОДЫ» следует записывать в виде заголовка (симметрично тексту) прописными буквами и номер для этих разделов не ставить.

Каждый раздел пояснительной записки рекомендуется начинать с нового листа (страницы).

Для лучшей наглядности представления цифрового материала и удобства сравнения показателей применяют таблицы. Название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Его следует помещать над таблицей.

При переносе части таблицы на ту же или другую страницу, название помещают только над первой частью таблицы. Над другими частями таблицы пишут слова «Продолжение таблицы» с указанием ее номера. Номер таблицы и ее название пишется, например, следующим образом: «Таблица 1 – Основные характеристики сырья».

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

Таблицы приложения обозначаются отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения.

Если в пояснительной записке имеется одна таблица, то она должна быть обозначена «Таблица 1» или «Таблица А.1», если она приведена в приложении А.

На все таблицы пояснительной записки должны быть ссылки в тексте, при этом следует писать «Таблица» с указанием номера.

Если в конце страницы таблица прерывается и ее продолжение переносится на следующую страницу, то в первой части таблицы нижнюю горизонтальную линию, ограничивающую таблицу, проводить не следует. В таблицу не допускается включать графу «Номер по порядку».

Иллюстрации (рисунки, схемы, графики, диаграммы и т.д.) в пояснительной записке должны выполняться в соответствии с требованиями ЕСКД. На иллюстрации должны быть ссылки в тексте.

Иллюстрации следует располагать непосредственно после текста, в котором о них упоминается впервые, или на следующей странице, а при необходимости – в приложении.

Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается «Рисунок 1».

В приложении иллюстрации должны иметь отдельную нумерацию арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Например – «Рисунок А.1.».

Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. Номер рисунка в этом случае состоит из номера раздела и порядкового номера рисунка, разделенных точкой (Рисунок 1.1).

При ссылках на иллюстрации следует писать, например, «в соответствии с рисунком 1» (или «... в соответствии с рисунком 1.1»).

Иллюстрации могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Пояснительные данные необходимо располагать под рисунком, а слово «Рисунок» и наименование необходимо помещать под рисунком и после пояснительных данных.

Формулы, приводимые в расчетной части пояснительной записки, должны иметь сквозную (или в пределах раздела) нумерацию арабскими цифрами, которые записываются на уровне формулы справа в круглых скобках. Рекомендуется нумеровать только те формулы, если на них имеются ссылки по тексту пояснительной записки. При этом ссылки в тексте на порядковые номера формул необходимо указывать в скобках, например, («... в формуле (1)» или «... в формуле (3.1)»).

Все входящие в формулу символы и числовые коэффициенты должны поясняться в тексте непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа с указанием размерности в системе СИ следует давать с новой строки в той же последовательности, в которой символы приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

**Пример.** Запишем уравнение теплопередачи

$$Q = K_T F \Delta t,$$

где  $Q$  – тепловой поток (тепловая нагрузка на теплообменник), Вт;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – разность температур между средами – теплоносителями (температурный напор, движущая сила), К.

Коэффициент теплопередачи в случае многослойной стенки рассчитывается по формуле

$$K_T = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_i$  – теплопроводность  $i$ -го слоя (стенки, отложений на стенке и т.п.), Вт/(мК);  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя, м.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций. При этом знак операции в начале следующей строки повторяется. Если формула переносится на знаке операции умножения, то следует применять знак «×».

В пояснительной записке не допускается применение машинописных и рукописных символов в одной формуле.

В тексте пояснительной записки могут быть приведены ссылки на данную пояснительную записку, на стандарты, на другие используемые источники.

При ссылке на данную пояснительную записку необходимо указывать номер раздела, подраздела, пункта, подпункта, иллюстраций, формул, таблиц, приложений, а также позиции составных частей изделия на рисунке. Например, «в соответствии с разделом 3» или «согласно 1.4».

При ссылке на другие источники информации можно ссылаться только на документ в целом или его разделы и приложения. Эти ссылки следует указывать порядковым номером по списку используемых источников, выделенным двумя квадратными скобками.

Сведения об источниках информации следует располагать в порядке появления ссылок на них в тексте пояснительной записки и нумеровать арабскими цифрами с точкой. Список используемых источников необходимо оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1–2003.

*Пример.* Список используемых источников

Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии : в 2-х кн. / Н. И. Гельперин. – М.: Химия, 1981. – 812 с.

Общий курс процессов и аппаратов химической технологии : учебник для вузов : В 2-х кн. Кн. 1 / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов и др. / под ред. проф. В. Г. Айнштейна. – М. : Химия, 1999. – 888 с.

Дворецкий, С. И. Основы проектирования химических производств : учебное пособие / С. И. Дворецкий, Г. С. Кормильцин, Е. М. Королькова. – Тамбов : ТГТУ, 1999. – 184 с.

Графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описание аппаратов, описание алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, т.е. материал, дополняющий текст пояснительной записки, допускается помещать в приложениях.

На все приложения в тексте пояснительной записки должны быть ссылки. Приложения необходимо располагать в порядке ссылок на них в тексте пояснительной записки. Каждое приложение следует начинать с новой страницы. При этом наверху посередине страницы необходимо писать слово «Приложение» и его обозначение, а под ним в скобках для обязательного приложения – «обязательное», а для информационного – «рекомендуемое» или «справочное».

Каждое приложение должно иметь заголовок, записываемый симметрично относительно текста с прописной буквы отдельной строкой.

Приложения следует обозначать заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Е, З, Й, О, Ч, Ъ, Ы, Ь. После слова «Приложение» указывается буква, обозначающая его последовательность.

Приложения необходимо выполнять на листах формата А4. Допускается оформлять их на листах других форматов по ГОСТ 2.301–68.

Приложения должны иметь общую с остальной частью пояснительной записки сквозную нумерацию страниц.

Все приложения следует перечислять в содержании пояснительной записки с указанием их номеров и заголовков.

### **3.1. АННОТАЦИЯ, ВЕДОМОСТЬ ПРОЕКТА, ВВЕДЕНИЕ**

Аннотация в пояснительной записке располагается перед содержанием. Аннотация содержит общие сведения и краткую характеристику работы: название темы, фамилию студента и руководителя, год защиты, название предмета и объекта конструктивной разработки или научного исследования, перечень основных проектных решений с краткими комментариями, характеризующими их новизну и эффективность. В аннотации также указываются объемы поясни-

тельной записки (в страницах) и графической части проекта (в листах). Рекомендуемый объем аннотации – 1 страница рукописного текста.

Ведомость проекта (форма, порядок заполнения) выполняется в соответствии с ГОСТ 2.106–96 (пример приведен в приложении Б).

Введение должно содержать обоснование актуальности разрабатываемой темы, оценку современного состояния решаемой задачи, краткую характеристику недостатков действующего производства – базы преддипломной практики и пути их преодоления, краткое изложение ожидаемых результатов проектирования.

### 3.2. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Непосредственная разработка технического задания на проектирование производится студентом и руководителем. Задание на проектирование должно содержать наименование производства и его основные технико-экономические показатели (в том числе производительность и ассортимент выпускаемой продукции), исходные данные для проектирования, а также требования:

- к качеству конкурентной способности и экологическим параметрам продукции;
- способу (технологии) химического производства;
- архитектурно-строительным, объемно-планировочным и конструктивным решениям;
- к разработке природоохранных мер и мероприятий;
- режиму безопасности и гигиены труда на химическом производстве;
- по перспективному расширению химического производства;
- по выполнению опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ.

При разработке технического задания студент должен ориентироваться на последние достижения науки и техники, научно-обоснованные нормы затрат сырья, материалов и энергетических ресурсов, высокую эффективность капиталовложений, высокий уровень экологической безопасности проектируемого химического производства и безопасности труда обслуживаемого персонала.

#### 3.2.1. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР

Литературно-патентный обзор составляется на базе общих сведений о проектируемом объекте или объекте научных исследований. При этом студент анализирует собранные во время практики материалы, изучает специализированную научно-техническую литературу (реферативные и научно-технические журналы, патенты, научно-технические отчеты НИИ, монографии) и при необходимости пользуется архивными документами кафедры.

На основании обследования производств-аналогов и литературно-патентного обзора составляются и анализируются исходные данные для проектирования химического производства или научно-исследовательской работы.

### 3.2.2. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ: ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ И ТИПОВ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Информационная база исходных данных для анализа включает следующее:

- выбранные технологии (способы) производства;
- оборудование для реализации химико-технологических процессов;
- описание химизма, физико-химических основ технологических процессов, в том числе по переработке отходов химического производства;
- нормативно-техническую документацию на сырье, вспомогательные материалы и готовую продукцию;
- физико-химические свойства исходных, промежуточных, побочных, конечных продуктов и отходов химического производства;
- технико-экономическое обоснование выбранной технологии (способа) химического производства;
- эскизную технологическую схему химического производства;
- рекомендации по автоматизации и механизации химического производства;
- рекомендации по аналитическому контролю и выбору пробоотборных устройств;
- таблицу неутраченных отходов производства и рекомендации по методу их утилизации и обезвреживания;
- рекомендации по безопасности жизнедеятельности обслуживающего персонала.

Критерии оценки метода или технологии химического производства, по которым производят анализ, включают: технико-экономические показатели; возможность обеспечения сырьем и его стоимость; организацию доставки сырья и вывоза готовой продукции; наличие оборудования для промышленной реализации метода; обеспечение заданной мощности и качества продукции; вопросы обеспечения экологической безопасности; соблюдение санитарно-гигиенических условий труда на химическом производстве.

На основании информации, полученной в процессе литературно-патентного поиска, об используемых видах сырья и его ресурсах, списках известных химических реакций и процессов химической и биотехнологий, степенях превращения сырья студент получает оценки возможных количеств целевых продуктов по стадиям производства и составляет эскизную технологическую схему. Разработка окончательного варианта эскизной схемы химического производства заключается в определении такой совокупности процессов (технологических стадий), направленных на выпуск продуктов заданного ассортимента и обеспечивающих высокое и стабильное качество выпускаемых продуктов при минимальной себестоимости. Эти процессы можно разделить на основные: химические, физико-химические, механические операции по переработке сырья в готовый продукт; вспомогательные: транспортировка и складирование сырья и готового продукта, подготовка сырья, удаление отходов производства и т.д. При составлении струк-

турной схемы процессы (стадии) изображаются прямоугольниками с номерами стадий и их наименованиями, а также с указанием выходов по ним.

На эскизной схеме обязательно изображают материальные потоки и степень превращения сырья по стадиям химического производства.

Далее студент приступает к составлению и решению уравнений материального баланса по стадиям химического производства. Это позволяет ему выяснить избытки тех или иных химических компонентов, которые, в конечном счете, либо будут присутствовать в качестве примесей в целевых продуктах, либо после их отделения образуют отходы производства или продукты для переработки в других производствах.

При анализе исходных данных производится предварительный расчет экономической эффективности метода (технологии) химического производства, основанный на предполагаемой стоимости сырья и продуктов, без учета капитальных и эксплуатационных затрат. В результате такого анализа выясняется целесообразность дальнейшей проработки данного варианта эскизной технологической схемы и выбираются оптимальные способы организации технологических процессов по стадиям химического производства.

При выборе способа химического производства следует помнить, что непрерывные технологические процессы позволяют обеспечивать высокое и стабильное качество производимой продукции, обеспечить более высокий уровень энерго- и ресурсосбережения химического производства, обладают более высокой удельной производительностью и способствуют значительному улучшению условий труда обслуживающего персонала за счет комплексной автоматизации химического производства. Однако, замена периодических процессов непрерывными не всегда оказывается целесообразной с экономической точки зрения, а иногда практически настолько трудно реализуемой, что от нее приходится отказаться. В первую очередь это связано с трудностью создания и внедрения в производство принципиально нового технологического оборудования непрерывного действия и приборов автоматического контроля качества производимой продукции. Одновременно с конструированием новых аппаратов и приборов необходимо определять оптимальные условия их функционирования в технологической схеме химического производства.

При выборе типа технологического оборудования студент разрабатывает требования к аппарату, которые учитывают необходимость реализации определенных физико-химических явлений, заложенных в эскизной технологической схеме. Требования рекомендуется разделять на технологические, конструктивные, эксплуатационные, экономические и др. Далее требования условно делят на основные и дополнительные. Невыполнение основных требований приводит к прекращению функционирования технологической машины, аппарата производственной систем, невыполнение дополнительных требований – к ухудшению технологических или технико-экономических показателей эффективности химического производства. Все требования можно оценивать коэффициентом значимости  $K_z$ , представляющим собой параметр, изменяющийся в диапазоне 1...5 и оцениваю-

щий степень необходимости удовлетворения данным требованиям. Коэффициенты значимости требований определяются методом экспертных оценок.

Вначале студентом осуществляется попытка поиска стандартного оборудования, в достаточной степени удовлетворяющего совокупности требований, по действующим каталогам стандартного оборудования. Если стандартное оборудование не удовлетворяет разработанным требованиям, то принимается решение о целесообразности разработки нестандартного оборудования.

### 3.3. РАСЧЕТ И ПОДБОР ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Руководствуясь эскизным вариантом технологической схемы, студент приступает к технологическому, энергетическому и механическому расчету оборудования.

#### 3.3.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОБОРУДОВАНИЯ

На первом этапе расчета студент составляет материальный баланс каждой стадии химико-технологического процесса с использованием уравнений материального баланса. Целью материального расчета является определение расходных коэффициентов по сырью, объемно-реакционной массы, количества отходов, сточных вод и газовыделений на каждой стадии технологического процесса.

Уравнения материального баланса составляются на основании закона сохранения массы:

$$\sum G_{\text{исх}} = \sum G_{\text{кон}},$$

где  $G_{\text{исх}}$ ,  $G_{\text{кон}}$  – масса исходных и полученных веществ.

При составлении уравнений материального баланса необходимо учитывать все компоненты, загружаемые в аппарат, и выходящие (выгружаемые) из аппарата в ходе процесса (исходные реагенты, продукты реакции, растворители, примеси в исходном сырье и растворителях, примеси, образующиеся в ходе реакции и т.п.).

Материальный расчет можно проводить двумя способами:

*Первый способ* – расчет на 1 т готового продукта. При этом получают расходные коэффициенты по сырью, объемы реакционных масс, приходящиеся на 1 т готового продукта. При проведении расчета первоначально определяют общий выход от теоретического для всего процесса:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_K \dots \eta_N,$$

где  $\eta_K$  – выход от теоретического на  $K$ -й стадии процесса;  $N$  – число стадий химико-технологического процесса.

Используя общий выход и стехиометрическое соотношение основного продукта и основного сырья, определяют его количество (расходный коэффициент) на первой стадии. Далее, с учетом исходных данных проводят последовательно материальный расчет для всех стадий процесса.

*Второй способ* – расчет на одну операцию для периодического процесса и часовую производительность – для непрерывного. В этом случае получают реальные загрузки в аппараты и объемы реакционных масс.

Материальный баланс является базой для составления теплового баланса, который выполняется на основании закона сохранения энергии:

$$\sum Q_{\text{н}} + Q_{\text{р}} = \sum Q_{\text{к}} + Q_{\text{п}},$$

где  $\sum Q_{\text{н}}$  – количество теплоты, поступающее в аппарат;  $Q_{\text{р}}$  – тепловой эффект процесса;  $\sum Q_{\text{к}}$  – количество теплоты, выносимое из аппарата;  $Q_{\text{п}}$  – тепловые потери в окружающую среду.

После составления материального и теплового балансов для всех технологических стадий проводят расчет конструктивных размеров и подбор технологического оборудования, необходимого для обеспечения заданной производительности по готовому продукту. При этом должны быть известны кинетические закономерности гидромеханических, тепловых, массообменных и химических процессов, которые могут быть сформулированы в виде общего закона: скорость процесса прямо пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению.

1. Для движения потоков материалов (жидкости или газа) через аппарат

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta P}{R_1} = K_1 \Delta P,$$

где  $V$  – объем протекающей жидкости;  $S$  – площадь сечения аппарата;  $\tau$  – время;  $R_1$  – гидравлическое сопротивление;  $K_1$  – коэффициент скорости процесса;  $\Delta P$  – перепад давления в аппарате.

2. Для переноса тепла

$$\frac{dQ}{Sd\tau} = \frac{\Delta t}{R_2} = K_2 \Delta t,$$

где  $Q$  – количество передаваемого тепла;  $S$  – поверхность теплообмена;  $R_2$  – термическое сопротивление;  $K_2 = 1/R_2$  – коэффициент теплопередачи;  $\Delta t$  – средняя разность температур между обменивающимися теплом средами (материалами).

3. Для переноса вещества из одной фазы в другую

$$\frac{dM}{Sd\tau} = \frac{\Delta C}{R_3} = K_3 \Delta C,$$

где  $M$  – количество вещества, перенесенного из одной фазы в другую;  $S$  – поверхность контакта фаз;  $R_3$  – диффузионное сопротивление;  $K_3 = 1/R_3$  – коэффициент массопередачи;  $\Delta C$  – разность между равновесной и рабочей концентрациями вещества в фазах.

## 4. Для химических превращений

$$\frac{dM}{Vdt} = K_4 \varphi(c),$$

где  $M$  – количество прореагировавшего в химическом процессе вещества;  $V$  – объем реактора (аппарата);  $K_4$  – коэффициент скорости химического процесса;  $\varphi(c)$  – движущая сила процесса;  $c$  – вектор концентраций реагирующих веществ.

В общем случае расчет процессов и аппаратов химических и биотехнологий проводят в определенной последовательности:

1) на основании закона сохранения материи (энергии) составляют уравнения материального (теплого) баланса процесса и определяют количество субстанции  $G$ , перерабатываемой в единицу времени;

2) с использованием законов термодинамики определяют направление течения процесса и условия термодинамического равновесия;

3) по величинам, характеризующим рабочие и равновесные параметры, определяют движущую силу процесса  $\Delta f$ ;

4) на основании законов кинетики определяют коэффициент скорости процесса  $K$ ;

5) по полученным данным рассчитывают основной конструктивный размер аппарата

$$d = \frac{G}{K\Delta f}.$$

Нахождение численных значений и является самой сложной частью расчета технологических аппаратов. При этом необходимо обоснованно решать вопросы масштабного перехода – распространения данных, полученных в лабораторных исследованиях, на промышленные объекты.

Мощным средством ускорения разработки новых химико-технологических процессов и аппаратов является математическое моделирование. Оно характеризуется системным подходом к процессу, т.е. разбивкой его на элементарные уровни, составлением его иерархических (многоуровневых) моделей. С помощью построенных моделей на ЭВМ исследуют, оптимизируют и проектируют новые прогрессивные технологические процессы и оборудование. Следует отметить в заключение, что на нынешнем уровне прикладной гидродинамики составить полную математическую модель технологического процесса, учитывающую масштабный фактор, без экспериментов на крупномасштабном аппарате пока невозможно. Следовательно, невозможно решить вопросы масштабного перехода при помощи только математического моделирования. Оно должно сочетаться с гидродинамическим моделированием. При этом математическое моделирование должно дать идеал промышленного аппарата, а гидромоделирование призвано помочь реально приблизиться к этому идеалу. Таким образом, в настоящее время сочетание двухуровневых лабораторных исследований новой технологии

с гидродинамическим моделированием промышленной аппаратуры и математическим моделированием процесса в целом является кратчайшим путем разработки новых процессов и аппаратов химической и биотехнологии.

### 3.3.2. ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОБОРУДОВАНИЯ

В этом разделе приводятся сведения по составу перерабатываемой среды, виду коррозии, склонности конструкционных материалов к старению, стойкости их к действию тепловых ударов, стабильности структуры материала при термическом и механическом воздействии, степени чистоты поверхности, стоимости и дефицита материала.

Определяя коррозионную стойкость материала в данной коррозионной среде, необходимо указать глубинный показатель коррозии и произвести оценку стойкости материала по десятибалльной шкале.

Затем, определив принадлежность материала к группе, дать рекомендации по защите его от коррозии.

При выборе методов защиты оборудования от коррозии необходимо учитывать простоту, надежность и экономичность выбранного способа защиты материала.

Расчет всех нагруженных элементов производится по соответствующим ГОСТам, отраслевым нормам химического и нефтяного машиностроения.

Различают проектные и поверочные расчеты на прочность. При выполнении проектных расчетов (при разработке новых агрегатов) искомыми являются размеры отдельных элементов – толщины стенок, днищ, диаметры болтов и т.п.; проектные расчеты элементов сочетают с их конструированием.

Поверочные расчеты на прочность служат для определения возникающих в элементах напряжений и сравнения их с допускаемыми при заданных условиях эксплуатации.

ГОСТ 14249–80 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность» устанавливает нормы и методы расчета на прочность цилиндрических обечаек, конических элементов, днищ и крышек сосудов и аппаратов из углеродистых и легированных сталей, применяемых в химической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности и работающих в условиях однократных и многократных статических нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным избыточным давлением и под действием осевых, поперечных усилий и изгибающих моментов. Указанный стандарт устанавливает также значения допускаемых напряжений, модулей продольной упругости и коэффициентов прочности сварных швов. Нормы и методы расчета на прочность применимы при соблюдении правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, утвержденных Госгортехнадзором, и при условии, что отклонения от геометрической формы и неточности изготовления рассчитываемых элементов сосудов и аппаратов не превышают допусков, установленных нормативно-технической документацией.

Физико-химические характеристики конструкционных материалов и допускаемые напряжения определяют по расчетной температуре, которую находят на основании тепловых расчетов или по результатам испытаний. При положительных температурах за расчетную температуру стенки аппарата принимают наибольшее значение температуры стенки, при отрицательной (при определении допускаемых напряжений) – температуру 20 °С.

Под рабочим давлением для сосуда и аппарата понимают максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и без учета допускаемого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного устройства. Под расчетным давлением  $p$  в рабочих условиях для элементов сосудов и аппаратов понимают давление, при котором их рассчитывают на прочность. Расчетное давление, как правило, равно рабочему или больше его. Если давление в сосуде или аппарате во время действия предохранительных устройств повышается более чем на 10% по сравнению с рабочим, то элементы аппарата следует рассчитывать на давление, равное 90% давления при полном открытии предохранительного устройства. Если на элемент сосуда или аппарата действует давление, составляющее 5% рабочего и более, то расчетное давление для этого элемента следует увеличить на эту величину.

Под пробным давлением понимают давление, при котором производят испытания сосуда или аппарата, а под расчетным давлением в условиях испытаний для элементов сосудов или аппаратов – давление, которому их подвергают во время пробного испытания.

Сосуды и аппараты рассчитывают на прочность по предельным нагрузкам, причем статически однократной нагрузкой условно считают и такие, при которых число циклов нагружения от давления, стесненности температурных деформаций или других воздействий не превышает  $10^3$ . При определении числа циклов нагружения не учитывают колебание нагрузки в пределах 15% расчетной. При числе циклов нагружения свыше  $10^3$  выполняют проверку по пределу выносливости.

Расчетная толщина стенки гладкой цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением, равна

$$s_R = pD / (2[\sigma] \varphi_p - p),$$

где  $p$  – расчетное избыточное давление;  $D$  – внутренний диаметр обечайки;  $\varphi_p$  – коэффициент прочности сварного шва.

Исполнительную толщину рассчитывают по формуле

$$s \geq s_R + c.$$

Прибавка

$$c = c_1 + c_2 + c_3,$$

где  $c_1$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии;  $c_2$  – прибавка для компенсации минусового допуска;  $c_3$  – технологическая прибавка, учитываемая предпри-

ятием-изготовителем при разработке рабочих чертежей для компенсации утонения стенки сосуда при вытяжке, штамповке и других технологических операциях.

Прибавка для компенсации коррозии

$$c_1 = \Pi \tau_a,$$

где  $\Pi$  – проницаемость материала, мм;  $\tau_a$  – принятый срок службы аппарата; при  $\Pi \leq 0,05$  мм/год принимают  $c_1 = 1$  мм; для материалов, стойких в заданной среде, при отсутствии данных о проницаемости рекомендуют  $c_1 = 2$  мм.

Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p]_p = \{2[\sigma]\varphi_p(s-c)\} / [D+(s-c)]. \quad (1)$$

Эти расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру  $(s-c)/D \leq 0,1$  для обечаек и труб при  $D \geq 200$  мм и  $(s-c)/D \leq 0,3$  при  $D < 200$  мм; при этом расчетные температуры не должны превышать значений, при которых возникает ползучесть материалов.

Толщину  $s_R$  стенки обечайки, нагруженной наружным давлением, рассчитывают по методике ГОСТ 14249–80 с помощью номограммы. Допускаемое наружное давление

$$[p] = [p]_p / \sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}.$$

Из условия прочности допускаемое давление  $[p]_p$  определяют по выражению (1), а из условия устойчивости в пределах упругости – по формуле

$$[p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} E D}{n_y B_1 l} \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s-c)}{D}},$$

где  $E$  – модуль продольной упругости;  $n_y = 2,4$  – коэффициент запаса устойчивости;

$B_1 = \min\left\{1,0; 8,15 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}}\right\}$  – безразмерный коэффициент.

Если проектируемое оборудование подведомственно Госгортехнадзору, то производится дополнительно поверочный расчет основных элементов по методике этой организации. Выполнение расчетов в записке должно начинаться со ссылки на номер чертежа оборудования и сопровождаться вычерчиванием схем приложения нагрузок, эпюр сил и т.п.

### 3.3.3. ПОДБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЛИ ЕГО РАЗРАБОТКА

Подобранное технологическое оборудование должно обеспечить заданную мощность производства при условии его нормальной эксплуатации. С учетом затрат времени на капитальный ремонт продолжительность работы технологиче-

ского оборудования принимают равной 330 суток в течение года. С учетом остановок на планово-предупредительные ремонты для непрерывных процессов продолжительность уменьшается до 300 суток; для периодических вводят запас производительности оборудования, компенсирующий простои во время ремонтов.

В случае выбора емкостных аппаратов учитывают коэффициент их заполнения, т.е. отношения объема реакционной массы в аппарате (рабочего объема аппарата  $V_p$ ) к объему аппарата:

$$\varphi = V_p / V,$$

Коэффициент заполнения зависит от особенностей процесса: при кипении, вспенивании реакционной массы коэффициент заполнения составляет 0,3...0,5; при перемешивании – 0,5...0,8; для стадии хранения жидкостей – 0,9.

Для выбора технологического оборудования периодических процессов необходимо знать продолжительность технологических стадий  $\tau_i$ , которая определяется кинетикой процесса и режимом работы конкретного технологического аппарата. Данные по продолжительности процесса на каждой технологической стадии можно определить из уравнений кинетики процесса или выбрать из регламента производства, являющегося базой практики студента.

При выборе емкостного оборудования для периодических процессов поступают следующим образом. Составляется расписание работы технологической схемы в виде графика Гантта. По заданной производительности  $B$  и известному фонду рабочего времени оборудования  $T_{эфф} = 330$  суток рассчитывают массовый размер партии выпускаемого продукта

$$b = \frac{B}{T_{эфф}} \tau_L,$$

где  $\tau_L = \max_{j=1,m} \tau_j$ ,  $\tau_j$  – продолжительность стадии  $j$ ;  $\tau_L$  – длительность цикла технологической схемы производства.

Далее по известным значениям постадийных материальных индексов  $S_j$  определяют объемы  $V_j$  емкостных аппаратов по стадиям производства:

$$V_j = b S_j^{1+z_j} / \varphi_j, \quad j = \overline{1,m},$$

где  $S_j$  – объем реакционной массы, который требуется подвергнуть обработке на стадии  $j$ , чтобы на выходе технологической схемы получить единицу массы продукта;  $\varphi_j$  – коэффициент заполнения объема аппарата на  $j$ -й стадии.

Часто оказывается более выгодным поставить на отдельной стадии вместо одного крупногабаритного несколько однотипных малогабаритных аппаратов, которые работают в технологической схеме с равномерным временным сдвигом. При этом необходимо определить оптимальные значения числа  $N_j^*$  параллельно

включенных аппаратов на  $j$ -й стадии, размер партии выпускаемого продукта  $b^*$  и продолжительность цикла технологической схемы  $\tau_L^*$ , при которых суммарные затраты на приобретение оборудования будут минимальны, т.е.

$$\sum_{j=1}^m N_j \alpha_j V_j^{\beta_j} \Rightarrow \min_{N_j, q, \tau_L}$$

при ограничениях на общее время работы технологической схемы:

$$\sum_{j=1}^m \tau_j + \tau_L \left( \frac{B}{b} - 1 \right) \leq T_{\text{эфф}}; \quad \tau_L = \max_{j=1, m} \tau_j / N_j;$$

$$\frac{S_j^{(1+z_j)} b}{\Phi_j} \leq V_j \leq \frac{S_j^{(1+z_j)} b}{\Phi_j},$$

где  $\alpha_j, \beta_j$  – коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов по данным прейскурантных цен на стандартное оборудование.

Эта задача может быть решена численными методами нелинейного программирования.

Необходимым условием выбора технологического оборудования является надежность и безопасность его работы в течение установленного регламентом срока. При этом предпочтение следует отдавать серийно выпускаемому промышленностью технологическому оборудованию, подбор которого после проведения необходимых расчетов производится по каталогам машиностроительных заводов.

Несмотря на многообразие серийно выпускаемого оборудования, при проектировании и модернизации производств часто приходится разрабатывать нестандартное оборудование, отличающееся от стандартного более высокими технико-экономическими показателями.

Нестандартное оборудование ориентировано на конкретный технологический процесс и проектируется специально для него из расчета на заданную производительность.

Расчет нестандартного оборудования производится аналогично расчету стандартного оборудования. Выбрав тип оборудования и определив его размеры, студент выполняет механические расчеты и разрабатывает чертежи нестандартного оборудования.

### 3.4. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СО СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ И ЕЕ ОПИСАНИЕ

Принципиальную технологическую схему разрабатывают на основе эскизной технологической схемы и чертежей общего вида выбранного оборудования. При этом выбираются способы доставки сырья в цех и отгрузки готовой продукции,

обезвреживания и удаления отходов производства, вопросы обеспечения экологической безопасности и охраны труда, автоматизации и механизации производства.

Аппараты можно изображать без соблюдения масштаба, но с учетом соотношения размеров. Обязательным является распределение их по высотным отметкам. По горизонтали аппаратуру располагают последовательно в соответствии с технологическими стадиями процесса. Расстояние между аппаратами на схеме должно быть таким, чтобы она удобно читалась.

Каждый аппарат изображается по контурам или в разрезе, отражающим его принципиальное устройство. При установке на технологической стадии нескольких однотипных аппаратов, работающих параллельно, изображают один, а число их указывают в экспликации на оборудование. Для непрерывных процессов при использовании каскада изображают все аппараты.

Основные материальные потоки наносят четкими сплошными линиями с указанием их направления и нумерацией потоков, расшифровка которой приводится в правом верхнем углу схемы. В работе даны рекомендации по присвоению номеров материальным потокам: 1 – вода, 2 – пар, 3 – воздух, 4 – азот, 5 – кислород, 6 – аргон, 7 – неон, 8 – гелий, 9 – криптон, 10 – ксенон, 11 – аммиак, 12 – кислота, 13 – щелочь, 14 – масло, 15 – жидкое горючее, 16 – водород, 17 – ацетилен, 18 – фреон, 19 – метан, 20 – этан, 21 – этилен, 22 – пропан, 23 – пропилен, 24 – бутан, 25 – бутилен, 26 – противопожарный водовод, 27 – вакуум. Другим материальным потокам можно присваивать номера, начиная с 30. Для более детального указания характера среды к цифровому обозначению может добавляться буквенный или цифровой индекс, например, 1.1 – вода питьевая или 1к – конденсат водяного пара. Условные числовые обозначения трубопроводов следует проставлять в разрывах материального потока через расстояния не менее 50 мм.

Каждый аппарат на технологической схеме должен иметь номер, который сохраняется во всех частях проекта (технологической, строительной, электротехнической и т.д.). Аппараты на схеме нумеруют слева направо с учетом технологической последовательности.

На технологической схеме обязательно отмечают, откуда и как поступает в цех сырье, куда и каким способом удаляется готовая продукция, отходы, сточные воды. При большом расходе сырья целесообразно организовать его прием на цеховой склад. В этом случае изображают схему приема сырья в цех (исходная тара–способ разгрузки–приемная емкость). Если для транспортировки сырья и готовой продукции предусмотрен напольный транспорт, это указывают на технологической схеме.

На принципиальной технологической схеме изображают оборудование не только основных, но и вспомогательных технологических стадий (операций), таких, как подготовка (измельчение, растворение, суспензирование и т.д.) и дозирование сырья, промежуточное хранение продуктов, поглощение отходящих газов и т.п.

На линиях основных и вспомогательных потоков показывают условными обозначениями арматуру.

После изображения всего оборудования и материальных потоков составляется экспликация оборудования. Экспликация содержит номер, обозначение чертежа аппарата, наименование оборудования, основную характеристику, количество аппаратов и конструкционный материал.

Принципиальная технологическая схема включает функциональную схему автоматизации. Автоматизация технологической схемы должна обеспечить контроль, регулирование и сигнализацию предельных значений параметров процесса и состояния технологического оборудования, блокировку и остановку технологических машин и аппаратов в аварийных ситуациях.

Приборы и средства автоматизации при выполнении принципиальной технологической схемы могут изображаться развернуто или упрощенно. При развернутом изображении на схеме показывают: отборные устройства, датчики, преобразователи, вторичные приборы, исполнительные механизмы, регулирующие и запорные механизмы, аппаратуру управления и сигнализации, комплектные устройства (управляющие вычислительные машины, телемеханические устройства) и т.д.

При упрощенном изображении на схеме показывают: отборные устройства, измерительные и регулирующие приборы, исполнительные механизмы и регулирующие органы.

Приборы, средства автоматизации, электрические, вычислительные и микропроцессорные устройства на принципиальной технологической схеме показываются в соответствии с ГОСТ 21.404–85. Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на принципиальной технологической схеме, присваиваются позиционные обозначения, сохраняющиеся во всех чертежах и материалах проекта. Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов не имеет специального обозначения, а представляет собой тонкую сплошную линию, соединяющую технологический трубопровод или аппарат с первичным измерительным преобразователем.

Выбор методов и средств автоматизации производственных процессов студент осуществляет под руководством консультанта кафедры «Информационные процессы и управление» ТГТУ.

После разработки принципиальной технологической схемы составляют полное описание. При описании собственно технологической стадии кратко сообщается о конструкции аппарата, способе загрузки сырья и выгрузки продуктов переработки, дается характеристика протекающего процесса и способов его проведения (периодический, непрерывный, циклический), перечисляются основные параметры процесса (давление, температура и др.), методы их контроля и регулирования, а также все отходы и побочные продукты технологической стадии.

В записке должны быть перечислены все имеющиеся на чертеже аппараты с указанием присваиваемых им по схеме номеров. Описываются также принятые в проекте способы внутрицеховой транспортировки сырья, вспомогательных материалов, реакционных масс, отходов и готовых продуктов.

### 3.5. КОМПОНОВКА ОБОРУДОВАНИЯ

Под компоновкой производства понимают проектное размещение технологического оборудования и сооружений, обеспечивающее нормальное течение технологического процесса, безопасность эксплуатации оборудования, нормальные условия для монтажа и ремонта аппаратуры при оптимальном объеме строительства. Различают три варианта компоновки химических производств: закрытый (в промышленных зданиях), открытый (на открытых площадках) и смешанный.

Основными исходными данными для проектного размещения оборудования являются:

- принципиальная технологическая схема;
- чертежи общих видов машин и аппаратов;
- схемы складских и транспортных операций.

Трудно рекомендовать какие-либо универсальные методы компоновки оборудования, так как в каждом конкретном случае следует учитывать специфику производства, климатические условия района строительства и многие другие факторы.

Большое внимание при компоновке следует уделять вопросам монтажа оборудования. Например, иногда конструкция емкостного реактора предусматривает монтаж и демонтаж мешалки вместе с приводом и крышкой аппарата. Поэтому при извлечении такого комплекса из корпуса требуется большая высота над реактором. Для этого следует предусматривать свободные монтажные проемы над аппаратом. Также следует предусматривать дополнительную площадь для демонтажа оборудования, например, при извлечении трубного пучка из кожуха громоздкого теплообменника.

При отсутствии в проектируемом цехе мостового крана необходимо предусматривать в цехе ворота и проезды для самоходных монтажных кранов.

Особое внимание следует уделить созданию условий для монтажа аппаратов колонного типа. Они, как правило, располагаются на открытых площадках рядом с производственными зданиями, вдоль их длинных сторон. Перед колоннами нужно предусматривать свободную площадку, на которой колонны подготавливают к подъему и устанавливаются монтажные средства.

Большое влияние на компоновку оказывают следующие виды ремонта:

- чистка реакторов, колонн, сборников от шлама и смол, а также теплопередающих поверхностей от накипи, а это связано со снятием крышек, открытием люков, что требует дополнительной рабочей площади вокруг этих аппаратов и установки кран-балок, монорельсов с талями;
- устранение неплотностей фланцевых соединений, подтяжка сальников и замена их набивки и тому подобных требует соответствующие площадки для выполнения данных работ;
- замена изношенных деталей компрессоров, дробилок, мельниц, транспортеров требует также дополнительной площади и установки упомянутых выше подъемно-транспортных механизмов;

– восстановление футеровки, изоляции, покраски связано с устройством приспособлений для подъема изоляции, футеровочной плитки, со строительством лесов, что требует дополнительных производственных объемов.

Размещая технологическое оборудование, стремятся снизить первоначальные капитальные вложения за счет уменьшения объема строительных сооружений, сокращения трубопроводных коммуникаций. Этого можно достичь, располагая оборудование на минимальном расстоянии друг от друга. Обычно этот минимальный проход между аппаратами, а также между аппаратом и строительным элементом равен 0,8 м. При этом основные проходы по фронту обслуживания и между рядами машин (компрессоры, насосы и аппараты с местными контрольно-измерительными приборами) должны быть шириной 2 м.

Однако минимизация трубопроводных коммуникаций вступает в противоречие с другими требованиями компоновки оборудования. Например, наряду со стремлением сгруппировать аппараты по определенным признакам, допустимы выполняющие сходные операции (выпарные установки, сульфураторы и т.п.), могут реализоваться и другие принципы группировки: оборудование с большим выделением пыли, вибрирующие агрегаты. Объединение подобных аппаратов в отдельном помещении дает определенные выгоды. Например, сгруппированное пылящее оборудование позволяет свести к минимуму количество вентиляционных камер.

Большое внимание уделяется вибрирующему оборудованию: компрессоры, дробилки, вентиляторы, насосы и другие машины. Это оборудование размещают на массивных фундаментах, изолированных от строительных конструкций.

Прицеховые емкости сырья – тяжелое и крупногабаритное оборудование – размещают на первом этаже, поскольку расположение его на верхних этажах вызывает необходимость усложнения и удорожание строительных конструкций. Следует также помнить, что тяжелое оборудование, обслуживаемое подъемными кранами, необходимо размещать в зоне приближения крюка крана.

Итак, суть вышеизложенных положений сводится к следующему:

- исходной базой для компоновки служат общие виды оборудования, принципиальная технологическая схема, которая указывает на размещение оборудования по различным высотным отметкам;
- компоновка оборудования проводится по одному из вариантов: закрытому, открытому или смешанному;
- определяя при компоновке производственную площадь, следует учитывать специфику монтажа и ремонта конкретного оборудования;
- с целью минимизации объема строительных сооружений и трубопроводных коммуникаций принимают расстояние между аппаратами не менее 0,8 м, а ширину прохода между рядами оборудования – 2 м;
- учитывая ограниченные нагрузки на строительные элементы, тяжелое оборудование располагают на первом этаже, а вибрирующее – на изолированных фундаментах;

– при компоновке следует группировать в отдельных помещениях оборудование по сходным признакам (пылящее, перерабатывающее взрывоопасные вещества и т.д.).

Выбрав вариант компоновки (открытый, закрытый или смешанный) и, учитывая изложенные рекомендации, приступают непосредственно к проектному размещению основного и вспомогательного оборудования.

Вначале определяют с учетом технологии производства и условий застройки этажность здания или железобетонного постамент. После этого группируют аппараты по сходным признакам. Затем на чертежах в масштабе 1:100 изображают планы каждого этажа с нанесением сетки колонн и наружных контуров аппаратов.

На строительных планах колонны обозначают пересечением двух взаимноперпендикулярных продольных и поперечных разбивочных осевых линий. Систему продольных и поперечных осей по рядам колонн называют сеткой колонн. Расстояние между опорами (по продольным осям), перекрываемое балками или фермами называется пролетом.

Расстояние между поперечными разбивочными осями называют шагом колонн (обычно 6 или 12 м) и обозначают слева направо арабскими цифрами.

Аппараты ориентируют и привязывают по двум направлениям к осям колонн и к уже нанесенным на план аппаратам.

Кроме изображения оборудования в плане по этажам делают поперечные и продольные разрезы, на которых стараются показать все аппараты. Как и на планах, в разрезах оборудование изображается контурно и дается способ его установки: на фундаменте, на консолях и т.д. К планам и разрезам цеха дается экспликация, номера аппаратов, в которой обязательно должны совпадать с их номерами на технологической схеме. В экспликации указывается наименование аппарата, его конструкционный материал, характеристика, количество таких аппаратов и масса аппарата. Цеховой напольный транспорт не изображается на планах при компоновке.

При определении общей производственной площади следует учитывать, что 40...50% ее занимает трубопроводная обвязка.

Различные варианты компоновки оборудования отличаются друг от друга длиной соединяющих их трубопроводов, транспортеров, линий пневмотранспорта, количеством и типом газодувок, насосов, промежуточных емкостей, этажностью строительных сооружений и т.д.

### **3.6. РАЗРАБОТКА И ОПИСАНИЕ ПРОГРЕССИВНЫХ СПОСОБОВ МОНТАЖА, ДИАГНОСТИКИ И РЕМОНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В данном разделе описываются организационные мероприятия по монтажу всей установки (цеха, отделения). Даются рекомендации по выбору монтажных механизмов и устройств. Приводится описание приемов монтажа и испытания

оборудования данного на специальную разработку в задании на дипломное проектирование. На чертежах общего вида аппаратуры дается схема строповки.

Также описывается организация ремонтной службы в проектируемом цехе (отделении). Для оборудования спецразработки указываются правила эксплуатации, диагностики, виды ремонтов, их периодичность и методы восстановления его работоспособности.

### **3.7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ**

Этот раздел включает анализ совместимости проектируемого объекта с экосистемой, мероприятия и технические решения задач промышленной экологии, расчет и выбор оборудования для очистки и переработки газовых, жидких и твердых отходов проектируемого производства.

### **3.8. МЕРОПРИЯТИЯ ПО БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ САНИТАРИИ**

В данном разделе, в зависимости от конкретной темы проекта, должны быть: проанализированы характеристики наиболее пожаро- и взрывоопасных веществ, применяемых в технологическом процессе, категория производства, класс помещения или наружной установки по ПУЭ, исполнение и тип электрооборудования; разработаны мероприятия по защите обслуживающего персонала от статического электричества; приведены расчеты заземления или зануления электрооборудования, допустимые значения концентраций вредных перерабатываемых веществ в окружающей среде. Также должны быть даны рекомендации по индивидуальным средствам защиты и сделан расчет местной и общеобменной вентиляции.

При необходимости делаются расчеты и описываются мероприятия по безопасной эксплуатации оборудования, специфичного для проектируемого производства.

Этот раздел разрабатывается в соответствии с требованиями секции безопасности жизнедеятельности.

### **3.9. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА**

При выполнении организационно-экономической части дипломного проекта студенты рассчитывают экономическую эффективность варианта производства, разрабатываемого в дипломном проекте.

Определяют показатели экономической эффективности, объем годового экономического эффекта от осуществления какого-либо усовершенствования или мероприятия и ряда других показателей, конкретный состав которых определяется консультантом по экономической части дипломного проекта применительно к работе предприятий в условиях хозрасчета, самокупаемости и самофинансирования.

Оформление всех расчетов экономической части производится на основе методических рекомендаций по экономике производства при использовании материалов производственной практики.

Этот раздел разрабатывается в соответствии с требованиями кафедры экономики.

### **3.10. ВЫВОДЫ**

В этом разделе приводятся основные результаты, достигнутые в дипломном проекте.

Выводы должны быть сделаны на основе сравнительного анализа технико-экономических показателей действующего производства и проектируемого. Обязательно указывают, за счет каких технических решений достигнуто улучшение технико-экономических показателей проектируемого объекта. Необходимо также отметить преимущества, связанные с реализацией проектных предложений, и охарактеризовать перспективы развития работ в этой области.

### **3.11. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Сведения об источниках следует располагать в порядке появления ссылок на них в тексте пояснительной записки и нумеровать арабскими цифрами с точкой. Оформление списка используемых источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003.

## **4. СОСТАВ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ**

### **4.1. СТРУКТУРА ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ**

Графическая часть проектов должна выполняться в соответствии с требованиями Государственных стандартов, Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и Стандарта предприятия.

Состав графической части определяется темой проекта (см. выше). Как правило, графическая часть дипломного проекта содержит следующие чертежи: технологическую схему цеха (отделения) и функциональную схему автоматизации (1–2 листа) (допускается совмещать данные схемы на одном чертеже); компоновочный чертеж (1–2 листа); чертежи общего вида аппарата (машины) и чертежи сборочных единиц (7–8 листов). Кроме того, в зависимости от вида проектируемого оборудования в графическую часть могут входить также чертежи наиболее сложных деталей. В этом случае чертеж детали должен содержать кроме изображения детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля.

Если исходными данными проекта являются материалы машиностроительных заводов, то чертеж технологической схемы и компоновочный чертеж могут отсутствовать, а объем чертежей на специальную разработку соответственно увеличивается.

Иллюстрационные материалы исследовательской работы (схемы экспериментальных установок, графические и аналитические зависимости, условные обозначения и т.п.) выполняются на листах формата А1.

## 4.2. ФОРМАТЫ

Для выполнения чертежей и схем дипломного проекта необходимо применять стандартные форматы, согласно ГОСТ 2.301–68 ЕСКД. В качестве основного формата следует использовать формат А1 (594×841 мм). Можно также применять форматы А0 (841×1189 мм), А2 (420×594 мм), А3 (420×297 мм), А4 (210×297 мм). Допускается применение дополнительных форматов, образуемых увеличением коротких сторон основных форматов на величину, кратную их размерам: А4×N, А2×N, А0×N.

## 4.3. ОСНОВНАЯ НАДПИСЬ

Чертежи дипломного проекта имеют основную надпись, которую располагают в правом нижнем углу. Содержание, расположение и размеры граф основной надписи должны соответствовать ГОСТ 2.104–68 ЕСКД. Пример заполнения граф основной надписи для чертежей приведен в приложении Г. Допускается для последующих листов чертежей и схем применять форму 4 ГОСТ 2.104–68 для основной надписи.

В графе 1 основной надписи указывают наименование изделия, которое должно соответствовать принятой терминологии и быть, по возможности, кратким. При этом наименование изделия следует записывать в именительном падеже единственного числа. Если наименование состоит из нескольких слов, то на первом месте должно быть имя существительное, например: «Сушилка барабанная». Для чертежей сборочных единиц под наименованием в этой же графе пишется: «Сборочный чертеж», а для чертежей общего вида – «Чертеж общего вида».

В графе 2 основной надписи указывают обозначение документа. Графические документы конструкторских проектов должны быть обозначены по классификатору НИИХИММАШ. Состав обозначения соответствующих конструкторских документов изложен ниже.

Повторное обозначение конструкторских документов указывают в дополнительной графе, расположенной в верхней части листа и имеющей размеры 70×14 мм. Графа располагается в дальнем от основной надписи углу формата вдоль ближайшей к этой надписи длинной стороне листа. Обозначение в этой графе необходимо указывать повернутым либо на 180°, либо на 90° относительно основной надписи в зависимости от расположения графы.

## 4.4. МАСШТАБЫ

Не рекомендуется применять масштабы уменьшения 1:25; 1:15; 1:75 и масштаб увеличения 2,5:1. Если общий вид аппарата и чертежи сборочных единиц выполняются на нескольких листах, то на последующих листах должен быть

указан такой же масштаб, какой указан на первом листе чертежа. Разрез или выноски узла, масштаб которого отличается от масштаба основной надписи, обозначается следующим образом: А–А(1:2).

#### 4.5. СПЕЦИФИКАЦИЯ

Допускается совмещение спецификации с чертежом, т.е. размещать ее на поле чертежа. В связи с этим в дипломном проекте спецификацию следует выполнять на первых листах чертежей общего вида или сборочных единиц над основной надписью.

Форму и порядок заполнения спецификации изделия устанавливает ГОСТ 2.108–68. В общем случае спецификация состоит из разделов, которые располагают в следующей последовательности: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, материалы, комплекты. Наименование каждого раздела необходимо указывать в виде заголовка в графе «Наименование». Наименования разделов подчеркиваются, между разделами целесообразно оставлять 3–5 свободных строк. После каждого раздела следует резервировать и номера позиций. Так как спецификация совмещается с чертежом, то раздел «Документация» в ней может отсутствовать. Наличие других разделов определяется составом специфицируемого изделия.

При заполнении граф спецификации следует придерживаться следующих рекомендаций.

Графу «Формат» не заполняют для документов, записанных в разделах «Стандартные изделия», «Прочие изделия» и «Материалы». Для сборочных единиц и деталей, на которые в проекте отсутствуют чертежи, в данной графе необходимо указывать: БЧ («Без чертежа»). Если чертеж выполнен на нескольких листах различных форматов, то в графе «Формат» проставляют «Звездочку» со скобкой, а в графе «Примечание» перечисляют все форматы в порядке их увеличения: (\* )А2, А1).

Для составных частей изделия (сборочные единицы, детали), на которые в проекте не разработаны чертежи, графу «Обозначение» не заполнять. При заполнении спецификации в данной графе для сборочных единиц и деталей, на которые в проекте разработаны чертежи, а также в графе 2 основной надписи (см. п. 4.3) указывают обозначения основных конструкторских документов. Обозначение состоит из наименования проекта (курсовой – КП, дипломный – ДП), года выполнения проекта (указывается последняя цифра текущего года) и шифра автора проекта (двух цифр, соответствующих номеру автора в приказе на дипломное проектирование, а при выполнении курсового проекта – порядковый номер в списке группы) (полученные три цифры образуют первый блок обозначения), индекса проектируемого оборудования (выбирается по классификатору НИИХИММАШа) и трех блоков цифр по две или три цифры в зависимости от предполагаемого деления специфицируемого изделия на составные части. Индекс и блоки цифр разделяются между собой точкой. Первый после индекса

проекта блок цифр служит для обозначения порядкового номера комплекса, второй – для обозначения порядкового номера сборочной единицы определяемого комплекса, а третий – для обозначения номера детали, принадлежащей определенной сборочной единице какого-либо комплекса, обозначение заканчивается шифром документа, который записывается после блока цифр через точку: ГЧ – габаритный чертеж, КЧ – компоновочный чертеж, ВО – вид общий, ТС – схема технологическая принципиальная, СЗ – схема технологическая и автоматизации принципиальная и т.д. В обозначении деталей буквенный шифр отсутствует. Следовательно, обозначение ДП–201.131.01.05.007 соответствует детали 7 из сборочной единицы 5, входящей в комплекс 1 барабанной сушилки (131 – индекс барабанной сушилки по классификатору НИИХИММАШа). Первый блок цифр (201) указывает, что дипломный проект выполнен в 2002 г. студентом, фамилия которого значится в приказе на проектирование под номером 1. Обозначение «ДП–201.131.00.01.000.ВО» соответствует сборочной единице 1 барабанной сушилки. Разрешается конструкцию проектируемого аппарата (машины) не разбивать на комплексы. В этом случае первый блок цифр после индекса проекта в обозначении может отсутствовать (ДП–201.131.01.000.ВО).

Марку материала для деталей и стандартных изделий следует указывать в графе «Примечание» спецификации. При этом в обозначении марки материала ГОСТ можно не указывать. Последняя строка спецификации должна располагаться от основной надписи на расстоянии до 10 мм.

При большом числе позиций спецификация может располагаться в двух и более столбцах. В этом случае нумерация позиций в последующем столбце спецификации производится также сверху вниз.

Если запись в какой-либо графе спецификации не помещается на одной строке, ее следует помещать на двух и более строках.

Форма спецификации и порядок ее заполнения приведены в приложении Д.

#### 4.6. ЧЕРТЕЖИ ОБЩИХ ВИДОВ

В общем случае, чертеж общего вида должен содержать следующие сведения: изображение изделия (аппарата, машины); необходимые виды, разрезы и сечения; основные размеры; таблицу назначения штуцеров, патрубков; техническую характеристику; технические требования; спецификацию изделия.

Все размеры делятся на исполнительные и справочные. Исполнительными размерами называются размеры, подлежащие выполнению по данному чертежу, т.е. необходимые для изготовления и контроля изделия.

Справочными называются размеры, не подлежащие выполнению по данному чертежу. Справочные размеры указываются для большего удобства пользования чертежом. На чертеже их отмечают знаком \*, а в технических требованиях записывают:

*\* Размеры для справок.*

Если все размеры на чертеже справочные, их знаком \* не отмечают, а в технических требованиях записывают:

*Размеры для справок*

На чертежах общего вида проставляются следующие виды справочных размеров: габаритные, установочные, присоединительные и посадочные.

Размеры, определяющие предельные внешние (или внутренние) очертания машины или аппарата, называются габаритными. Установочные и присоединительные размеры определяют величины элементов, по которым данное изделие устанавливают на месте монтажа или присоединяют к другому изделию. Посадочными называются размеры, определяющие номинальную величину и предельные отклонения сопрягаемых деталей.

На чертежах узлов кроме вышперечисленных справочных размеров проставляются исполнительные размеры (например, размеры, относящиеся к штифтовому соединению, если они выполняются при сборке узла и отверстия под штифт в разных деталях обрабатываются совместно), а также справочные размеры, способствующие лучшему прочтению чертежа при изготовлении узла. Не допускается повторять размеры одного и того же элемента на разных изображениях, в технических требованиях и спецификации.

На чертежах общего вида изделия необходимо изображать временные защитные детали (ответные фланцы, заглушки и т.д.).

Техническая характеристика обязательно должна быть на чертеже общего вида машины или аппарата и, по необходимости, на чертежах их сборочных единиц. В технической характеристике аппарата или машины, как правило, следует указывать назначение, объем аппарата – номинальный и рабочий, производительность, площадь поверхности теплообмена, максимальное давление, максимальную температуру среды, мощность привода, вес агрегатов и их габаритные размеры, токсичность и взрывоопасность среды, другие необходимые данные. Каждый пункт технической характеристики записывают с новой строки.

В технических требованиях указывают: обозначения ГОСТ, согласно которым должен быть изготовлен и испытан аппарат; обозначения ГОСТ на основные материалы; требования к контролю и испытанию; требования к эксплуатации машины или аппарата и т.п.

Техническую характеристику и технические требования помещают под заголовками «Техническая характеристика» и «Технические требования», которые не подчеркивают. Если на чертеже приводятся только технические требования, то заголовок «Технические требования» не пишут.

При выполнении чертежа на двух или более листах текстовую часть следует помещать только на первом листе.

Текстовая часть – технические требования и техническая характеристика должны располагаться над спецификацией. В случаях, если над спецификацией недостаточно места, текст технических требований следует размещать рядом со спецификацией в виде колонки шириной 185 мм.

Надписи на чертежах должны быть краткими и точными. В них не допускаются сокращения слов, за исключением общепринятых и установленных в ГОСТах и ОСТах.

Рядом с изображением на полках линий-выносок наносят надписи, относящиеся непосредственно к изображению предмета. Например, указания о количестве конструктивных элементов (отверстий, канавок и т.п.), если они не внесены в таблицу, указания лицевой стороны, направления проката, волокон и т.д.

На первом листе общего вида при необходимости располагается таблица штуцеров, которая должна выполняться по следующей форме:

Обоз- наче- ние	Наименование	Кол.	Проход- услов- ный Ду, мм	Давле- ние ус- ловное Ру, МПа	
					20
					8
12	90	10	18		
148					

Таблицу штуцеров целесообразно располагать над основной надписью чертежа; допускается размещение таблицы штуцеров слева от основной надписи. Обозначение штуцера в виде прописной буквы русского алфавита проставляется в таблице и на чертеже. На чертежах обозначение штуцера проставляется на полках линий-выносок, проводимых от штуцера. При этом не допускается повторения буквенных обозначений с видами, разрезами и сечениями. Над таблицей помещают заголовок «Таблица штуцеров».

Для обозначения видов, разрезов и сечений на чертеже применяют прописные буквы русского алфавита, за исключением букв: Й, О, Х, Ъ, Ы, Ь. Буквенные обозначения необходимо присваивать в алфавитном порядке без повторения. В случае недостатка букв следует применять цифровую индексацию, например: «А<sub>1</sub>», «Б<sub>1</sub>» и т.д. Для буквенных обозначений необходимо применять шрифт размером в два раза больше размера цифр размерных чисел, применяемых на том же чертеже.

На чертеже все составные части изделия необходимо нумеровать в соответствии с номерами позиций, указанными в спецификации этого изделия. Номера позиций на чертеже следует располагать вне контура изображения параллельно основной надписи, группируя их в колонки или строки, по возможности, на одной линии. Номера позиций следует наносить шрифтом, размером на 1–2 номера больше, чем размер шрифта, принятого для размерных чисел на том же чертеже.

Линии на чертежах должны соответствовать ГОСТ 2.303–68. Все надписи следует выполнять по ГОСТ 2.304–68, а изображение видов, разрезов и сечений – по ГОСТ 2.305–68. Виды, разрезы и сечения допускается поворачивать. В этом случае обозначение соответствующего изображения должно быть дополнено условным графическим обозначением  $\curvearrowright$ , которое читается словом «Повернуто». Направление поворота (по часовой или против часовой стрелки) указывается направлением стрелки. При необходимости указывают угол поворота, например,  $\curvearrowright 135^\circ$ .

При наличии на чертеже какого-либо слишком мелкого фрагмента конструкции и потому плохо читаемого, его целесообразно изображать отдельно в увеличенном масштабе в виде «выносного элемента». Соответствующее место выносного элемента на виде, разрезе или сечении отмечают замкнутой сплошной тонкой линией – окружностью, овалом, прямоугольником и т.д. Обозначают выносной элемент прописной буквой на полке линии-выноски. Над изображением выносного элемента указывают обозначение и масштаб, в котором он выполнен: А(2:1).

Если чертеж общего вида или сборочной единицы выполняется на двух и более листах, то часто возникают трудности отыскания нужного дополнительно изображения (сечений, разрезов, дополнительных видов и выносных элементов). В этом случае на изображениях, где показано положение секущих плоскостей, стрелок, указывающих направление проектирования, или линий-выносок, рядом с буквенным обозначением в скобках необходимо указывать номер листа, на котором помещено соответствующее дополнительное изображение. Номер листа следует указывать только один раз, например, А–А(2), Б(3) и т.д.

Над дополнительным изображением справа от буквенного обозначения в скобках указывается номер листа, на котором данное изображение отмечено стрелкой, секущей плоскостью или линией-выносной. В качестве примера приведем обозначение разреза или сечения, выполненного в масштабе 1:2 (при этом в угловом штампе указан другой масштаб), повернутого на  $50^\circ$  против часовой стрелки, секущие плоскости которого показаны на листе 1: А–А(1:2)  $\cup 50^\circ$  (1). При нанесении штриховки и обозначении материалов в разрезах и сечениях необходимо руководствоваться ГОСТ 2.306–68. Размеры и предельные отклонения на чертежах следует проставлять по ГОСТ 2.307–68. Покрытия, термическую обработку и другие виды обработки необходимо обозначать по ГОСТ 2.310–68. Предельные отклонения формы и расположения поверхностей на чертежах следует указывать по ГОСТ 2.308–79. Шероховатость поверхностей необходимо обозначать по ГОСТ 2.309–73.

На чертежах сварного изделия сварные швы должны быть показаны по правилам ГОСТ 2.312–72. Условное обозначение шва сварного соединения следует наносить на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва с лицевой стороны, и под полкой линии-выноски, проведенной от изображения шва с оборотной стороны. При этом линия-выноска имеет одностороннюю стрелку по месту касания линии шва. Структура условного обозначения стандартного шва, в общем случае, складывается из вспомогательных знаков шва, стандарта на тип шва, буквенно-цифрового обозначения шва по стандарту, способа сварки (можно не указывать), катета шва.

Сварочные материалы можно указывать на чертеже в технических требованиях или таблице швов. Допускается сварочные материалы не указывать.

Если на чертеже имеются одинаковые швы, то обозначение следует наносить у одного из изображений, а от изображений остальных одинаковых швов необходимо проводить линии-выноски с полками. Всем одинаковым швам сле-

дует присвоить один порядковый номер и наносить его на линии-выноске, имеющей полку с нанесенным обозначением шва; на полке или под полкой линии-выноски, не имеющей обозначения шва.

Допускается одинаковым швам на чертеже не присваивать порядковые номера, а отмечать их линиями-выносками без полок.

При необходимости на свободном поле чертежа можно располагать таблицу сварных швов, выполняемую по следующей форме:

N шва	Обозначение сварного шва	Кол.	Общая длина, м	Присадочный материал	Масса на- плавленного металла, кг	
1	ГОСТ 14771-76-02	3	0.5	Проволока 2.0св-0.8Г20 ГОСТ 2246-76	1.2	
2	ГОСТ 14771-76-Н1-Д5	6	0.75	Электрод АН06-5-2 ГОСТ 9466-75	1.8	
12		65		15	20	40
185						

#### 4.7. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦЕХА (ОТДЕЛЕНИЯ) И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

На технологической схеме (это, как правило, принципиальная схема), должно быть показано основное и вспомогательное оборудование цеха (отделения) в технологической последовательности, указаны основные технологические связи между изделиями (трубопроводы), а также элементы, имеющие самостоятельное функциональное значение (насосы, арматура и т.д.).

На чертеже технологической схемы над основной надписью следует располагать перечень основного оборудования (экспликацию), которая заполняется сверху вниз и выполняется по следующей форме:

Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
8	8	35	90	10	
185					

В экспликации принципиальной схемы следует указывать: в графе «Поз.» – позиционное обозначение элементов схемы, «Обозначение» – обозначение раз-

рабатываемого оборудования, «Наименование» – наименование оборудования, согласно чертежу или каталогу, «Кол.» – количество оборудования, имеющего одинаковую размерность, конструкцию и назначение, «Примечание» – основные технические характеристики оборудования (по необходимости).

Все оборудование (аппараты, насосы, вентиляторы и др.) на схеме необходимо изображать сплошными тонкими линиями толщиной 0,3...0,5 мм, а трубопроводы и арматуру – сплошными основными линиями, т.е. в два раза толще, чем оборудование.

Аппараты, машины, трубопроводы и запорную арматуру на принципиальной технологической схеме следует изображать условно.

При отсутствии стандарта на данное оборудование его необходимо изображать схематически с основными технологическими штуцерами, загрузочными люками, входами и выходами основных продуктов. На чертеже технологической схемы необходимо указывать ориентировочные высотные отметки расположения оборудования.

Линии трубопроводов, а также расположенные на них арматуру и приборы следует показывать на схеме горизонтально и вертикально. Условное обозначение трубопроводов состоит из графического обозначения трубопровода по ГОСТ 2.784–70 и цифрового обозначения транспортируемой среды.

Условные графические обозначения приборов и средств автоматизации на схемах выполняют линиями толщиной 0,5...0,6 мм, а линии связи 0,2...0,3 мм.

Условные изображения и обозначения трубопроводов, принятые на схеме, должны быть расшифрованы в таблице условных обозначений по форме:



Обозначение потока жидкости или газа следует выполнять по ГОСТ 2.721–74.

Не допускается пересекать изображения машин (аппаратов) и других изделий линиями трубопроводов. На каждом трубопроводе у места его отвода от магистрального трубопровода или места подключения к аппарату следует проставлять стрелки, указывающие направление движения потока и условное обозначение вида среды: светлые – газ, темные – жидкость.

Условное графическое обозначение приборов и средств автоматизации на технологической схеме необходимо выполнять по ГОСТ 21.404–88.

Условные графические обозначения приборов и средств автоматизации на схемах выполняют линиями, толщиной 0,5...0,6 мм, а линии связи – 0,2...0,3 мм.

#### 4.8. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПОНОВОЧНЫХ ЧЕРТЕЖЕЙ

Компоновочный чертеж должен содержать планы этажей и разрезы помещений. При этом аппараты изображаются в виде их наружных контуров с ориентацией относительно осей здания и привязкой к осям колонн, стенам здания или другим, уже нанесенным, аппаратам. Планы этажей, на которых указано проектируемое оборудование, изображают на компоновочном чертеже в масштабе 1:100. На планах необходимо наносить сетку колонн и наружные контуры аппаратов. Колонны обозначают пересечением двух взаимно-перпендикулярных продольных и поперечных разбивочных осевых линий. Продольные разбивочные оси обозначаются прописными буквами русского алфавита, за исключением букв З, И, Х, О, Ц, Ч, Ы, Ъ, Ь. Продольные оси следует обозначать снизу вверх.

Поперечные разбивочные оси обозначают слева направо арабскими цифрами. Буквенные и цифровые обозначения осей следует помещать в кружках диаметром 10 мм.

Кроме изображения оборудования в плане по этажам необходимо выполнить поперечные и продольные разрезы цеха, на которых целесообразно показать все аппараты. Разрезы цеха рекомендуется выполнять в масштабе 1:50. Как и на планах этажей, в разрезах оборудование изображается наружными контурами. При этом необходимо показывать способ установки оборудования (на фундаменте, постаменте и т.д.), высоту его установки и высоты расположения всех междуэтажных перекрытий и площадок.

На компоновочном чертеже аппараты следует ориентировать и привязывать по двум направлениям к осям колонн или к уже нанесенным на план аппаратам. *Размеры необходимо указывать в метрах.*

Компоновочный чертеж должен содержать перечень оборудования – экспликацию. Номера аппаратов в экспликации обязательно должны совпадать с их номерами на технологической схеме. В экспликации следует указывать наименование аппарата, количество таких аппаратов и их массу (в графе «Примечание»).

## Приложение А

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

Кафедра \_\_\_\_\_ ТОПТ \_\_\_\_\_

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

ДП – 201.000.00.000.000 ПЗ

К дипломному проекту по \_\_\_\_\_ МАХП \_\_\_\_\_  
наименование учебной дисциплины  
на тему: \_\_\_\_\_

Автор проекта \_\_\_\_\_ Группа \_\_\_\_\_  
подпись, дата, инициалы, фамилия

Специальность \_\_\_\_\_  
номер

Руководитель проекта \_\_\_\_\_  
подпись, дата, инициалы, фамилия

Проект защищен \_\_\_\_\_ Оценка \_\_\_\_\_

Члены комиссии \_\_\_\_\_  
подпись, дата инициалы, фамилия

\_\_\_\_\_  
подпись, дата инициалы, фамилия

Тамбов 20...г

**Приложение Б**  
(справочное)

№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. лист.	№ экз.	Прим.
1			Документация общая			
2						
3			Вновь разработанная			
4		ДП-201.000.00.00.000ПЗ	Пояснительная записка	35		
5		ДП-201.131.00.00.000ВО	Чертеж общего вида	2		
6		ДП-201.000.00.00.000ТС	Схема технологическая	2		
7		ДП-201.000.00.00.000КЧ	Чертеж компоновочный	1		
8						
10			Документация по			
11			сборочным единицам			
12						
13		ДП-201.131.01.00.000ВО	Барaban. Чертеж общего вида	1		
14		ДП-201.131.02.00.000ВО	Станция опорно–упорная			
15			Чертеж общего вида	1		
7	8	70	64	8	8	20

				ДП – 201.000.00.00.000 ВП		
				Производство аммофоса Ведомость проекта		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Литера	Масса
Разраб		Иванов				
Проверил		Петров				
Т. контр					Лист	Листов
Рук.		Петров			ТГТУ гр. М-51	
Н.контр		Сидоров				
Утв.		Попов				

**Приложение В**  
(справочное)

СОДЕРЖАНИЕ											
		Аннотация .....						3			
		Ведомость проекта .....						4			
		Введение .....						5			
		1 Литературно-патентный обзор по способам									
		производства .....						6			
		2 Разработка технического задания на проектирование .....						17			
		.									
		.									
		.		Список используемых источников .....				97			
		.									
								185			
		7 10		23 15 10		120					
ДП – 201.000.00.00.000 ПЗ											
<i>Изм.</i>		<i>Лист</i>		<i>№ докум</i>		<i>Подпись</i>		<i>Дата</i>			
<i>Разраб</i>		<i>Иванов</i>									
<i>Проверил</i>		<i>Петров</i>									
<i>Н.контр</i>		<i>Сидоров</i>									
<i>Утв.</i>		<i>Попов</i>									
Производство аммофоса Пояснительная записка						Литера		Лист		Листов	
						5		5		17	
						5		17		19	
						<i>ТГТУ гр. М-51</i>					

8×5 = 40



## Приложение Д

8	15	<b>Формат</b>	<b>Зона</b>	<b>Поз.</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Наименование</b>	<b>Кол.</b>	<b>Прим.</b>		
						<u>Сборочные единицы</u>				
		А1		1	ДП-201.131.00.01.000 ВО	Барaban	1			
		БЧ		2		Камера загрузочная	1			
						<u>Детали</u>				
		А1		5	ДП-201.131.00.00.005	Крышка	2	Ст. 3		
		БЧ		6		Ролик	4	Сталь45		
						<u>Стандартные изделия</u>				
				17		Болт М10х50.02 ГОСТ 18125-72	20	Сталь45		
						<u>Прочие изделия</u>				
				37		Двигатель АОП2-32-2	1			
						<u>Материалы</u>				
						Уголок 75х50х5 ГОСТ8510-86/Ст.3 ГОСТ 380-88				
		6	6	8	70	63	10	22		
					ДП – 201.131.00.00.000 ВО					
					Сушилка барабанная Чертеж общего вида			<i>Литера</i>	<i>Масса</i>	<i>Масшт</i>
		<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
		<i>Разраб</i>		<i>Иванов</i>						
		<i>Провер</i>		<i>Петров</i>						
		<i>Т. контр</i>					<i>Лист 1</i>	<i>Листов 2</i>		
		<i>Рук.</i>		<i>Петров</i>						
		<i>Н.контр</i>		<i>Сидоров</i>						
		<i>Утв.</i>		<i>Попов</i>						
							ТГТУ гр. М-51			

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В стратегии развития химической и нефтехимической промышленности России на период до 2015 г. прописан сценарий инновационного развития химического комплекса, в ходе реализации которого планируются: увеличение российского химического производства до 2015 г. в три раза, масштабная технологическая модернизация производства, внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий, возрастание инновационной активности, освоение производства новой высокотехнологичной продукции.

В целом осуществляется концентрация инновационной деятельности в химическом комплексе на разработке и внедрении технологических процессов нового уровня, характеризующихся ограниченным количеством операций, малоотходностью, глубоким переделом исходного сырья. Цель ожидаемой технологической смены – переход отрасли к концепции устойчивого развития, отвечающей экономическим, экологическим и социальным нуждам общества и учитывающей интересы будущих поколений.

Предполагается разработка и внедрение в промышленных масштабах новых химических технологий практически во всех подотраслях химического комплекса, а также развитие нанохимии – новой межотраслевой технологии, интегрирующей последние достижения физики, химии и биологии.

В связи с вышеназванными задачами инновационного развития химического комплекса интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих ХТП, аппаратов и систем занимает ведущее положение среди других процессов, поддерживаемых информационными технологиями, поскольку знание основ интегрированного проектирования, методологии моделирования и оптимизации технических систем в условиях неопределенности и умение работать со средствами САПР требуется практически любому инженеру-разработчику.

Исследование затрат времени работы проектировщиков в процессе создания проекта гибкого автоматизированного химического производства показали, что 30...40 % времени тратится на согласование отдельных частей проекта, около 50...60 % – на выполнение эскизов, чертежей, расчетов, составление проектной документации и только 10...20 % – на творческое осмысление задачи. Кроме того, при традиционном проектировании решения принимаются без многовариантной проработки, а в основе расчетов и согласований обычно лежат укрупненные показатели, на базе которых и выполняется корректировка решений по совокупности показателей. При такой практике проектирования получение технологически и экономически оптимального проекта сложного химического производства проблематично.

Методика интегрированного проектирования гибких автоматизированных химических производств, как следует из вышестоящих разделов книги, отражает

характерную для сложных систем невозможность полной централизации в одном звене обработки информации и принятия решений по управлению процессом проектирования. Это приводит к необходимости формирования иерархической структуры системы автоматизированного проектирования, соответствующей уровневой декомпозиции объекта проектирования и этапной декомпозиции самого процесса проектирования. Компьютерные технологии моделирования позволяют в ходе проектирования, расчета и конструирования технической системы оценить качество проекта, не прибегая к изготовлению экспериментальных образцов, что позволяет ускорить процесс совершенствования разработки до требований, предъявляемых заказчиком. К настоящему времени создано большое число программно-методических комплексов для САПР с различной степенью специализации и прикладной ориентацией, в которых проектно-конструкторские решения принимаются в условиях неопределенности (противоречий), связанных с неполнотой имеющейся информации на ранних этапах проектирования, с грубым (неточным) описанием (моделированием) отдельных стадий проектируемого технического объекта, использованием упрощенных методик оценки его показателей и т.п. Таким образом, весь ход разработки проекта химического производства в учебном пособии интерпретируется как последовательный процесс снятия неопределенностей (разрешения противоречий).

Бесспорно, что уже на ранних этапах использования компьютеров для решения задач проектирования и управления исследователи поняли важность учета неточности математических моделей для построения работоспособных (гибких) технических систем, и первые публикации по этой проблеме появились за рубежом в 60-е – 70-е годы прошлого столетия.

Существенное развитие теория гибкости получила в 1980-е годы в работах профессора Гроссмана и его учеников в Университете Carnegie Mellon (г. Питсбург, США). Они сформулировали три фундаментальных понятия теории гибкости – тест гибкости, индекс гибкости и двухэтапную задачу оптимизации с учетом гибкости. В последующие годы за рубежом и в России в работах профессора Г. М. Островского и его учеников в ГНЦ НИФХИ им. Л. Я. Карпова, Тамбовском государственном техническом университете и Казанском национальном исследовательском технологическом университете изучались следующие вопросы: обобщение функции гибкости и развитие методов ее оценки, обобщение формулировок двухэтапной задачи оптимизации и развитие методов ее решения, многокритериальная оптимизация технических систем, совместное проектирование гибких ХТС и САУ, гибкость и надежность технических систем и др.

С позиций современных методов системного анализа, математического и физического моделирования получены новые научные результаты для теории интегрированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих гибких промышленных химико-технологических процессов, аппаратов и систем, формирующих предпосылки эффективного управления и автоматизации.

Авторами разработана методология (система принципов, способов организации и построения теоретической и практической деятельности при интегрированном проектировании) и формализована стратегия интегрированного проектирования промышленных энерго- и ресурсосберегающих гибких ХТП, оборудования и систем автоматического управления в условиях интервальной неопределенности физико-химических, технологических и экономических исходных данных, реализована многоэтапная итерационная процедура решения задач интегрированного проектирования гибких автоматизированных химических производств, предусматривающая: выбор типа, расчет конструктивных параметров и режимных переменных аппаратурно-технологического оформления химического производства; выбор класса, структуры и расчет настроечных параметров САУ; определение допустимой области изменения параметров сырья, технологических переменных и коэффициентов математической модели ХТС, в пределах которой обеспечивается оптимальное (в смысле безопасности, энерго- и ресурсосбережения и качества выпускаемой продукции) функционирование химического производства.

Значительное развитие в настоящем учебнике получили методы и алгоритмы решения одно- и двухэтапных задач стохастической оптимизации с «мягкими» (вероятностными) и смешанными ограничениями, возникающими при интегрированном проектировании и аппаратурно-технологическом оформлении промышленных энерго- и ресурсосберегающих гибких автоматизированных химико-технологических процессов и систем в условиях неопределенности.

Однако, несмотря на известные достижения в теории интегрированного проектирования гибких автоматизированных химико-технологических процессов и систем, остается немало проблем, связанных с экономичным вычислением математического ожидания (многомерного интеграла) в двухэтапных задачах, разработкой новых быстродействующих методов и алгоритмов решения двухэтапных задач при совместном проектировании гибких химико-технологических процессов, аппаратов, производственных систем и систем автоматического управления, задач планирования в условиях неопределенности, обеспечением устойчивости, надежности и робастности химико-технологических процессов, аппаратов и производственных систем. Эти вопросы требуют скорейшего разрешения, и мы призываем молодых ученых, аспирантов и студентов включиться в исследовательский процесс и внести свой вклад в разработку теоретических основ интегрированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих гибких автоматизированных химических производств.

Авторами учебника особо подчеркивается, что разработкой проекта гибкого автоматизированного химического производства необходимо управлять. Целью управления служит получение оптимального проекта с минимальными затратами ресурсов (времени, средств и т.п.). Управление осуществляется выбором альтернатив, подлежащих проработке, определением «глубины проработки» выбранной

альтернативы, структуры и объема проводимых при этом экспертиз, расчетов и экспериментальных исследований.

В учебнике рассматривается новый подход к решению задач анализа и синтеза при проектировании гибких автоматизированных химических производств в условиях неопределенности. Отмеченные особенности носят объективный характер. Они, хотя и в разной степени, присущи практическому проектированию как «ручному» (с ограниченным использованием ЭВМ), так и автоматизированному (с использованием интегрированных CAD/CAM/CAE-систем, охватывающих основные этапы проектирования). Интегрированные САПР (CAD/CAM/CAE-системы) реализуют новую технологию проектирования, рассчитанную на широкое использование современной вычислительной техники, информатики, методов математического моделирования и оптимизации в условиях неопределенности исходных данных на ранних этапах проектирования. Фирмы, ведущие разработки технических объектов без применения САПР, методологии математического моделирования и оптимизации в условиях неопределенности могут оказаться неконкурентоспособными как вследствие больших материальных и временных затрат на проектирование, так и из-за неудовлетворительного качества проектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беркман Б. Е.** Основы технологического проектирования производств органического синтеза. М.: Химия, 1970. 368 с.
2. **Грекова И.** Методологические особенности прикладной математики на современном этапе ее развития // Вопросы философии. 1976. № 6.
3. **Основы** проектирования химических предприятий и элементы систем автоматизированного проектирования / С. П. Рудобашта, Г. С. Кормильцин, А. А. Лапин, Э. Л. Тудоровский. М.: МИХМ, 1985. 80 с.
4. **Основы** проектирования химических производств / С. И. Дворецкий, Г. С. Кормильцин, В. Ф. Калинин. М.: Машиностроение-1, 2005. 180 с.
5. **СНиП 11-01–95.** Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений.
6. **Тимофеев В. С., Серафимов Л. А.** Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Химия, 1992. 432 с.
7. **Перевалов В. П., Колдобский Г. И.** Основы проектирования и оборудование производств тонкого органического синтеза. М.: Химия, 1997. 288 с.
8. **Новые** технологии комплексной переработки метанола / М. Г. Макоренко, Т. В. Андрушкевич, Б. Г. Гришин и др. // Химическая промышленность. 1997. № 12. С. 789 – 794.
9. **Задорский В. М.** Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. Киев: Техника, 1989. 208 с.
10. **Макаревич В. А.** Строительное проектирование химических предприятий. М.: Высшая школа, 1977. 208 с.
11. **Лыков М. В.** Сушка в химической промышленности. М.: Химия. 1970. 430 с.
12. **Сажин Б. С.** Основы техники сушки. М.: Химия. 1984. 320 с.
13. **Плановский А. Н., Николаев П. И.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987. 496 с.
14. **Процессы** и аппараты химической технологии. Основы теории процессов химической технологии / под ред. А. М. Кутепова. М.: Логос, 2000. Т. 1. 480 с.
15. **Тимонин А. С.** Конструирование и расчет химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник. Калуга: Изд-во Н. Ф. Бочкаревой, 2002. Т. 2. 1028 с.
16. **Проектирование**, конструирование и расчет техники пищевых технологий: учебник / под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 912 с.
17. **Кафаров В. В., Мешалкин В. П., Перов В. А.** Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Химия, 1979. 320 с.

18. **Проектирование** систем автоматизации технологических процессов / под ред. А. С. Ключева. М.: Энергоатомиздат. 1990. 464 с.
19. **Методические** указания о порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химико-технологических объектах. РД 09-536-03. М.: НТЦ, 2003. 67 с.
20. **Методики** оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. М.: НТЦ, 2002. 207 с.
21. **Гринберг Я. И.** Проектирование химических производств. М.: Химия, 1970. 268 с.
22. **Дьяконов С. Г., Елизаров В. В., Елизаров В. И.** Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования. Казань, КГТУ. 2009.
23. **Островский Г. М., Зиятдинов Н. Н., Лаптева Т. В.** Оптимизация технических систем. М., КНОРУС. 2012.
24. **Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Островский Г. М.** Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределенности. М.: Издательский дом «Спектр». 2012.
25. **Девятов Б. Н.** Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления. Новосибирск, Редакционно-издательский отдел сибирского отделения АН СССР. 1964.
26. **Кафаров В. В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия. 1985.
27. **Biegler L. T., Grossmann I. E., Westerberg A. W.** Systematic methods of chemical process design. Upper Saddle River. New Jersey, Prentice Hall. 1997.
28. **Halemane K. R., Grossmann I. E.** Optimal Process Design under Uncertainty // *AIChE Journal*, 1983. V. 29. P. 425 – 433.
29. **Mohiden M. J., Perkins J. D., Pistikopoulos E. N.** Optimal Design of Dynamic Systems under Uncertainty // *AIChE Journal*. 1996. V. 42. P. 2252.
30. **Островский Г. М., Волин Ю. М.** Оптимальное проектирование гибких химико-технологических процессов // Доклады Академии наук. 1993. Т. 331. С. 326.
31. **Островский Г. М., Волин Ю. М.** Новые проблемы теории гибкости химико-технологических процессов // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370. С. 773.
32. **Островский Г. М., Волин Ю. М.** Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и оптимизации. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний. 2008. 319 с.
33. **Бодров В. И., Дворецкий С. И.** Стратегия синтеза гибких автоматизированных химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25. № 5. С. 716.
34. **Бодров В. И., Дворецкий С. И., Дворецкий Д. С.** Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31. № 5. С. 542.

35. **Красовский А. А.** Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 558 с.
36. **Красовский А. А., Буков В. Н., Шендрик В. С.** Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М., 1977. 272 с.
37. **Swaney R. E., Grossmann I. E.** An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design / *AIChE Journal*, 1985. V. 31. P. 621 – 644.
38. **Островский Г. М., Волин Ю. М.** Технические системы в условиях неопределенности: учебное пособие. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008. 319 с.
39. **Норенков И. П.** Основы автоматизированного проектирования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 336 с.
40. **Кафаров В. В., Макаров В. В.** Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности. М.: Химия, 1990. 320 с.
41. **Кафаров В.В., Бодров В. И., Дворецкий С. И.** Новое поколение гибких автоматизированных химических производств // Теоретические основы химической технологии. 1992. Т. 26, № 2. С. 254.
42. **Савицкая Т. В., Бельков В. П.** Математические модели типовых операций одностадийных периодических процессов: текст лекций / под ред. проф. А. В. Егорова. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 196 с
43. **Карпушкин С. В.** Выбор аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2006. 140 с.
44. **Дворецкий С. И., Кудрявцев А. М.** Математическое моделирование непрерывного процесса азосочетания в производстве азопигментов // Известия вузов. Химия и хим. технология. 1990. С. 110 – 114.
45. **Кудрявцев А.М. и др.** Разработка непрерывного технологического процесса получения пигмента алого // Журн. прикладной химии. 1988. Т. 61, № 11. С. 2525 – 2531.
46. **Гордеев Л. С., Дворецкий С. И., Кудрявцев А. М.** Математическое моделирование и исследование непрерывной технологии синтеза азопигментов // Химическая промышленность. 1990. № 10. С. 44 – 48.
47. **Бодров В. И., Дворецкий С. И. и др.** Разработка прогрессивных технологий и оборудования перенастраиваемых автоматизированных анилиноокрасочных производств // Химическая промышленность. 1997. № 1. С. 64 – 73.
48. **Дворецкий С. И., Карнишев В. В., Дворецкий Д. С.** Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологических установок непрерывного действия // Химическое и нефтегазовое оборудование. 1998. № 4. С. 4 – 7.
49. **Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Пешкова Е. В.** Компьютерное моделирование турбулентных реакторных установок тонкого органического синтеза в условиях неопределенности // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. Научно-теоретический журнал. 2007. Т. 50, вып. 8. С. 70 – 75.
50. **Новые** подходы к интегрированному синтезу гибких автоматизированных химико-технологических систем / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, С. В. Мищенко, Г. М. Островский // ТОХТ. 2010. Т. 44, № 1. С. 69 – 77.

Учебное издание

**Дворецкий Станислав Иванович  
Дворецкий Дмитрий Станиславович  
Кормильцин Геннадий Сергеевич  
Пахомов Андрей Александрович**

# **ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Учебник

Редактор З. Г. Чернова  
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

Сдано в набор 15.04.2014  
Подписано в печать 20.05.2014. Формат 70×100/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 28,7. Уч.-изд. л. 27,5. Тираж 400 экз. Заказ № 246

ISBN 978-5-4442-0069-8



ООО «Издательский дом «Спектр»,  
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1  
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: [idspektr@rambler.ru](mailto:idspektr@rambler.ru)

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом  
центре ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться  
по телефону 8(4752)63-81-08