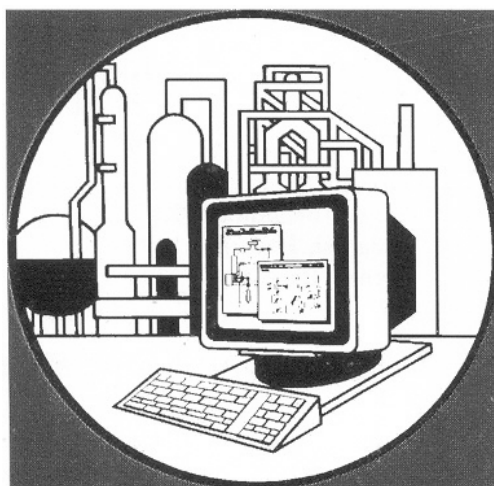


С.И. Дворецкий, Г.С. Кормильцин, В.Ф. Калинин

**ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ**



**МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО "МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"
2005**

С.И. Дворецкий, Г.С. Кормильцин, В.Ф. Калинин

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области химической технологии и биотехнологии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Машины и аппараты химических производств"

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО "МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"
2005

УДК 66.0135 (075)
ББК Л11-5-02
Д24

Р е ц е н з е н т ы:

Заведующий кафедрой "Машины и аппараты химических производств"
Казанского государственного технологического университета,
доктор технических наук, профессор
С.И. Поникаров

Заведующий кафедрой "Компьютерно-интегрированные системы в
химической технологии" РХТУ им. Д.И. Менделеева,
доктор технических наук, профессор
А.Ф. Егоров

**Дворецкий С.И., Кормильцин Г.С., Калинин
В.Ф.**

Д24 Основы проектирования химических производств:
Учеб. пособие. М.: Издательство "Машиностроение-1".
2005. 280 с.

Изложены основные понятия и методика проекти-

рования химических производств. Подробно рассматриваются вопросы разработки аппаратурно-технологического оформления типовых процессов, расчета, подбора и компоновки химических производств. Важное место в пособии уделяется монтажной проработке технологических узлов и автоматизации схем химических производств.

Отдельный раздел пособия посвящен вопросам математического моделирования, оптимизации и основам автоматизированного проектирования химических производств.

В качестве приложения предложен мультимедийный комплекс по изучаемой дисциплине на компакт-диске.

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

УДК 66.0135 (075)

ББК Л11-5-02

ISBN 5-94275-213-3

© Дворецкий С.И., Кормильцин Г.С.,

Калинин В.Ф., 2005

© Издательство "Машиностроение-1", 2005

Учебное издание

ДВОРЕЦКИЙ Станислав Иванович,
КОРМИЛЬЦИН Геннадий Сергеевич,
КАЛИНИН Вячеслав Федорович

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 30.08.2005.

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

Объем: 16,27 усл. печ. л.; 16,3 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 609^М

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

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

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

Проект производства – это комплекс технической документации, необходимой для его сооружения. 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 проектируемого объекта.

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. Такой системный подход к решению проектных задач обеспечит высокий социально-экономический уровень функционирования промышленных объектов. Этот подход выработан в процессе развития проектного дела.

Проектирование химических предприятий как самостоятельная отрасль инженерного труда относительно молода. До тридцатых годов прошлого века 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 специализацию отдельных групп: технологов, 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 оптимизации технологических процессов, системы автоматизированного проектирования (САПР) химических производств. При этом, однако, следует помнить, что в первую очередь необходимо освоить общую методику проектирования. Иначе, как отмечается в [2]: "Надо смотреть правде в глаза и признать, что применение математических методов не件зно, а вредно до тех пор, пока явление не освоено на гуманитарном уровне. Вредно тем, что отвлекает внимание от главного к второстепенному, тем, что создает почву для очковтирательства".

Интенсификация процесса обучения всегда будет актуальной задачей высшего образования, и одним из современных методов решения этой задачи является внедрение в образовательный процесс технологий компьютерного обучения. Для лучшего освоения общей методики проектирования к пособию прилагается комплекс мультимедийных средств с инструкцией по пользованию. Не исключая традиционных методов обучения, комплекс позволит максимально активизировать познавательную деятельность студентов с учетом их индивидуальных способностей на базе представления изучаемого материала нетрадиционными формами, которые невозможно реализовать ни в тексте, ни на доске, ни на слайде (аудио-, видео-, анимационные приемы). Этот комплекс можно использовать для дистанционного обучения.

Комплекс мультимедийных средств выполнен в среде *Power Point* программного пакета *MS Office 2000*. Для работы с ним достаточно иметь компьютер *IBM PC* с процессором *Pentium 166*, ОЗУ 64Мб, звуковой картой, 100Мб свободного места на системном диске. Операционная система *Windows 98* и пакет приложений *MS Office 2000*.

Настоящее учебное пособие базируется на опыте преподавания в ТГТУ дисциплины "Проектирование химических производств" и пособий изданных ранее [3, 4].

Авторы выражают благодарность инженерам В.А. Крячко, А.С. Горбачеву, Н.В. Жаровой за помощь в подготовке комплекса мультимедийных средств для настоящего пособия.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектная документация предназначена для так называемого заказчика. В качестве заказчика могут выступать промышленное предприятие, министерство и частное лицо, т.е. организации и лица, заинтересованные в выпуске продукции будущим производством.

Проектная документация разрабатывается проектировщиком. Это или самостоятельная организация или подразделение проектно-строительного объединения. Проектировщиком считается организация, имеющая лицензию на проектную деятельность.

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

Отношения между заказчиками и подрядчиками регламентируются инструкциями о порядке разработки, согласования, 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. При этом используются разработки отраслевых НИИ, каталожные данные и другая информация. Если заказчик не может самостоятельно выполнить обоснование инвестиций, то для этой работы привлекают проектировщика.

Обоснование инвестиций составляется по специальной форме и раскрывает технический, кадровый, финансовый потенциал заказчика и ориентировочно оценивает технико-экономические показатели будущего предприятия.

Обоснование инвестиций утверждается руководителем предприятия-заказчика. Затем после рассмотрения государственной экспертизой обоснование инвестиций утверждается инвестором.

Проектная документация разрабатывается после утверждения инвестиций, как правило, на конкурсной основе через торги подряда (*тендер*). В проекте детализируются принятые в обосновании решения и уточняются основные технико-экономические показатели. Проектировщик в своей деятельности должен руководствоваться законодательными и 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 являются *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 документации, используют

двухстадийное проектирование. На первой стадии разрабатывается *проект*, а затем на его основе – *рабочая документация* для строительства объекта.

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

В работе [6] отмечается, что оценка результатов проектирования с развитием техники и общества менялась. В начале от проектировщика требовалась абсолютная эффективность будущего объекта, затем относительная, а в последствии удельная и, наконец, экономическая эффективность. Такие оценки и принципы проектирования приводили к негативным последствиям: тяжелые условия труда, напряженность в обществе, необратимые изменения в окружающей среде и т.д. Поэтому необходимо ориентироваться на социальную эффективность проектируемого объекта и, приступая к разработке технической документации, инженер должен помнить о высокой мере ответственности перед обществом.

Современные 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 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 безотходной энергосберегающей технологии производства;
- автоматизацию и механизацию производственных процессов, отдельных технологических машин и аппаратов.

Развитие современных производств 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 проектировании необходимо решать проблемы охраны окружающей среды, применения новых материалов, обеспечения надежности технологического оборудования, безопасности жизнедеятельности обслуживающего персонала. Все это требует совершенствования самого процесса проектирования, повышения качества проектной документации, четкого определения совокупности нормативных документов по отдельным стадиям проекта.

В проектировании производств ведущая роль принадлежит технологу, который разрабатывает технологическую схему производства, рассчитывает и выбирает оборудование, выдает задания специалистам-смежникам проектной организации на разработку общеинженерных разделов проекта (строительная, электротехническая, КИПиА, сантехническая и другие части), согласовывает результаты выполнения этих заданий с проектными решениями по технологическому разделу. Для координации и увязки всех разделов назначается главный инженер проекта. Он является техническим руководителем проекта в период разработки и реализации его (авторский надзор) и несет ответственность за правильность решений, сроки выполнения и технико-экономические показатели.



Рис. 1. Схема взаимосвязей отделов

Взаимосвязь отделов проектной организации можно проиллюстрировать схемой представленной на рис. 1.

В целом методику разработки проектной документации можно иллюстрировать блок-схемой рис. 2.

Как показывает приведенная 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.



Рис. 2. Блок-схема принятия решений в процессе проектирования и создания промышленного объекта

2. ПРЕДПРОЕКТИРОВАНИЕ

Предпроектная подготовка (предпроектирование) включает в себя обоснование инвестиций в строительство объекта:

- 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) технико-экономические показатели производства;
- 7) задание на проектирование и исходные материалы.

Главной задачей этого этапа является обоснование инвестиций (далее просто *обоснование*), т.е. определение экономической целесообразности и технической необходимости создания промышленного объекта. К основным вопросам, разрабатываемым в обосновании, в первую очередь относятся: определение и обоснование мощности производства, номенклатуры и качество продукции; выбор метода производства, выявление потребности в сырье и уточнение технических требований к нему и источников его поступления, обеспечение чистоты водного и воздушного бассейнов и др. Обоснование является исходным документом для выдачи заданий на разработку новых видов оборудования и составления программ научно-исследовательских работ.

При выполнении обоснования намечают *площадку для строительства* и определяют расчетную стоимость строительства и основные технико-экономические показатели предприятия (производства).

В обосновании дается краткое описание технологического процесса и оборудования, основные данные по *генеральному плану* строительства, 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, и выполняется расчет его стоимости.

В обосновании рассчитывают определяющие показатели: себестоимость продукции; годовой выпуск товарной продукции, прибыль, численность персонала; годовой фонд заработной платы, производительность труда одного работающего, общую сметную стоимость строительства; 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); потребность в энергоресурсах: электроэнергии (тыс. кВт·ч в год), паре (Ккал в год), оборотной воде ($\text{м}^3/\text{ч}$), речной воде ($\text{м}^3/\text{ч}$); грузооборот по прибытию и отправлению (тыс. т в год); потребность в территории (га).

Предварительные экономические показатели будущего производства, как правило, берутся из опыта работы завода-аналога или определяются проектировщиком по упрощенным ориентировочным расчетам. Так, влияние увеличения мощности производства на капитальные затраты может быть описано следующими выражениями:

- стоимость комплектного оборудования

$$C = C' K^\alpha,$$

где C' – стоимость оборудования для меньшей базовой мощности (для завода-аналога); K – коэффициент увеличения мощности; α – масштабный фактор, зависящий от типа оборудования и изменяющийся в пределах $0,2 \dots 1,0$;

- общие капитальные вложения Q , необходимые для строительства и монтажа, изменяются от мощности по зависимости

$$Q = Q' K^n,$$

где Q' – капиталовложения для меньшей базовой мощности; n – масштабный фактор, изменяющийся в пределах 0,38...0,98.

Определив расходы сырья, материалов и энергетики на выпуск единицы товарной продукции; капитальные затраты на строительство зданий и сооружений; приобретение и монтаж оборудования, приборов, коммуникаций; штаты проектируемого объекта, можно оценить себестоимость продукции.

Себестоимость выпускаемого предприятием продукта складывается из следующих частей:

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

2) энергетические 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, 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 предприятий и расширении действующих обычно пользуются технико-экономическими данными заводов-аналогов. В связи с этим интересно сделать анализ влияния увеличения мощности предприятия на себестоимость его продукции и на капитальные затраты [1].

Такие составные части себестоимости, как затраты на сырье, практически, не зависят от объема производства. Увеличение мощности производства обычно связано с ростом объема реакционной и вспомогательной аппаратуры. Этот рост приводит к снижению удельных расходов электроэнергии, уменьшению теплотерь в окружающую среду. В большей степени зависит себестоимость от цеховых и общезаводских расходов. С увеличением мощности эти затраты остаются приблизительно на одном уровне, следовательно, удельные и себестоимость снижаются.

Таким образом, при возрастании объема производства, снижение себестоимости продукции может произойти за счет уменьшения энергетических, цеховых и общезаводских расходов.

Далее рассмотрим основные пункты предпроектной подготовки.

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].

Балансовый метод исходит из конечных показателей развития страны на планируемый период. Например, потребность в синтетических каучуках выявляется, исходя из планируемого производства 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 рынков сбыта (рис. 3).

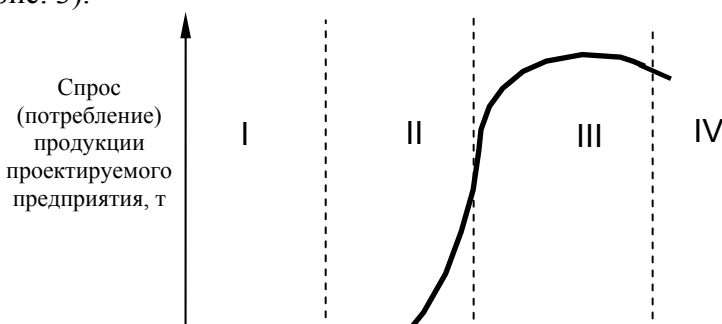


Рис. 3. Кривая прогнозирования:

- I – инкубационная стадия (постепенное расширение рынка);
- II – стадия роста (экспоненциальное расширение рынка);
- III – стадия стабилизации; IV – стадия сокращения рынка

Инкубационная стадия I характеризуется выработкой небольших партий продукта для отработки технологии и оценки потребителем качества продукции. Например, текстильным предприятиям необходимо 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. Продукт находит все большее применение. Если рынок полностью сформирован, то спрос стабилизируется (стадия III). В этот период строительство новых объектов нецелесообразно и все внимание уделяется модернизации действующих предприятий. Длительность периода стабилизации зависит от того, насколько данный продукт конкурентоспособен с новой продукцией. Стадия сокращения рынка IV может оказаться довольно коротким (около двух лет) или совсем отсутствовать.

Анализ статистики потребления продуктов, проекты производства которых намечено разрабатывать, позволяет определить: относится ли спрос на них к периоду роста или стабилизации. Для проектируемых производств промежуточных продуктов следует анализировать статистику потребления тех веществ, которые изготавливаются из данных полупродуктов.

Одним из статистических методов контроля потребности в продуктах широкого потребления является сравнение предполагаемой динамики их выработки 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 статистический метод дает возможность прогнозировать темпы роста производства данного продукта и установить очередность ввода мощностей.

2.2. ВЫБОР МЕТОДА (ТЕХНОЛОГИИ) ПРОИЗВОДСТВА

При выборе метода производства используют следующие критерии: технико-экономические показатели; возможности обеспечения сырьем; организацию 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.

Существующие способы разработки технологии получения целевых продуктов включают стадии выбора метода производства, разработки и оптимизации технологической схемы [1], [7], [8].

Выбор оптимального маршрута производства осуществляют технологи-исследователи либо на основе списков известных реакций, либо на основе химических аналогий. На этой стадии задаются вид сырья и его ресурсы, получают оценки возможных количеств целевых продуктов, степень использования сырья. Знания кинетических характеристик здесь не требуются, нужны лишь оценки значений степеней превращения.

Материальные балансы стадий процесса позволяют выяснить избытки тех или иных 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.

На этой стадии можно произвести предварительный расчет экономической эффективности метода (технологии) производства, основанного на предполагаемой стоимости продуктов и сырья, без учета капитальных и эксплуатационных затрат. В результате такого анализа выясняется целесообразность дальнейшей проработки данного метода производства целевых продуктов, и выбираются оптимальные маршруты его.

Многие 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 схемы промышленного производства проверяются как ресурсы сырья, так и денежные затраты на него по рекомендованному способу в сравнении с затратами по другим известным методам. Так, малеиновый ангидрид может быть синтезирован из бензола, фурфурола и из бутан-бутиленовой фракции (продукт нефтепереработки). 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 способу 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) [8]. При этом в биосферу выбрасывается значительное количество различных химических веществ (углеводородов, оксидов углерода, азота, серы, органических веществ и др.), загрязняющих ее. Поэтому необходимо разрабатывать технологии, которые позволяли бы сбрасывать вещества в биосферу только в допустимых количествах, причем такие вещества, которые могут усваиваться природными биологическими системами. Необходимо также учитывать, что в этих 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 все тепло, выделяемое на различных этапах производства.

В настоящее время многие из отходов 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 СО₂ можно получать мочевины (при взаимодействии с аммиаком), этиленкарбонат (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 [7].

Рассмотрим для примера новые технологии комплексной переработки метанола. Значительная часть мирового выпуска метанола потребляется в производстве формалина и других формальдегидосодержащих продуктов и их производных. Наметившаяся в последние годы тенденция к снижению и стабилизации уровня мировых цен на метанол делает особенно актуальными поиски новых технологий, позволяющих комплексно перерабатывать это сырье. Использование таких технологий особенно заман-

чиво для технического перевооружения существующих предприятий-потребителей метанола с целью расширения ассортимента продукции и значительного повышения коммерческих возможностей.

В настоящее время исследования в этой области проводятся в Институте катализа имени Г.К. Борескова и Инженерной Компанией Института катализа по трем направлениям [9]:

- 1) синтез муравьиной кислоты прямым окислением формальдегида;
- 2) получение формальдегида полимеризационной чистоты для производства полиацеталей;
- 3) получение концентрированного модифицированного формалина и производство КФ-смол на его основе.

Все эти технологии не требуют больших капитальных вложений, отличаются высокой рентабельностью и экологической безопасностью. На рис. 4 представлены новые возможности производства продуктов из метанола. Для примера рассмотрим выбор метода получения муравьиной кислоты.

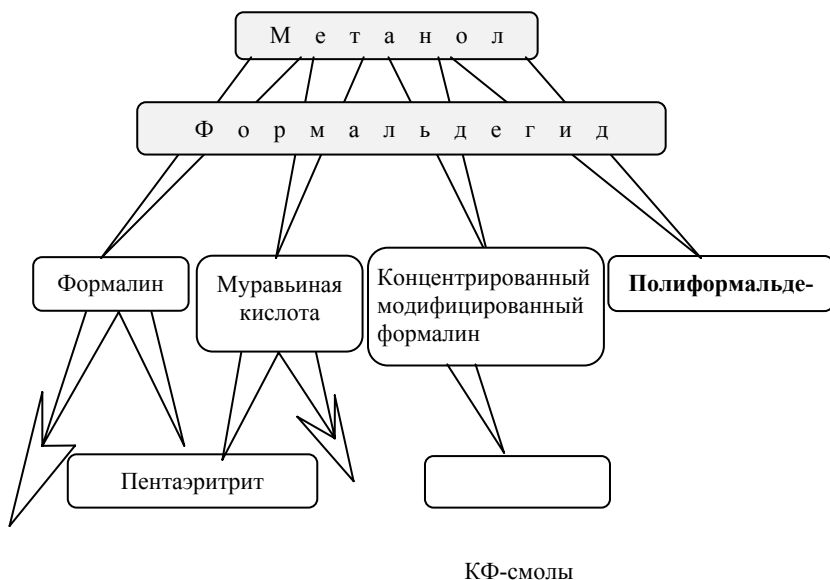


Рис. 4. Новые возможности производства продуктов из метанола

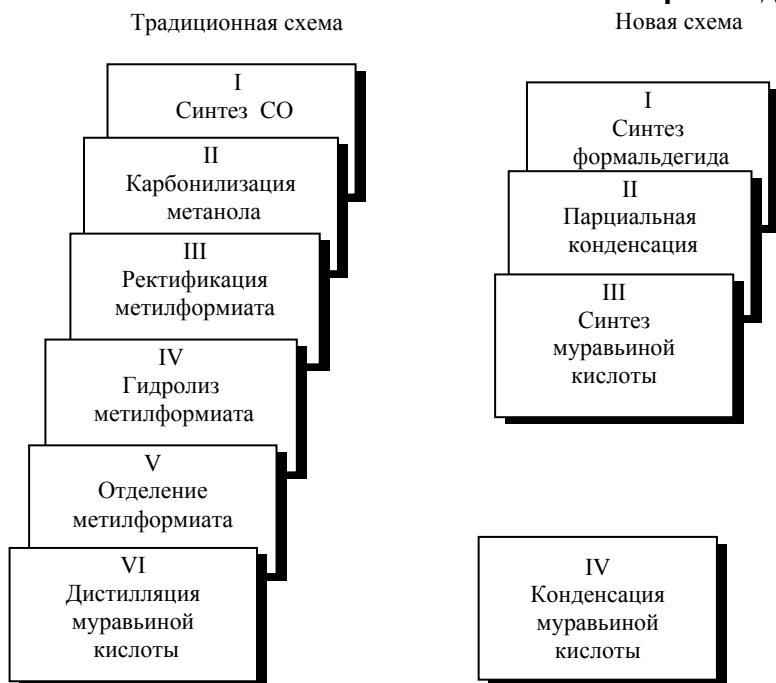


Рис. 5. Способы производства муравьиной кислоты

Большинство вновь создаваемых в мире производств муравьиной кислоты использует метод гидролиза метилформиата. Однако технологическая сложность метода и связанные с ней высокие удельные расходы сырья обуславливают создание только 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 (рис. 5). Основу его составляет прямое окисление формальдегида кислородом воздуха в трубчатом реакторе в присутствии оксидного катализатора с последующей конденсацией продукта.

По сравнению с традиционными технологиями новая имеет ряд преимуществ: полная 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 [9].

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 процесса на серебряном катализаторе. Себестоимость 85 %-ной муравьиной кислоты по этой технологии в условиях России (АО "Азот" г. Кемерово) составляет 290...300 USD за одну тонну при цене метанола 200 USD за одну тонну.

Итак, принципы выбора метода производства можно сформулировать следующим образом:

- 1) переход на новые технологии, которые позволили бы увеличить выпуск необходимой продукции заданного качества, не нарушая требований экологии;
- 2) **создание новых производств, использующих в качестве сырья отходы;**
- 3) **определение перечня продуктов, которые могут быть усвоены природными биологическими системами;**
- 4) определение допустимых количеств различных химических продуктов, которые могут попадать в биосферу без вредных последствий для окружающей среды и человека;
- 5) **создание малоэнергоёмких производств и производств с малым потреблением воды.**

Особенностью прогресса в химической промышленности является повышение степени комплексности переработки сырья. 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 [9].

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 энерго-ресурсов 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 безотходных производств является системный подход, который следует использовать при проектировании, создании и эксплуатации производства. Более конкретные принципы, направленные на 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.

1. *Химические:*

- создание малостадийных (одностадийных) химических процессов;
- разработка методов получения продуктов из дешевого и доступного сырья;
- разработка процессов с повышенной селективностью;
- применение "сопряженных" методов 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 безотходных территориально-промышленных комплексов;
- создание технологии по переработке отходов производств.

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

Для новых сложных производств на основе выбранного метода часто составляют предварительную эскизную технологическую схему, на которой показывают основные технологические стадии и материальные потоки между ними, выявляют стадии, подлежащие усовершенствованию. Разработка этой схемы заключается в создании совокупности процессов, направленных на выпуск продукта заданного количества и качества при минимальной себестоимости. Их можно разделить на основные (химические, физико-химические, механические) и вспомогательные (транспортировка, упаковка, складирование,

удаление отходов). Данные процессы (стадии) изображаются прямоугольниками и структурная (эскизная) схема имеет вид, представленный на рис. 6.

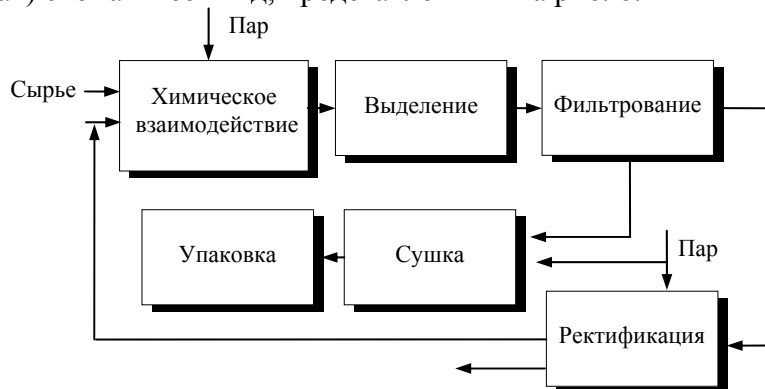


Рис. 6. Структурная технологическая схема

Руководствуясь предварительным (эскизным) вариантом такой технологической схемы, проектировщик приступает к составлению и расчету уравнений материального баланса для каждой стадии процесса. Назначение расчета – определение затрат сырья для получения заданного количества конечного продукта; объемов и составов реакционных масс на каждой стадии процесса, количеств и составов отходов сточных вод и газовыделений; определение расходных норм по сырью; объема реакционной массы на данной стадии, необходимого для получения одной тонны готового продукта. Расчет материальных балансов стадий, связанных с химическими превращениями, проводят на основании стехиометрических уравнений реакции.

Исходными данными для проведения расчета являются: эскизная технологическая схема производства с указанием основных и побочных реакций; степень превращения и выход; состав исходных веществ и состав реакционной массы, поступающей с предыдущей стадии; данные регламента 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 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 учитывают допустимые потери сырья, которые составляют: 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 одну тонну готового продукта. При этом рассчитывают расходные коэффициенты по сырью, объемы реакционных масс, приходящиеся на одну тонну готовой продукции. Данные по реальным загрузкам в 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 аппараты и объемы реакционных масс.

Одновременно составляют и рассчитывают уравнения теплового баланса по стадиям производства. В результате расчетов уравнений 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 производит заказчик. При этом создается комиссия, в состав которой входят представители генерального проектировщика, местной администрации, 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]:

- 1) ориентировочная потребность в сырье;
- 2) месторасположение источников сырья;
- 3) размещение рынков сбыта готового продукта;
- 4) потребность в энергии (тепловой и электрической);
- 5) количество и качество технологической воды;
- 6) ориентировочные размеры строительной площадки с учетом перспективы расширения объекта;
- 7) потребность в рабочей силе (по квалификациям);
- 8) 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 имеет кадровый вопрос. Предприятие должно быть обеспечено высококвалифицированными кадрами химиков, технологов, механиков, так как производство продуктов в данной 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.

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:

- 1) инженерные обследования и изыскания в объеме, требуемом для выбора площадки;
- 2) получение у заинтересованных организаций технических условий на подключение объекта к инженерным и транспортным коммуникациям;
- 3) 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;
- 4) технико-экономическое сравнение альтернативных вариантов и выбор оптимального.

2.5. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ответственным за разработку задания является заказчик проекта. Непосредственная разработка задания на проектирование производится проектировщиком по поручению заказчика.

Задание на проектирование должно содержать следующие сведения [5, 8]:

- 1) наименование производства и предприятия;
- 2) основание для проектирования;
- 3) вид строительства;
- 4) стадийность проектирования;
- 5) требования по вариантной и конкурсной 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 [1].

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 строи-

тельства и эксплуатации проектируемых предприятий) может быть достигнута применением систем автоматизированного проектирования.

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:

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

3. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

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: этот раздел готовится в соответствии с нормативными документами, утвержденными Госстроем;

3) сметная документация;

4) паспорт рабочего проекта.

Подготовленный рабочий проект представляется на экспертизу и утверждение.

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 с учетом новейших достижений науки и техники все основные технические, технико-экономические, экологические и другие проблемы проектируемого производства: 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 II-01-95). Проект должен содержать 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:

1) основание для разработки проекта;

2) исходные материалы для проектирования;

3) краткую характеристику предприятия и входящих в его состав производств;

- 4) 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;
- 5) сведения о социально-экономических и экологических условиях района строительства;
- 6) основные показатели по генеральному плану, инженерным сетям и коммуникациям, мероприятия по инженерной защите территории;
- 7) общие сведения, характеризующие условия и охрану труда работающих; санитарно-эпидемиологические мероприятия;
- 8) сведения об использованных в проекте изобретениях;
- 9) технико-экономические показатели, полученные в результате разработки проекта, их сопоставление с показателями утвержденного (одобренного) обоснования инвестиций в строительство объекта и установленными заданием на проектирование;
- 10) сведения о проведенных согласованиях проектных решений; подтверждении соответствия разработанной проектной документации государственным нормам, правилам, стандартам, исходным данным, а так же техническим условиям и требованиям, выданным органами государственного надзора (контроля) и заинтересованными организациями при согласовании места размещения объекта (площадки строительства).

2. *Генеральный план и транспорт* – приводятся краткая характеристика района и площадки строительства; решения и показатели по ситуационному и генеральному плану (с учетом зонирования территории), внутривладосточному 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. Для линейных сооружений приводится план трасс (внутри- и внешнеплощадочных), а при необходимости – продольный профиль трассы;
- картограмму земельных масс;
- генеральный план, на котором наносятся существующие и проектируемые (рекомендуемые) и подлежащие сносу здания и сооружения, объекты охраны окружающей среды и благоустройства, озеленение территории, принципиальные решения по расположению внутривладосточных инженерных линий и транспортных коммуникаций, планировочные отметки территории. Выделяются объекты, сети и транспортные коммуникации, входящие в пусковые комплексы.

3. *Технологические решения* содержат:

- 1) данные о производственной программе;
- 2) характеристику и обоснование решений по технологии производства;
- 3) данные о трудоемкости изготовления продукции, механизация и автоматизация технологических процессов;
- 4) состав и обоснование применяемого оборудования (в том числе импортного);
- 5) решения по применению малоотходных и безотходных технологических процессов и производств, вторичному использованию ресурсов;
- 6) предложения по организации контроля качества продукции;
- 7) решения по организации ремонтного хозяйства;
- 8) данные о количестве и составе вредных выбросов в атмосферу и сбросов в водные источники по отдельным цехам, производствам, сооружениям;
- 9) технические решения по предотвращению (сокращению) выбросов и сбросов вредных веществ в окружающую среду; оценка возможности возникновения аварийных ситуаций и решения по их предотвращению;
- 10) вид, состав и объем отходов производства, подлежащих утилизации и захоронению;
- 11) топливно-энергетический и материальный балансы технологических процессов;
- 12) 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* – 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 них 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, электроснабжению, 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* – 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* – выполняется в соответствии с государственными стандартами, строительными нормами и правилами, утвержденными Минстроем России, нормативными документами и другими нормативными актами, регуливающими 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 Минстроя России по определению стоимости строительства.

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

1) сводные сметные расчеты стоимости строительства и, при необходимости, сводку затрат¹;

2) объектные и локальные сметные расчеты;

3) сметные расчеты на отдельные виды затрат (в том числе на проектные и изыскательские работы).

В состав *рабочей документации* включаются: объектные и локальные сметы².

¹ Составляются в том случае когда капиталовложения предусматриваются из разных источников финансирования.

² Составляются, если это предусмотрено договором на выполнение рабочей документации.

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:

- в базисном (постоянном) уровне, определяемом на основе действующих сметных норм и цен;
- в текущем или прогнозируемом уровне, 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, то есть 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. 1.

1. Примерный перечень технико-экономических показателей для объектов производственного назначения

| Наименование показателя | Единицы измерения |
|---|-------------------|
| Мощность предприятия, годовой выпуск продукции: | |
| в стоимостном выражении | тыс. р. |
| в натуральном выражении | в соотв. ед. |
| Общая площадь участка | га |
| Коэффициент застройки | отн. ед. |
| Удельный расход на единицу мощности: | |
| электроэнергии | кВт·ч |
| воды | куб. м |
| природного газа | тыс. куб. м |
| мазута | т |
| угля | т |
| Общая численность работающих | чел. |

| Наименование показателя | Единицы измерения |
|--|-------------------|
| Годовой выпуск продукции на работающего: | |
| в стоимостном выражении | тыс. р./чел. |
| в натуральном выражении | ед./чел. |

Продолжение табл. 1

| Наименование показателя | Единицы измерения |
|--|--------------------|
| Общая стоимость строительства, в том числе строительно-монтажных работ | тыс. р. 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 |

Рассмотрим некоторые основные разделы проекта.

3.1.1. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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 промышленности затраты на сырье составляют значительную долю производственных расходов.

При выборе метода 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, 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 регулировки параметров процесса и полной его ав-

томатизации. Непрерывные схемы предусматриваются, как правило, для крупно- и среднетоннажных производств, а периодические – для малотоннажных, что объясняется в первом случае рентабельностью применения средств автоматизации.

На данном этапе проектирования 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 необходимых 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. 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 аппаратурного 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

$$i = \frac{Q}{F \tau} = \frac{K_2 F \tau \Delta t_{\text{ср}}}{F \tau} = K_2 \Delta t_{\text{ср}} = K_2 \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,31 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{K_2 (\Delta t_6 - \Delta t_m)}{\left[\frac{1}{\alpha_1} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_2} \right] 2,31 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (3.1)$$

где F – поверхность теплообмена; K_2 – коэффициент теплопередачи; τ – время; $\Delta t_{\text{ср}}$ – среднелогарифмическая разность температур; Δt_6 , Δt_m – большая и меньшая разности температур между теплоносителями;

α_1 , α_2 – коэффициенты теплоотдачи; δ_j – толщина стенки и отложений; λ_j – теплопроводность стенки и отложений.

Соотношение (3.1) можно использовать для составления наглядной схемы действий разработчика по интенсификации конкретного теплообменного аппарата, вводя обозначения: \uparrow – необходимость увеличения и \downarrow – необходимость уменьшения того или иного параметра [10]. В этом случае последнее соотношение можно записать в виде

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

В соответствии с соотношением (3.1) увеличивать необходимо наименьшее α . 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

$$i = \frac{M}{V} = K_3 F \frac{\Delta C}{V}, \quad (3.3)$$

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 м^2 полотна тарелки; ΔC – движущая сила процесса.

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

$$i = K_3 \frac{\Delta C}{n(H_6 + H_c)}. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) видно, что на величину фактора интенсификации оказывает влияние кинетический параметр K_3 , движущая сила ΔC 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 η , получим

$$i = \eta K_3 \frac{\Delta C}{n_t (H_6 + H_c)}, \quad (3.5)$$

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

$$W_{B_1} = \frac{dG_B}{dt} = \frac{K_{ж} a V}{C_B^* - C_B}, \quad (3.8)$$

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

Скорость связывания вещества B в жидкой фазе

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

где r_B – скорость реакции; φ_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

$$i = \sum_{j=1}^n \frac{W_B}{V_p},$$

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 аппаратурно-конструктивные. В табл. 2 приведены режимно-технологические методы, которые представляют собой набор приемов интенсификации [10].

В табл. 3 приведена классификация аппаратурно-конструктивных методов интенсификации.

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

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

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 [7].

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 [9], что наложение термопульсаций способствует увеличению коэффициентов массопередачи на 40...50 %, вследствие более интенсивных изменений скорости, температуры и концентрации паров.

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 микропленка 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 промышленного предприятия, содержащая комплексное решение вопросов планировки и благоустройства территории, размещения зданий и сооружений, инженерных сетей, организации систем хозяйственного и бытового обслуживания. Ситуационным планом промышленного 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 [11].

Разрабатывая ситуационный план, стремятся территориально объединить предприятия в один промышленный узел. Ситуационный план разрабатывается в масштабе 1:5000, 1:10 000, 1:25 000. На рис. 7 показан промышленный узел, объединяющий химический и текстильный

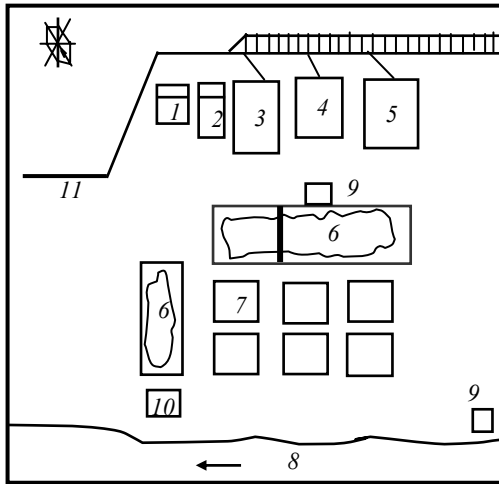


Рис. 7. Ситуационный план:

- 1 – пассажирский ж/д вокзал; 2 – товарная ж/д 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

комбинаты, ТЭЦ. Эти предприятия 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, отмечаются 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 [11]. Розу ветров располагают на ситуационных и генеральных планах в верхнем левом углу чертежа и строят в соответствующем масштабе следующим образом (рис. 8); 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 течении года (результат многолетних наблюдений) по соответствующим румбам. Полученные точки соединяют. Наиболее вытянутая сторона полученной фигуры показывает направление господствующих ветров.

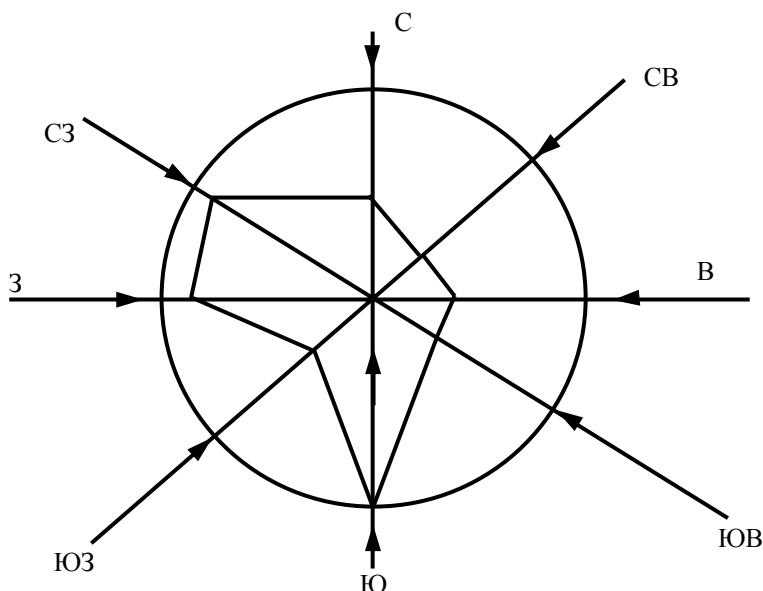


Рис. 8. Роза повторяемости ветров

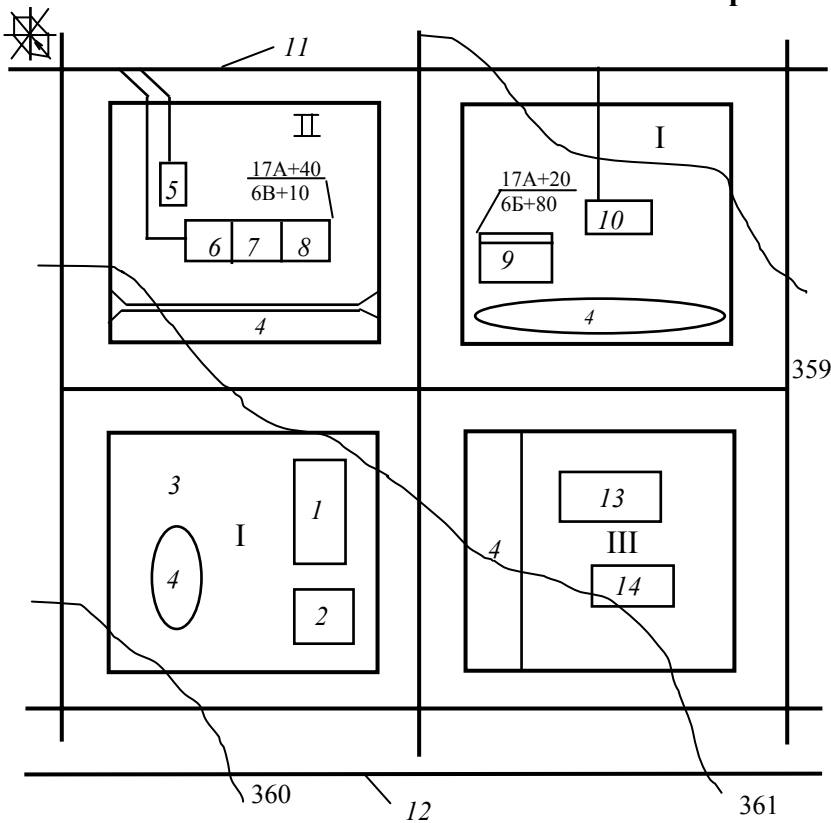


РИС. 9. СХЕМА ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА ПРЕДПРИЯТИЯ:

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

Промышленные здания рекомендуется располагать продольной осью по направлению господствующего ветра или под углом 45° к нему.

С использованием ситуационного плана разрабатывают генеральный план проектируемого предприятия в масштабе 1:500, 1:1000, 1:200 или 1:5000 (рис. 9).

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.

При разработке генерального плана, прежде всего, проводят зонирование территории проектируемого предприятия, т.е. деление ее на четыре зоны (рис. 9):

I – предзаводская, где располагаются вспомогательные здания (административные корпуса, стоянки пассажирского транспорта);

II – производственная, где находятся основные и вспомогательные цеха;

III – подсобная, предназначенная для энергетических объектов и для прокладки инженерных коммуникаций;

IV – складская с сортировочными станциями и депо.

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-, газо-, паропроводов 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 блокированная, когда отдельные цехи размещаются в одном здании.

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

- не менее 15 м для предприятий, выделяющих вредности;
- для азотных заводов – не менее 20 м.

На рис. 9 представлена схема генерального плана завода полупродуктов и красителей.

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) равно $17\text{ км }40\text{ м} - 17\text{ км }20\text{ м} = 20\text{ м}$, 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 жилому району с наветренной стороны. Не разрешается размещать в плохо проветриваемых долинах или котловинах предприятия, которые выделяют в атмосферу вредные вещества (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

Выше отмечалось, что после составления эскизной технологической схемы рассчитывают материальные и тепловые балансы для всех стадий. Затем при разработке проекта выбирают для каждой стадии тип и производят расчет и подбор (конструктивную разработку) технологического оборудования.

Рассмотрим в начале принципы выбора типа 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 быть найдены ни рациональный способ сушки, ни конструкция аппарата. Список свойств материала как объекта сушки, необходимых для выбора способа, наиболее полно представлены в [12]. Иногда этот список необходимо пополнить также научно-исследовательскими работами, которые выполняет отраслевой НИИ.

Выбор рационального метода сушки обусловлен не только комплексом характеристик материала, но и особенностями производства (малотоннажное, крупнотоннажное, периодическое, непрерывное и т.д.), а также номенклатурой выпускаемого сушильного оборудования. Ограничительными условиями при выборе являются технологические, экономические и требования к качеству готового продукта [13].

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

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

Окончательный выбор типа 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].

Итак, можно рекомендовать следующую последовательность выбора типа оборудования для каждой стадии технологической схемы:

- 1) исследовать (отраслевые НИИ) или определить по справочной литературе физико-химические свойства перерабатываемого материала и готового продукта;
- 2) на основании требований технологии и экономики выбрать рациональный способ реализации процесса;
- 3) предварительно выбрать на основании литературно-патентного обзора тип или несколько типов аппаратов для осуществления процесса стадии;
- 4) окончательный выбор сделать на базе технико-экономического анализа, а при необходимости (для крупнотоннажных производств) с учетом результатов исследований отраслевых НИИ.

Далее рассмотрим общие принципы анализа и расчета процессов и аппаратов.

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 [14, 15]:

Гидромеханические процессы (рис. 10), скорость которых определяется законами гидродинамики:

$$j_{\tau} = \frac{dV}{F d\tau} = \frac{\Delta p}{R_1} = k_1 \Delta p, \quad (3.12)$$

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

Теплообменные процессы (рис. 11), скорость которых определяется законами теплопередачи:

$$j_{\tau} = \frac{dQ}{F d\tau} = \frac{\Delta t}{R_2} = k_2 \Delta t, \quad (3.13)$$

где Q – количество переданного тепла; F – поверхность теплообмена; τ – время; k_2 – коэффициент теплопередачи (величина, обратная термическому сопротивлению R_2); Δt – средняя разность температур между обменивающимися теплом материалами (движущая сила процесса).

Массообменные (диффузионные) процессы (рис. 12), скорость которых определяется скоростью перехода вещества из одной фазы в другую:

$$j_{\tau} = \frac{dM}{F d\tau} = \frac{\Delta c}{R_3} = k_3 \Delta c, \quad (3.14)$$

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

Механические процессы (рис. 13), 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 M – количество прореагировавшего в химическом процессе вещества; V_p – объем реактора; τ – 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 аппараты-реакторы.

По второму 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.

По третьему признаку за основу классификации берется 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 реакционных 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 Φ – 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:

$$\sum M_n = \sum M_k ,$$

где $\sum M_n$, $\sum M_k$ – количество исходных и конечных веществ, соответственно;

- 2) на основании закона сохранения энергии составляют тепловой баланс процесса:

$$\sum Q_n + \sum Q_p = \sum Q_k + \sum Q_{пот} ,$$

где $\sum Q_n$, $\sum Q_k$ – теплота, поступающая в аппарат с исходными материалами и теплота, отводимая из аппарата с конечными продуктами, соответственно; $\sum Q_p$ – тепловой эффект процесса; $\sum Q_{пот}$ – 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). Конкретные решения по расчету и конструированию оборудования даны в специальной литературе. В качестве примера можно привести один из трех справочников А.С. Тимонина [27].

Определив основной размер, выбирают стандартное оборудование или разрабатывают его как нестандартное. Ранее отмечалось, что проектирование – итерационный процесс, поэтому при выборе оборудования проектировщику иногда приходится вновь возвращаться на стадию выбора типа аппарата.

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

При разработке новых 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 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.

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. Кроме того, физическое моделирование требует значительных материальных затрат и времени.

Поэтому в настоящее время широко распространенным методом расчета технологических процессов и аппаратов стал метод математического моделирования. Математическое моделирование включает три взаимосвязанных этапа:

1) составление математического описания изучаемого объекта;

2) выбор метода решения системы уравнений математического описания и его реализация в форме моделирующей программы;

3) определение численных значений коэффициентов математической модели, установление соответствия (адекватности) математической модели технологическому объекту.

В модели должны быть учтены все наиболее существенные факторы, влияющие на процесс, и вместе с тем она не должна быть загромождена множеством мелких, второстепенных факторов. На рис. 14 изображена общая схема разработки математических моделей.



Рис. 14. Этапы разработки математической модели

Математическое моделирование успешно используется для решения задач анализа и синтеза на ЭВМ сложных технологических объектов.

Метод математического моделирования в сочетании с современными вычислительными средствами позволяет с высокой точностью и достаточно быстро исследовать различные варианты аппаратного оформления процесса, изучить его основные особенности и вскрыть резервы усовершенствования. При этом в рамках используемой модели всегда гарантируется отыскание оптимальных решений.

Следует иметь в виду, что математическое моделирование ни в коей мере не противопоставляется физическому моделированию, а скорее призвано дополнить его имеющимся арсеналом средств математического описания. 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 аппаратном 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 аппаратного оформления технологических стадий; для определения оптимальных конструкционных параметров оборудования и технологических режимов функционирования установки.

Чтобы критерий эффективности достаточно полно характеризовал качество функционирования технологического объекта (или отдельной 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 исключить на первом этапе из дальнейшего рассмотрения существенную часть альтернативных вариантов оборудования как весьма далеких от оптимальных. Так, например, при выборе типа аппаратного оформления ступени контакта для массооб-

менного аппарата при прочих равных условиях всегда отдадут 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 [16].

Чувствительность технологического объекта (аппарата) – это свойство объекта изменять характеристики своего функционирования под влиянием малых изменений режимных и собственных 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 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 работа 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 %-е 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, например [17...23].

Нестандартное оборудование ориентировано на конкретный технологический процесс и проектируется специально для него из расчета на заданную производительность. Современный уровень технологического производства требует высокоэффективных, селективных технологических процессов, сокращения числа технологических стадий для уменьшения потерь промежуточных продуктов, быстрой переналадки оборудования и, следовательно, разработки нового оборудования, которое позволило бы с наибольшей эффективностью осуществлять нетрадиционные высокоинтенсивные процессы и совмещение разных процессов.

Для уменьшения числа технологических стадий используют многофункциональные аппараты, в которых совмещают различные технологические процессы. 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 их обслуживание.

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.

Техническое задание обычно содержит эскиз разработанного оборудования с указанием его технологического назначения и кратким описанием 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.), способа 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 охарактеризовать степень огне- и взрывоопасность помещения, где будет установлен аппарат, способ установки аппарата. С возможно большей тщательностью следует охарактеризовать химическую агрессивность перерабатываемых веществ и дать рекомендацию к выбору материала для изготовления корпуса аппарата и его деталей.

На основе технического задания конструкторский отдел проектной организации готовит чертежи общего вида аппарата и его отдельных узлов. Затем эта проектная документация предоставляется заводу-изготовителю, где конструкторское бюро разрабатывает рабочие чертежи с учетом конкретных условий работы данного машиностроительного предприятия.

3.1.4. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Принципиальную технологическую схему разрабатывают 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, вопросы обеспечения экологической безопасности и охраны труда, автоматизации производства [1], [8], [24].

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 поступает в цех сырье и вспомогательные материалы, 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 схеме.

На принципиальной технологической схеме изображают оборудование не только основных, но и вспомогательных технологических стадий (операций) – таких, как подготовка (измельчение, растворе-

ние, 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 связана 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. 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 основными линиями в два раза толще, чем оборудование. 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 (рис. 15).

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. 15 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 кожухотрубчатых 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 кожухотрубчатых 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 кожухотрубчатых 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.

Выше 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:*
- случайные;
 - периодические.

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 следующие. 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. Эта канализация предназначена 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.

3.1.5. ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ АЗОКРАСИТЕЛЕЙ НА ОАО "ПИГМЕНТ"

Ранее отмечалось, что проекты должны обеспечивать реализацию последних достижений науки, внедрение высокопроизводительного оборудования, поэтому на любой стадии проектирования включая и разработки принципиальной технологической схемы, могут вноситься изменения, учитывающие результаты новых исследований технологических разработок.

Рассмотрим, в связи с этим, пример предлагаемого перехода типового периодического метода производства красителей на непрерывный [25].

Тамбовское ОАО "ПИГМЕНТ" выпускает в широком ассортименте азокрасители. Эти красители производятся по периодической технологии, что сопряжено с низким уровнем автоматизации процессов, нестабильностью качества получаемого продукта.

Переход к непрерывному способу производства азокрасителей связано с немалыми трудностями:

- использование при синтезе красителей совмещенных схем;
- невозможность проведения экспресс-анализа с целью оптимизации процесса;
- воздействие на процесс случайных возмущений, приводящее к отклонению от заданных технологических параметров.

В Тамбовском государственном техническом университете при участии сотрудников Московского НПО "НИОПиК" и Тамбовского ОАО "ПИГМЕНТ" разработаны новые гибкие автоматизированные установки непрерывного производства азокрасителей. Эта новая технология исключает перечисленные выше недостатки периодического способа производства.

Рассмотрим основы непрерывной технологии производства азокрасителей. Известно, что производство азопигментов включает следующие основные стадии.

- 1) приготовление суспензий (растворов) исходных реагентов;
- 2) химическое взаимодействие (диазотирование и азосочетание);
- 3) физико-химические, механические (фильтрование, сушка, измельчение).

Для реализации процессов первой и третьей стадии разработана и выпускается промышленностью высокопроизводительная аппаратура, которая в достаточной мере удовлетворяет требования непрерывного производства, поэтому разработчиками новой технологии особое внимание было уделено аппаратному оформлению стадий диазотирования и азосочетания.

Рассмотрим фрагмент принципиальной технологической схемы непрерывного производства азопигментов (рис. 16).

Исходная суспензия амина, проходя активатор 1 и емкости для дополнительной обработки 2 и 3, приобретает свойства, исключающие образование агрегатов и снижение поверхности контакта фаз. Это обстоятельство и турбулентный режим в диазотаторе 4 позволяет увеличить скорость диазотирования примерно в 20 раз.

Обработанная суспензия амина из аппарата 3 подается насосом в нижнюю часть диазотатора 4.

Диазотатор представляет собой колонный аппарат, состоящий из пяти царг. Каждая царга имеет свою рубашку для поддержания необходимого режима (рис. 17).

Приготовленный в аппарате 6 нитрит натрия подается распределено по нижним трем царгам диазотатора 4, таким образом чтобы в каждой царге и на выходе из реактора концентрация азотистой кислоты находилась в пределах 0,2...0,5 г/л. Секционирование теплообменной рубашки, позволяет поддерживать убывающий профиль, температуры по высоте аппарата: 15...100 °С на его входе и от 5...30 °С на выходе. Это обеспечивает хорошее растворение амина в нижних царгах и замедляет разложение в верхних.

Из диазотатора продукты реакции поступают в центрифугу 5, где происходит отделение частиц амина от жидкого диазосоединения.

Контроль процесса диазотирования осуществляется с помощью анализатора 8.

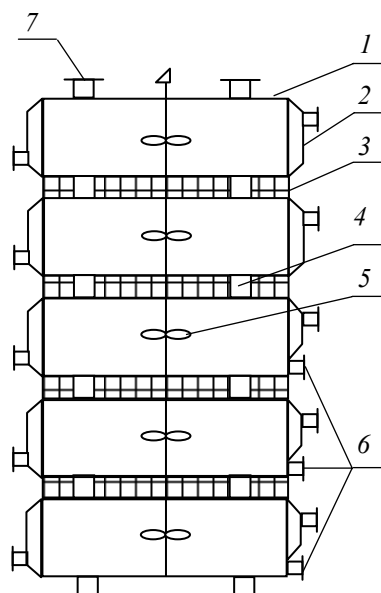
Из центрифуги 5 диазосоединения направляется в реактор азосочетания 9, также распределено по царгам. Реактор 9 представляет собой колонный аппарат, состоящий из двух царг, в которое также распределено подается нейтрализующий агент (кальцинированная сода). Азосоставляющая подается в нижнюю часть аппарата. Реактор снабжен мешалкой и рубашкой для теплообмена.

Полученный в реакторе краситель в виде суспензии направляется на дальнейшую обработку: фильтрацию, сушку, размол.

Следует отметить, что секционирование реактора 9 и диазотатора 4 позволяет в случае необходимости или экономической целесообразности отключение царг.

Рассмотрим схему и принцип действия диазотатора.

Аппарат состоит из пяти тарелок-царг, выполненных



из титана. Каждая царга имеет рубашку 2 и отделена от соседней перегородкой 3. В перегородке имеются переточные каналы 4. Диазотатор снабжен многоярусной мешалкой 5, частота вращения которой равна 500 мин^{-1} .

Царги снабжены штуцерами ввода и вывода реагентов и продуктов реакции. Наличие перегородок и мешалки создает пленочный режим движения реакционной массы.

Такая конструкция аппаратов позволяет использовать их в так называемых совмещенных схемах.

В промышленности полупродуктов преобладают многоассортиментные периодические производства, которые организованы по принципу совмещения технологических схем. Для них характерны частые смены ассортимента продукции, наработка на одной технологической схеме множества продуктов, а также то, что большинство продуктов являются сырьем для наработки другой продукции.

Все это требует оперативного управления оборудованием, что обеспечит выполнение плана, максимальной загрузки оборудования при минимальных энергозатратах.

Поэтому был разработан алгоритм оптимизации расписания работы оборудования совмещенных схем в производстве дисперсных красителей ОАО "ПИГМЕНТ". Реализация этого алгоритма осуществляется с помощью ЭВМ. При этом машина просчитывает варианты, предлагаемые человеком, который и оценивает результат и намечает пути повышения эффективности производства.

Рис. 17. Схема диазотатора:

- 1 – корпус; 2 – рубашка;
- 3 – перегородка; 4 – переточный канал;
- 5 – мешалка;
- 6 – штуцер ввода реагентов;
- 7 – штуцер вывода продуктов

3.1.6. 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 [11].

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. 18) 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. 19) применяют для каждой колонны здания, а стены возводят с опорой на фундаментные балки.

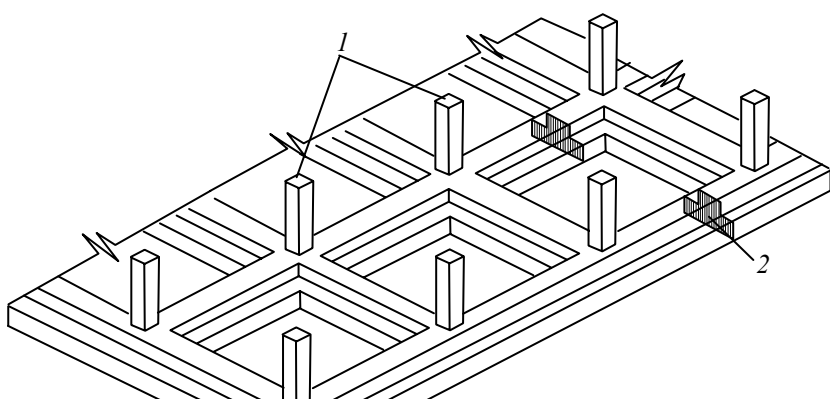


Рис. 18. Ленточный фундамент:

1 – колонна; 2 – фундамент

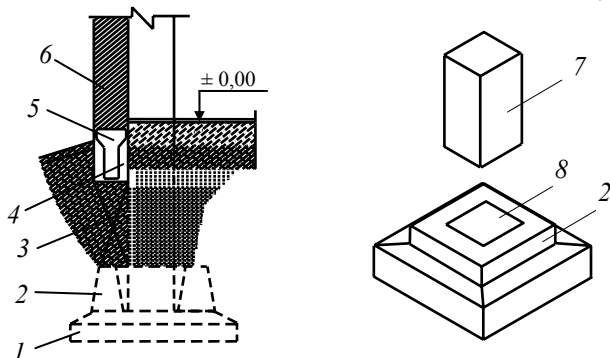


Рис. 19. Столбчатый фундамент:

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

Свайные фундаменты (рис. 20) используются в случае слабого грунта или высокого расположения уровня грунтовых вод. Железобетонные сваи обычно выпускают квадратного или круглого сечения. 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.

Сплошные фундаменты (рис. 21) применяются при неблагоприятных геологических и гидрологических условиях строительной площадки. Фундаменты образуют сплошную железобетонную плиту под всем зданием толщиной от 500 до 1500 мм.

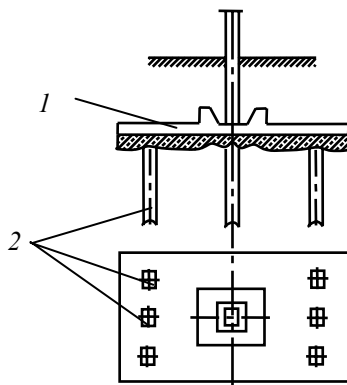


Рис. 20. Свайный фундамент:

1 – железобетонный башмак;
2 – сваи

Ригели (рис. 22) предназначены для размещения плит перекрытия и имеют высоту 800 мм.

Балки и фермы (рис. 23, 24) применяются для покрытий промышленных зданий. Железобетонные балки применяются для пролетов от 6 до 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. 24).

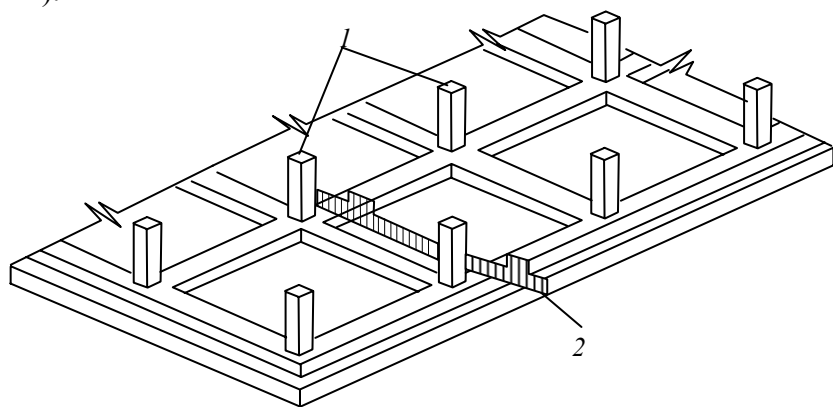


Рис. 21. Сплошной фундамент:
1 – колонна; 2 – монолитная плита



Рис. 22. Ригель

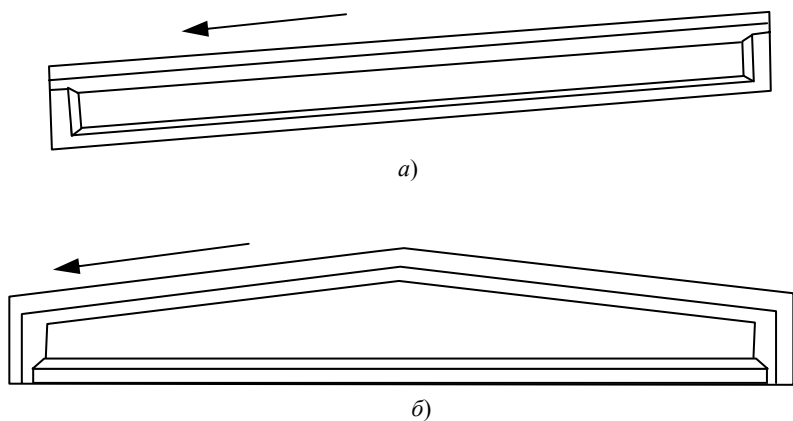


Рис. 23. Железобетонные балки:

a – железобетонная балка для односкатных покрытий;
б – железобетонная балка для двускатных покрытий

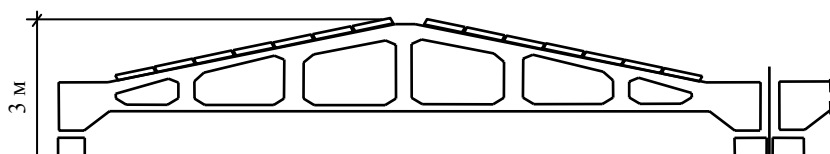
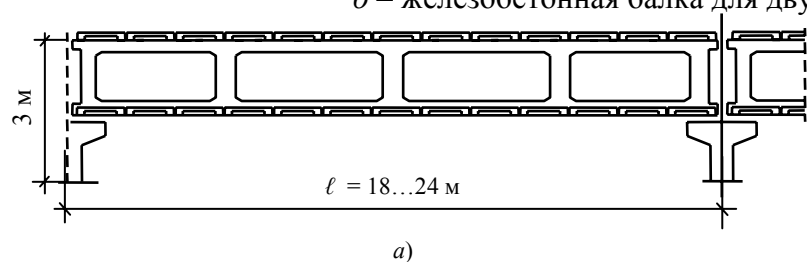


Рис. 24. Железобетонные фермы:
a – с параллельными поясами; *б* – арочная

Балки и фермы крепятся к колоннам с помощью анкерных болтов и закладных пластин.

Полы. На первом этаже основанием для них служит уплотненный верхний слой грунта, а на этажах железобетонные плиты междуэтажных перекрытий. 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 (клеевого материала). На клеевой материал стелют покрытие. Это верхний слой пола, так называемая одежда (линолеум, паркет и т.п.).

Лестницы по назначению (рис. 25) подразделяются на основные (входные) и второстепенные (между этажами); служебные – для обслуживания оборудования; пожарные и аварийные.

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.

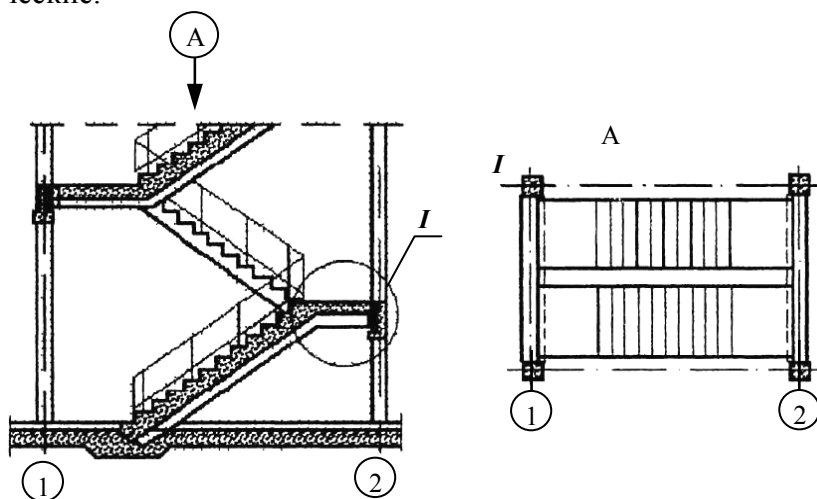


Рис. 25. Сборные железобетонные лестницы

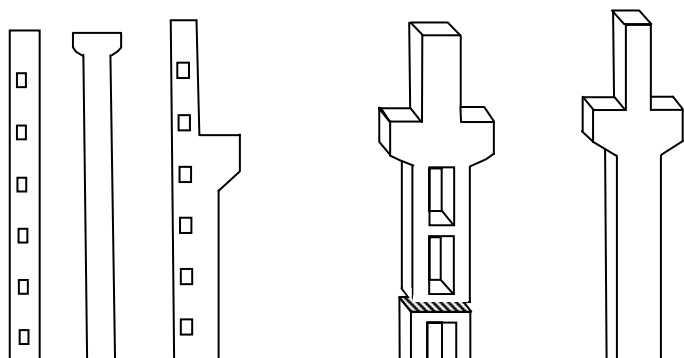


Рис. 26. Колонны:

a – колонны квадратного сечения;
б – двухветвевые колонны прямоугольного сечения

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. 26).

В железобетонных колоннах предусмотрены стальные закладные элементы (рис. 27).

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. 28).

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.

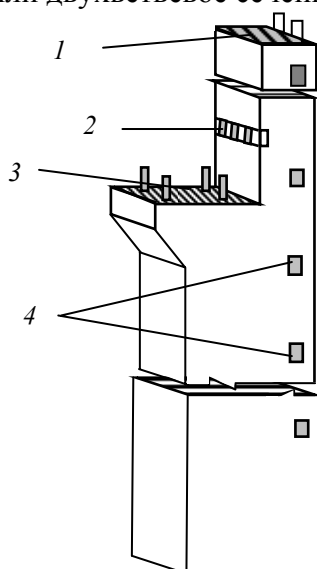


Рис. 27. Закладные элементы колонны:

1 – оголовок; *2* – упор подкрановой балки; *3* – опора подкрановой балки; *4* – элемент крепления стеновых панелей

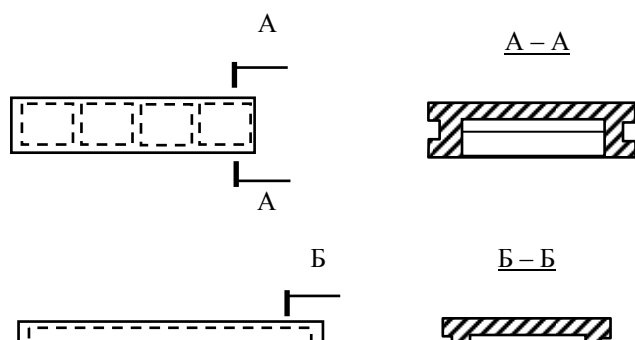


Рис. 28. Плиты перекрытий

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 II класса и не ниже третьей степени огнестойкости.

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 горючие материалы и вещества, жидкости с температурой вспышки паров более 61 °С; вещества, способные гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом (деревообделочные, столярные, мебельные, хлопкообрабатывающие, трикотажные и текстильные фабрики и др.).

К категориям Г, Д и Е относят производства, связанные с обработкой негорючих 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 про-

мышленного 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 отопляемых 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 [11]. 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 [11]. 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 клееные 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 клееных конструкций в четыре-пять раз больше чем у сборного железобетона.

При размещении самого химического оборудования различают три варианта компоновки: *закрытый* (в промышленных зданиях), *открытый* (на открытых железобетонных постаменты) 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 [11]. В таком цехе технологическое оборудование располагают на сборно-разборных этажерках, не связанных с несущим 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 [11].

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 т.п. 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, 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 (компрессоры, 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 привлечь 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. 29).

Аппараты ориентируют и привязывают по двум взаимно перпендикулярным направлениям к осям колонн и к уже нанесенным на план аппаратам.

Кроме изображения оборудования в плане по этажам делают поперечные и продольные разрезы цеха (рис. 30, 31), 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.

Рассмотрим в качестве примера варианты компоновки ректификационной установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 15.

При открытом варианте компоновки оборудование данной установки располагается на железобетонной этажерке в соответствии с правилами, изложенными выше. На рис. 30 представлен фрагмент плана расположения технологического оборудования на отметке 0.00 м, а на рис. 31 – разрез Г-Г.

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 (см. рис. 32). Такое размещение колонн 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;
- 2) вспомогательные;
- 3) обслуживающие.

Имея эти помещения, приступают к компоновке производства в целом (рис. 33).

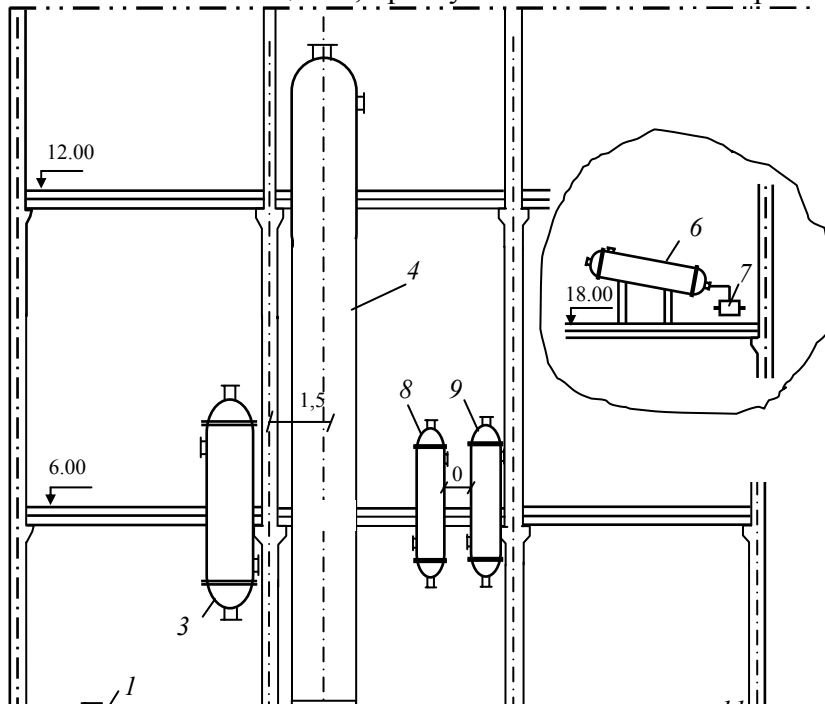


Рис. 31. Разрез Г-Г:

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.

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.

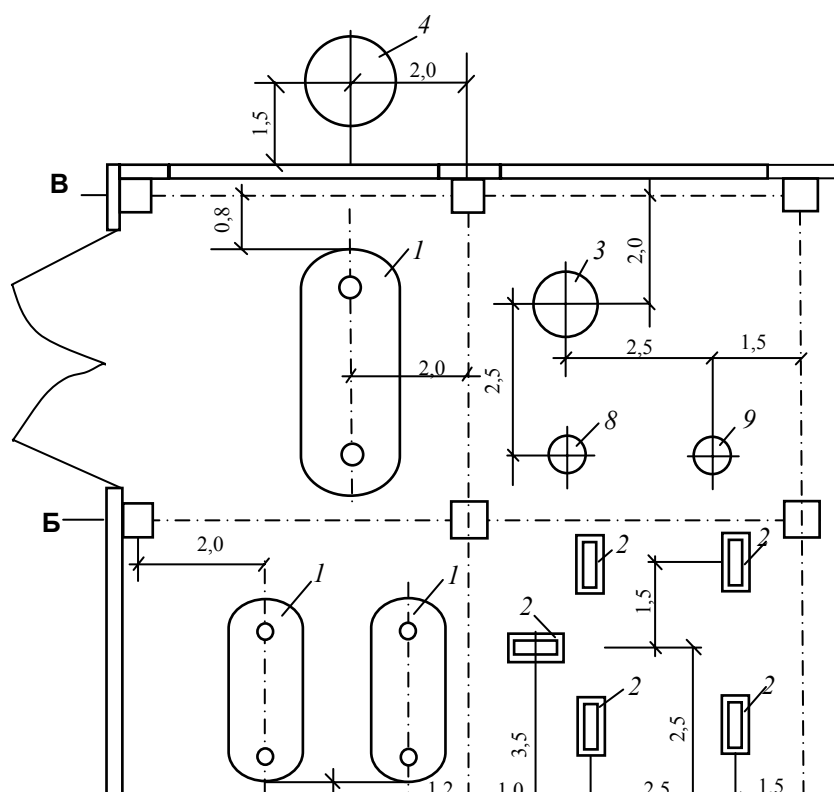


Рис. 32. Модернизация варианта компоновки (разрез Г-Г):

1 – емкость исходной смеси; *2a* – 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

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 строительно-монтажной организацией. После всех согласований приступают к подготовке рабочей документации.

3.2. 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, обеспечивающем по ней производство строительных и монтажных работ. Вся эта документация разрабатывается в соответствии с требованиями государственных стандартов и установленных норм.

Рабочая документация должна включать:

- 1) рабочие чертежи объекта;
- 2) сметы;
- 3) ведомости объемов строительных и монтажных работ;
- 4) ведомости потребности в материалах;
- 5) расчеты показателей изменения сметной стоимости работ и затрат при применении в проектах достижений науки, техники и передового опыта;
- 6) спецификации на оборудование, опросные листы и габаритные чертежи;
- 7) 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 [26] представлены условные обозначения, применяемые при вычерчивании трубопроводных коммуникаций и арматуры (табл. 4).

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.

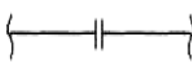

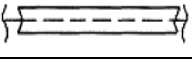
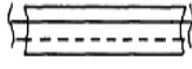
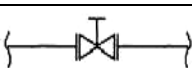
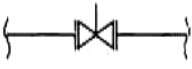
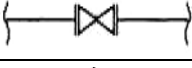

В зависимости от свойств транспортируемых веществ, а также требований предъявляемых к качеству материала труб, и методов сварки, технологические трубопроводы делятся на три категории:

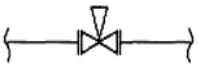
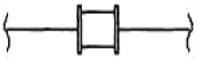
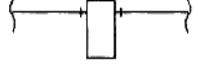
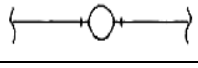

I категория – трубопроводы для огне- и взрывоопасных, агрессивных и токсичных продуктов вне зависимости от величины давления в них и температуры;

II категория – трубопроводы для продуктов, обладающих слабовыраженными коррозионными, огнеопасными и токсичными свойствами, а также трубопроводы для щелочей;

III категория – все остальные трубопроводы.

4. 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 |

| Условное обозначение | Название трубопроводной арматуры |
|--|----------------------------------|
|  | Клапан регулирующий |
|  | Диафрагма расходомера |
|   | Конденсатоотводчики |
|  | Клапан предохранительный |

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 трубы, 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.

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 диаметр трубопровода определяют, задаваясь допустимой скоростью или допустимыми потерями напора:

$$d = \sqrt{\frac{4V_{\text{сек}}}{\pi w}}; \quad d = \sqrt[4]{0,042 \frac{V_{\text{сек}}^2}{h_{\text{доп}}} (1 + \sum \xi)},$$

где V_c – объемный расход жидкости, м³/с; w – средняя скорость жидкости, м/с; d – внутренний диаметр трубопровода, м; $h_{\text{доп}}$ – потери напора; ξ – коэффициент местных сопротивлений.

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 [26].

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 прохода, 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 кгс/см².

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 прорыв 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 быстроедействие, 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 [26].

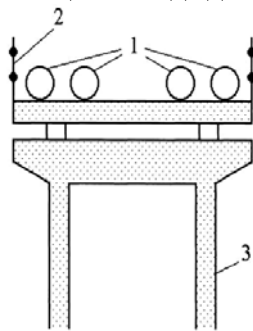


Рис. 34. Межцеховая эстакада:

1 – трубопровод; 2 – ограждение;
3 – железобетонная стойка

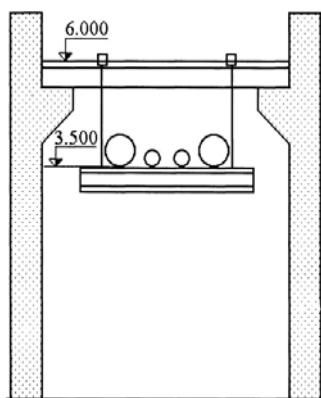


Рис. 35. Внутрицеховая подвесная эстакада

Для прокладки магистральных межцеховых трубопроводов используются эстакады (рис. 34), основными элементами которых являются железобетонные или металлические стойки с настилом и ограждениями для безопасного обслуживания и ремонта трубопроводных схем.

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. 35).

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 от 3 до 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 трех-пяти 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 [26].

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. На рис. 36 представлена схема обвязки такого узла.

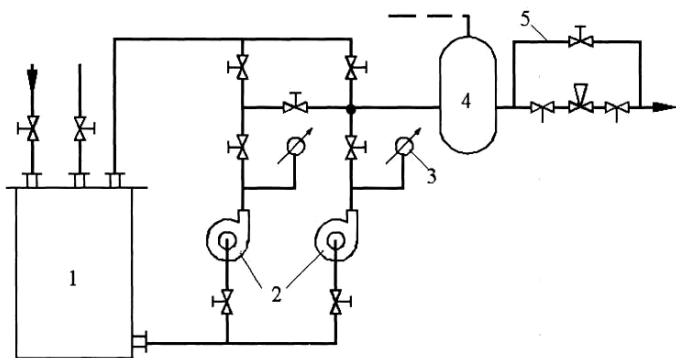


Рис. 36. Схема обвязки узла "насос-емкость":

1 – сборник; 2 – рабочие или резервные насосы; 3 – манометры;
4 – сосуд; 5 – гребенка регулирующая клапана

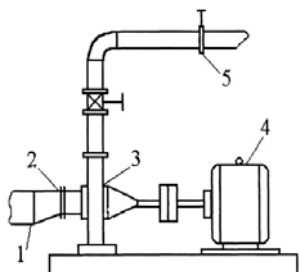


Рис. 37. Схема узла обвязки центробежного насоса:

1 – всасывающий трубопровод;
2 – патрубок; 3 – насос;
4 – электродвигатель; 5 – крепление нагнетательного трубопровода

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 патрубок между ними устанавливается эксцентрично, что предупреждает образование газовых пробок (рис. 37).

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.

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 сжимаемый 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 обратного водоснабжения.

Система смазки компрессора часто имеет несколько схем. Так 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 [26]. 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, располагается 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 сводится к следующему.

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. 38).

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 колоны предусматривают штуцер установки предохранительного клапана.

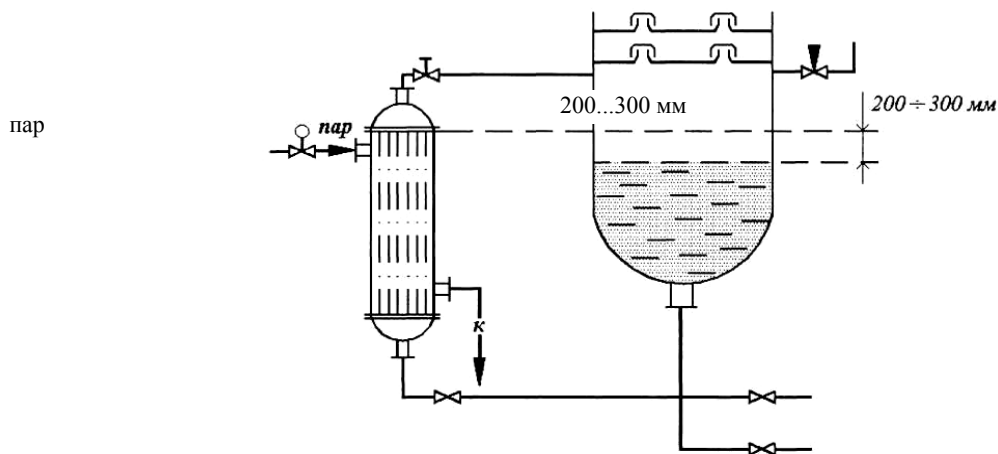


Рис. 38. Схема обвязки куба колонны с выносным кипятильником

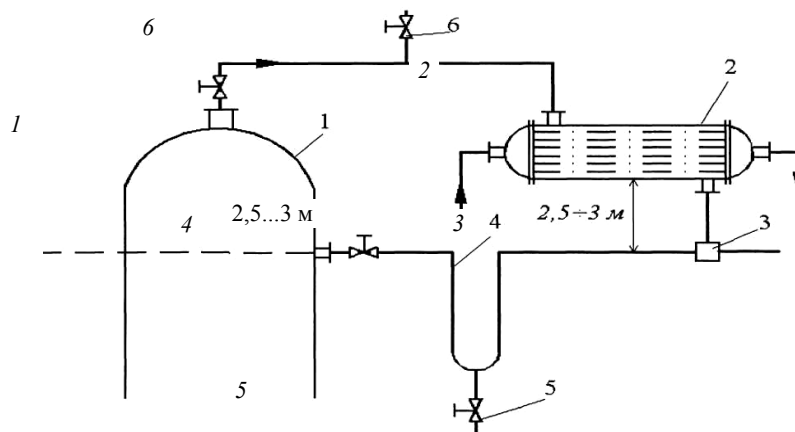


Рис. 39. Схема обвязки дефлегматора:

1 – колонна; 2 – дефлегматор; 3 – разделительный стакан; 4 – гидрозатвор; 5 – спуск; 6 – воздушник

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. 39).

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 опорожнении 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.

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 схем 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.

Иногда не удастся 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. 40.

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.

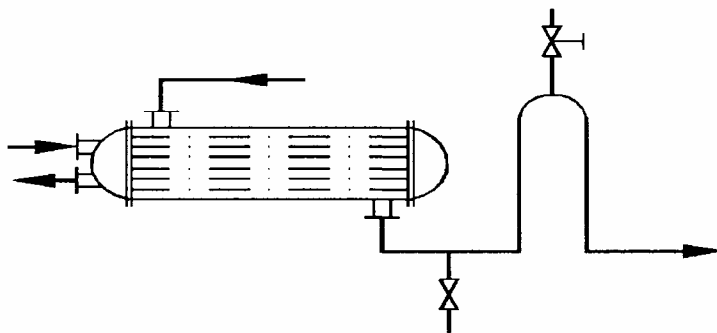


Рис. 40. Схема трубопроводной обвязки теплообменника

Источниками вибраций трубопроводов являются:

- 1) неравномерная подача газа или жидкости с помощью поршневых компрессоров и насосов;
- 2) жидкостные и газовые пробки, возникающие из-за гидравлических мешков, заниженных диаметров трубопроводов;
- 3) неравномерная работа плохо смонтированной мешалки и барботера;
- 4) свободное истечение струи газа из "воздушки" от предохранительного клапана;
- 5) 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 их располагают на нулевой отметке и на автономных фундаментах. При необходимости такое оборудование, как насосы и вентиляторы, может 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 трубо-

провод изогнутых участков П-, Г- и Z-образной формы. При температурных удлинениях конфигурация такого изогнутого участка изменяется. Этот процесс называется самокомпенсацией.

Источниками гидравлических ударов являются:

- 1) гидравлические "мешки" без дренажных устройств;
- 2) разрывы потока жидкости в трубопроводах с заниженным диаметром при неправильном расчете его;
- 3) скопление инертных газов в тупиковых участках и вскипание жидкости в трубопроводе;
- 4) конденсация паров в трубопроводе;
- 5) отсутствие влагоотделителей на всасывающих линиях компрессоров;
- 6) неправильный выбор запорной арматуры для трубопровода (вместо вентиля – 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 трубки 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 опоры трубопроводов располагать согласно расчету. Длина пролета между опорами определяется в зависимости от допустимого напряжения на изгиб:

$$l = \sqrt{\frac{12\sigma_n W}{100 q}},$$

где σ_n – 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.

Следует отметить, что для исключения рутинной работы при подготовке этой документации, как и в течении 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 [26]. Основой для разработки этой схемы 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 автоматики. 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 автоматики, 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.

4. ОСНОВЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Методика проектирования химических производств, 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 проектирования химического производства протекает преимущественно "сверху вниз", т.е. имеет нисходящий характер. При этом по мере "проработки" проекта "сверху вниз" увеличивается подробность описания (детализации) проектируемого объекта. Цель выполняемых на различных этапах проектирования расчетных и экспериментальных исследований – уточнить параметры и характеристики проектируемого производства, принять наиболее рациональные проектно-конструкторские решения. Отсюда следует итерационно-циклический характер процесса проектирования, выражающийся в чередовании процедур синтеза и анализа решений.

Проектно-конструкторские решения принимаются в условиях неопределенности, связанных с неполнотой имеющейся информации на ранних этапах проектирования, с грубым (неточным) описанием (моделированием) отдельных стадий проектируемого производства, использованием упрощенных методик оценки его показателей и т.п. Таким образом, весь ход разработки проекта можно интерпретировать как последовательный процесс снятия неопределенностей.

Разумеется, разработкой проекта необходимо управлять. Целью управления может быть получение оптимального проекта с минимальными затратами ресурсов (времени, средств и т.п.). Управлять можно выбором альтернатив, подлежащих проработке, определением "глубины проработки" выбранной альтернативы, структуры и объема проводимых при этом экспертиз, расчетов и экспериментальных исследований.

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 и математических методов.

Автоматизированное проектирование занимает особое место среди информационных технологий.

Во-первых, автоматизация проектирования – синтетическая дисциплина, ее составными частями являются многие другие современные информационные технологии. Так, техническое обеспечение САПР основано на использовании вычислительных сетей и телекоммуникационных технологий, в САПР используются персональные компьютеры и рабочие станции. Математическое обеспечение САПР отличается богатством и разнообразием используемых методов вычислительной математики, статистики, математического программирования, дискретной математики, искусственного интеллекта. Программные комплексы САПР относятся к числу наиболее сложных современных программных систем, основанных на операционных системах *Unix*, *Windows-95NT*, языках программирования *C*, *C++*, *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 автоматизации проектирования и умение работать со средствами САПР требуется практически любому инженеру-разработчику. Компьютерами насыщены проектные фирмы, кон-

структурские бюро и офисы. Предприятия, ведущие разработки без 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.

4.1. МЕТОДИКА ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Общим для задач принятия оптимальных решений, которые возникают на разных этапах проектирования, 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 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.

Такой подход к принятию оптимальных решений в интегрированных САПР 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 химического производства.

Количественную информацию об эффективности функционирования и о характерных свойствах проектируемого химического производства можно получить методом компьютерного моделирования. Для этого многомерные массивы количественной информации о состоянии производства в различные моменты времени и при различных условиях должны быть сведены к ограниченному числу некоторых *агрегированных* переменных (обобщенных оценок эффективности функционирования и характеристических свойств проектируемого производства). Указанные обобщенные оценки представляют собой числовые функциональные характеристики химического производства.

Критерий эффективности (целевая функция) химического производства – это числовая функциональная характеристика, оценивающая степень приспособления производства к выполнению поставленных перед ним задач. Критерии эффективности широко используют для сравнительной оценки альтернативных вариантов при проектировании химических производств, оптимизации конструктивных и режимных переменных производства, сравнительной оценки алгоритмов управления режимами функционирования производства. В общем случае критерий эффективности химического производства зависит от конструктивных и режимных переменных, структуры производства и управления им, внешних и внутренних случайных или неопределенных факторов (параметров). Введем обозначения: $C(\cdot)$ или $I(\cdot)$ – критерий эффективности проектируемого химического производства; $\omega \in \Omega$ – ассортимент выпускаемой продукции; \mathfrak{R} – структура производства (совокупность технологических стадий и связей между ними); $a \in A$ – тип аппаратного оформления технологических стадий производства; $u \in U$ – вектор режимных (управляющих) переменных функционирования технологических стадий производства; $d \in D$ – вектор конструктивных параметров технологического оборудования производства; $b \in B$ – класс системы автоматического управления (АСУ, 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 производства.

Пусть критерий эффективности $I(\cdot)$ химического производства представляет собой векторную целевую функцию. Введем также множества $F \in E^p$ показателей эффективности функционирования производства и $Q \in E^q$ показателей технологических условий (ограничений), соответствующих технологическому регламенту эксплуатации производства и определяющих наряду с критерием $I(\cdot)$ достижение целей, указанных в техническом задании на проектирование. Будем считать, что на множествах F и Q заданы функциональные зависимости $\alpha: \Omega \rightarrow F$, $\beta: \Omega \rightarrow Q$.

Структурно-параметрическое описание проектируемого химического производства удобно интерпретировать И/ИЛИ графом, в котором множество вершин разбито на два класса (рис. 41): И-вершины (изображенные в виде кругов) и ИЛИ-вершины (изображенные в виде квадратов).

Первый ярус – И-вершины ($\omega, \alpha(\omega), \beta(\omega)$) интерпретируется как исходные данные для проектирования, здесь задаются ассортимент, спецификация качества выпускаемой продукции и требования к проектируемому производству в соответствии с ТЗ.

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 аппаратурного 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.

На рис. 41 изображено структурно-параметрическое описание многоассортиментного химического производства. В зависимости от производимого ассортимента ω оно включает в себя различные совокупности технологий (технологических стадий), характеризуется мно-

жеством режимных (управляющих) переменных U_1, U_2, U_3, \dots и может иметь альтернативные варианты аппаратного оформления технологических стадий a_1, a_2, a_3, \dots , которые фиксируются на уровне параметрического описания множествами D_1, D_2, D_3, \dots , конструктивных параметров. 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 . С использованием графа, оценочных функций $I(\cdot)$ эффективности функционирования проектируемого производства, эвристических и экспертных оценок выбирается наиболее перспективный вариант аппаратного оформления производства и системы управления технологическими процессами.

Помимо структурно-параметрического описания, представляющего собой множества проектных параметров и ограничений, при проектировании химического производства 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 (исходными данными для проектирования).

На рис. 42 представлена структурная схема химического производства. Операторы математических моделей технологических процессов производства и систем управления имеют вид:

$$F : \Omega \times \mathfrak{R} \times A \times B \times D \times S \times \Xi \rightarrow Y \quad \text{или} \quad Y = F(\omega, a, d, u, \xi),$$

$$\psi : B \times Y \times \Xi \rightarrow U \quad \text{или} \quad U = \Psi(b, y, s, \xi).$$

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 проектируемого химического производства.

Решение задачи оптимального проектирования химического производства невозможно простым перебором возможных технологий получения заданных ассортиментов продукции, типов аппаратного оформления технологических процессов, классов и структур систем управления, векторов конструктивных и режимных переменных из-за высокой размерности задачи (см. рис. 41), нелинейности технологических процессов, сложности алгоритмов вычисления компонент векторной целевой функции $I(\cdot)$. Требуется декомпозиция задачи, разработка стратегии применения методов автоматизированного проектирования, поскольку допустимая область проектных параметров $(\Omega \times \mathfrak{R} \times A \times B \times U \times D \times S)$ строится в ходе самого процесса проектирования. Сформулируем в общем виде задачу проектирования химического производства. Требуется определить такие \mathfrak{R}^* , $a^* \in A$, $b^* \in B$, $d^* \in D$, $u^* \in U$, $s^* \in S$, при которых для заданного $\omega \in \Omega$ выполняются соотношения:

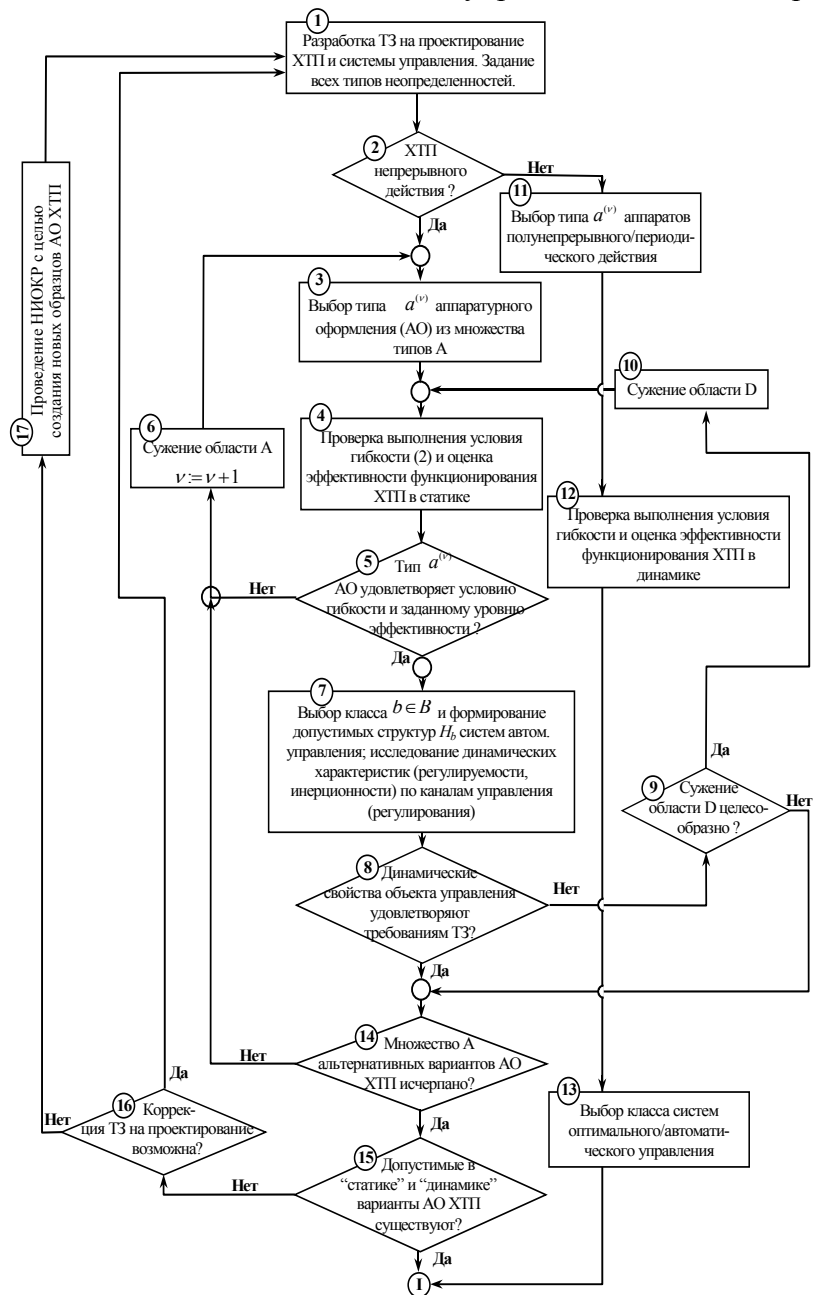
$$M_{\xi} \{ I(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, u^*, s^*, \xi) \} > \alpha(\omega); \quad (4.1)$$

$$\text{Вер}_{\xi} \{ g(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, u^*, s^*, \xi) \leq \beta(\omega) \} \geq \rho_{\text{зад}}, \quad (4.2)$$

где $M_{\xi} \{ \cdot \}$ – математическое ожидание величины $\{ \cdot \}$ на множестве Ξ , $\Xi = \{ \xi \mid \xi_k^{\min} \leq \xi_k \leq \xi_k^{\max}, k = \overline{1, n} \}$;
 $\text{Вер}_{\xi} \{ \cdot \}$ – вероятность выполнения технологических условий (ограничений) $g(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, u^*, s^*, \xi) \leq \beta(\omega)$;
 $\rho_{\text{зад}}$ – значение гарантированной вероятности выполнения технологических условий (ограничений).

Сформулированная задача (4.1), (4.2) заключается в определении такой технологии \mathfrak{R}^* производства, системы машин и аппаратов a^* , технологических трубопроводов и автоматического управления технологическими процессами b^* , u^* , варианта компоновки технологического оборудования производства и т.п., для которых усредненные показатели эффективности производства $M_{\xi} \{ I(\cdot) \}$ для заданного ассортимента ω не хуже заданных $\alpha(\omega)$, а технологические условия (ограничения) $g(\omega, \mathfrak{R}^*, a^*, b^*, d^*, u^*, s^*, \xi) \leq \beta(\omega)$ выпол-

няются с заданной (гарантированной) вероятностью $\rho_{\text{зад}}$. Используя системный подход, нами предложена редукция задачи стохастического программирования (4.1), (4.2) к последовательности итерационно решаемых высокоэффективными традиционными методами детерминированных задач нелинейного программирования и оптимального управления. При этом обеспечивается поэтапное сужение множеств A, D, B, U и S . Блок-схема многоэтапной стратегии интегрированного проектирования химических производств и систем автоматического управления показана на рис. 43.



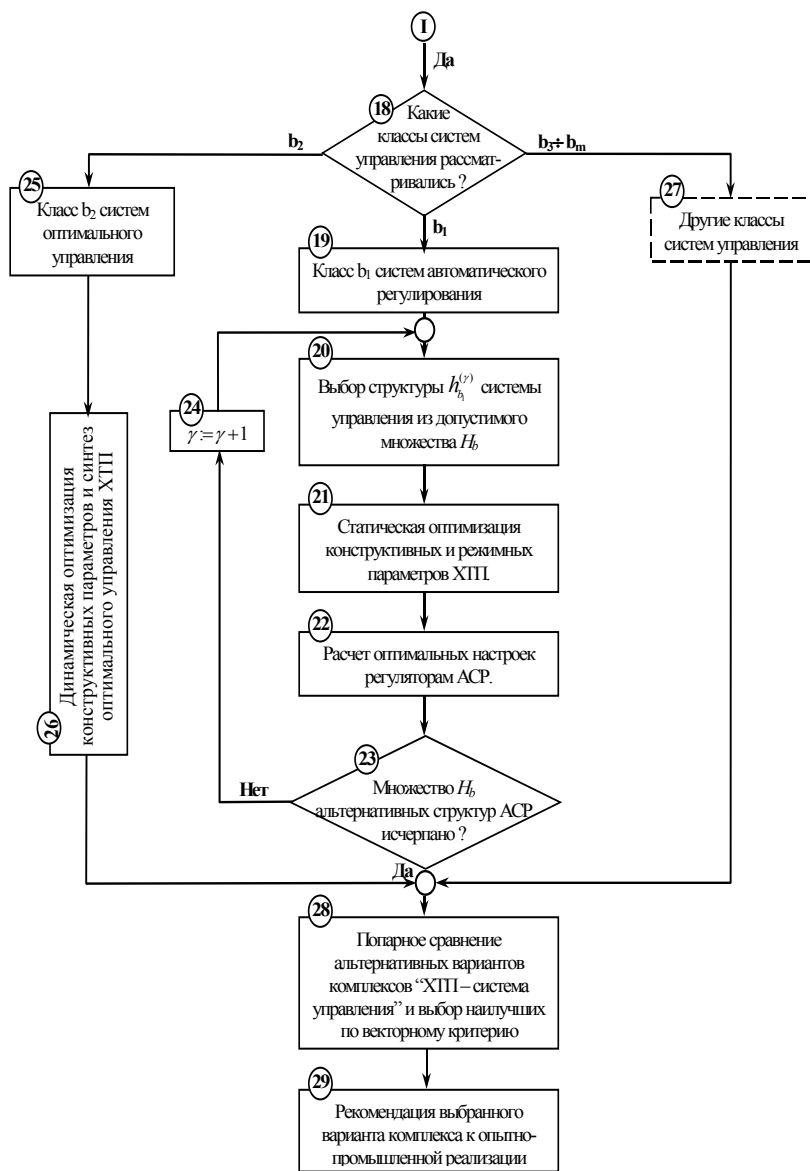


Рис. 43. Стратегия интегрированного проектирования химического производства и системы автоматического управления его режимами

В соответствии с разработанной методологией интегрированного проектирования итерационно решаются три основные задачи: 1) генерирование альтернативных вариантов химического производства, удовлетворяющих условиям гибкости (в жесткой или мягкой форме); 2) выбор альтернативных классов и структур САУ химическим производством, удовлетворяющих условиям структурной наблюдаемости и управляемости производства с заданными динамическими свойствами по каналам управления; 3) решение одно- или двухэтапной задач оптимизации конструктивных и режимных (управляющих) переменных комплекса "производство–система управления" 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 производства (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 химико-технологическими процессами (ХТП) производства. При этом учитываются наблюдаемость выходных переменных ХТП, оценка затрат на разработку необходимых датчиков, приборов, возможность и точность прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемость ХТП 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.) ХТП по каналам управления (регулирования). В том случае, если управляемые в статике ХТП имеют неудовлетворительные динамические характеристики, то производится коррекция конструктивных и режимных параметров ХТП (найденных на первом этапе), либо выбираются новые типы АО ХТП.

Для решения задач синтеза энерго- и ресурсосберегающего управления нелинейными (по фазовым координатам) ХТП в замкнутой САУ нами применяются высокоэффективные методы АКОР по критерию обобщенной работы академика А.А. Красовского.

На завершающем этапе интегрированного проектирования осуществляется решение многокритериальной задачи оптимизации для альтернативных комплексов "Химическое производство – 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 ХТП и осуществимость требований технического задания. В том случае, если эти требования не достижимы, осуществляется переход к новым обликам АО ХТП или выбору новой структуры производства.

При проектировании автоматизированного химического производства решается комплекс сложнейших задач: выбор способа (технологии) и структуры производства, 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. (см. раздела 1 и рис. 43). Проектирование химического производства 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 производства. Результатом проектирования служит полный комплект документации, соединяющий достаточные сведения для воспроизводства (реализации объекта проектирования). Эта документация и есть проект, точнее окончательное описание, проектируемого производства.

В ТЗ на проектирование химического производства указывают следующие сведения:

- 1) назначение производства;
- 2) литературные данные о технологии производства и сведения об аналогичных производствах за рубежом;
- 3) обзор научно-исследовательских работ по отдельным технологическим стадиям производства; описание технологических схем опытных и полупромышленных установок, на которых отработывался технологический процесс;
- 4) основные технико-экономические показатели объекта, в том числе мощность, производительность, производственная программа (план);
- 5) требования к качеству, конкурентной способности и экологическим параметрам продукции;
- 6) требования к технологии;
- 7) технические характеристики исходного сырья, основных продуктов и вспомогательных материалов (включая воду, азот для технических целей, теплоносители и хладагенты); области применения основных продуктов;
- 8) физико-химические свойства исходных, получаемых промежуточных и конечных продуктов;
- 9) химизм процесса по стадиям; физико-химические основы процесса, предварительная (эскизная) технологическая схема производства;

- 10) рабочие (номинальные) технологические параметры (режимы) производства;
- 11) материальный баланс производства по стадиям процесса;
- 12) характеристики побочных продуктов и отходов; рекомендации по их утилизации;
- 13) математическое описание технологических стадий;
- 14) рекомендации по автоматизации производства;
- 15) методы очистки сточных вод и обезвреживания газовых выбросов;
- 16) 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 (технологических процессов и аппаратов), интересующим потребителя. Наряду с качественными характеристиками (представленными в вербальной форме) можно выделить числовые параметры, для которых указаны области допустимых значений.

Требования к выходным переменным y выражаются, как правило, в виде условий работоспособности производства:

$$y_i R y_i^H, \quad (4.3)$$

где y_i – i -я выходная переменная производства; R – вид отношения ($=, <, >, \leq, \geq$); y_i^H – норма i -й выходной переменной.

Фактически условия работоспособности производства (4.3) представляют собой ограничения по спецификации качества производимого продукта, производительности, экологической безопасности производства и др. Проблема выполнения условий работоспособности (4.3) сильно осложняется наличием неопределенности в физической, химической и экономической информации, используемой при проектировании процесса.

В связи с этим принципиально важно рассматривать на стадии проектирования влияние неопределенных параметров на работоспособность и оптимальность функционирования производства.

4.2. ГИБКОСТЬ (РАБОТОСПОСОБНОСТЬ) ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Традиционно при проектировании решается более простая, в отличие от (4.1), (4.2), задача оптимизации

$$\min_{d,u} \bar{I}(d, y, u, \xi^N) \quad (4.4)$$

при связях и ограничениях:

$$\begin{aligned} h(d, y, u, \xi^N) &= 0; \\ \bar{g}_j(d, y, u, \xi^N) &\leq 0, \quad j \in J, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где J – множество индексов ограничений работоспособности ($1, 2, \dots, m$); d – вектор проектных (конструктивных) переменных; u – вектор управляющих переменных; y – вектор выходных переменных (или переменных состояния); ξ^N – номинальное значение вектора неопределенных параметров.

Если вектор выходных переменных (или переменных состояния) y выразить (может быть неявно) как функцию d, u, ξ^N из уравнений материального и теплового балансов $h(d, y, u, \xi^N) = 0$ и подставить в зависимости $\bar{I}(d, y, u, \xi^N)$ и $\bar{g}_j(d, y, u, \xi^N)$, то получим известную "приведенную" постановку задачи оптимизации конструктивных и режимных переменных

$$\min_{d,u} I(d, u, \xi^N) \quad (4.6)$$

при ограничениях

$$g_j(d, u, \xi^N) \leq 0, \quad j \in J.$$

Учет неопределенности вектора ξ при традиционном проектировании осуществляется введением эмпирического коэффициента запаса $\gamma_{\text{зап}}$ (обычно принимают $\gamma_{\text{зап}} = 1,25$) к размерам оборудования, полученным в результате решения задачи нелинейного программирования (4.6). Понятно, что традиционная процедура не имеет рациональной основы для выбора коэффициента запаса $\gamma_{\text{зап}}$, что зачастую приводит к неработоспособности спроектированного химического производства и необходимости его перепроектирования, а это сопряжено с дополнительными затратами.

Таким образом, задача оптимального проектирования химического производства должна ставиться с учетом наличия неопределенности в исходной информации и математической модели производства.

Все переменные в задаче оптимального проектирования химического производства в условиях неопределенности параметров могут быть разделены на следующие категории. Вектор d проектных параметров ассоциируется со структурой производства и размерами оборудования. Эти переменные, как правило, считаются неизменными, когда проект реализован, и не меняются в процессе функционирования производства.

Вектор u ассоциируется с классом и структурой системы автоматического управления и обозначает управляющие переменные, которыми можно манипулировать в процессе функционирования производства таким образом, чтобы, во-первых, выполнялись требования ТЗ и обеспечивалась работоспособность производства, и во вторых, минимизировались эксплуатационные затраты.

Вектор ξ задает неопределенные параметры. Предположим, что нам задано номинальное значение вектора неопределенных параметров ξ^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 Ξ , содержащую все возможные значения неопределенных параметров, можно представить в виде

$$\Xi = \{ \xi \mid \xi^L \leq \xi \leq \xi^U \}. \quad (4.7)$$

Важнейшим компонентом работоспособности проектируемого производства является "гибкость" – способность производства иметь допустимую рабочую точку (режим) функционирования для всего диапазона Ξ неопределенных условий, которые могут возникать в процессе эксплуатации этого производства. Понятно, что и другие компоненты работоспособности производства, такие как управляемость, надежность, безопасность и др. в равной степени важны. Тем не менее, исследование гибкости проектируемого производства – это первый шаг, который должен быть сделан для оценки работоспособности проекта.

Можно сформулировать две задачи, связанные с анализом гибкости проектируемого производства: А – проверка работоспособности производства для априори заданного интервала неопределенности; Б – количественная оценка индекса гибкости проекта и определение максимально достижимого уровня индекса гибкости проекта.

Задача анализа работоспособности проектируемого производства, определяемого вектором проектных параметров d , будет заключаться в определении управляющих переменных u таких, чтобы выполнить ограничения (требования по спецификации качества выпускаемой продукции, производительности, надежности технологического оборудования, безопасности производства и др.)

$$g_j(d, u, \xi) \leq 0, \quad j \in J \quad (4.8)$$

для фиксированного значения $\xi \in \Xi$. Математически эта задача может быть сформулирована следующим образом:

$$\Psi(d, \xi) = \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi), \quad (4.9)$$

где $\Psi(d, \xi)$ – функция выполнимости ограничений (4.8). Если $\Psi(d, \xi) \leq 0$, то проектируемое производство, описываемое вектором d , работоспособно; в противном случае, при $\Psi(d, \xi) > 0$ – неработоспособно. При $\Psi(d, \xi) = 0$ проектируемое производство с вектором d находится на границе допустимой области функционирования, поскольку в этом случае $g_j(d, u, \xi) = 0$ хотя бы для одного номера $j \in J$.

Задачу (4.9) можно переформулировать в форме стандартной задачи математического программирования, определяя скалярную величину α такую, что

$$\Psi(d, \xi) = \min_{u, \alpha} \alpha \quad (4.10)$$

при ограничениях

$$g_j(d, u, \xi) \leq \alpha, \quad j \in J.$$

Если $g_j(\bullet)$ – нелинейные функции по u , то задача (4.10) представляет собой задачу нелинейного программирования.

Для установления работоспособности проектируемого производства необходимо убедиться в том, что $\Psi(d, \xi) \leq 0$ для всех $\xi \in \Xi$. В этом случае задача анализа гибкости проектируемого производства, описываемого вектором проектных параметров d , может быть сформулирована в виде

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \Psi(d, \xi), \quad (4.11)$$

где $\chi(d)$ – соответствует функции гибкости проекта производства с вектором d .

При $\chi(d) \leq 0$ допустимое функционирование (работоспособность) производства может быть достигнуто для всей области Ξ возможных изменений вектора неопределенных параметров ξ .

При $\chi(d) > 0$ допустимое функционирование производства невозможно для некоторой подобласти Ξ .

Математическая постановка задачи (А) анализа гибкости проектируемого производства может быть сформулирована в виде

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi). \quad (A)$$

Введем количественную оценку гибкости проекта, определяемого вектором конструктивных параметров d . Для этого запишем область изменения неопределенных параметров в виде

$$\Xi(\delta) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \Delta \xi^+ \right\},$$

где δ – 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 δ , для которого выполняются ограничения (4.8) для всей области $\Xi(F)$.

Сформулируем математическую постановку задачи (Б) определения индекса гибкости F проектируемого производства, описываемого вектором проектных параметров d :

$$F = \max \delta$$

при ограничениях

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0$$

$$\Xi(\delta) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta \cdot \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \cdot \Delta \xi^+ \right\}; \quad (B)$$

$$\Xi(F) = \{ \xi \mid \xi^N - F \cdot \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + F \cdot \Delta \xi^+ \}.$$

Значения неопределенных параметров $\xi^c \in \Xi(F)$, соответствующие решению задачи (Б), называются критическими точками.

Если удастся установить, что критические точки соответствуют вершинам многогранника $\Xi(F)$, то решение задач (А) и (Б) может быть значительно упрощено.

Рассмотрим задачу анализа гибкости проекта в предположении, что $\xi^k, k \in K$ представляют вершины многогранника Ξ . В этом случае можно записать, что

$$\chi(d) = \max_{k \in K} \Psi(d, \xi^k), \quad (A')$$

где $\Psi(d, \xi^k)$ находится из решения задачи оптимизации (4.10).

Следует заметить, что в задаче (Б) величина $\chi(d)$ достигает нулевого значения, $\chi(d) = 0$, в точке оптимального решения, поскольку критическая точка всегда будет находиться на границе допустимой области функционирования производства. Пусть $\Delta \xi^k, k \in K$ обозначает направление от номинальной точки ξ^N до k -й вершины многогранника Ξ . Тогда максимальное отклонение δ^k от границы вдоль $\Delta \xi^k$ мы получим из решения экстремальной задачи

$$\delta^k = \max_{u, \delta} \delta, \quad k \in K \quad (B')$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} g_j(d, u, \xi^k) &\leq 0, \quad j \in J, \\ \xi^k &= \xi^N + \delta \Delta \xi^k. \end{aligned}$$

Анализ полученных прямоугольных областей изменения ξ показывает, что только наименьший прямоугольник может быть вписан в допустимую область, который определяет индекс гибкости

$$F = \min_{k \in K} \{ \delta^k \}.$$

На рис. 44 изображен диапазон изменения вектора неопределенных параметров ξ , который ассоциируется с индексом гибкости для данного проекта.

Следует заметить, что только при условии выпуклости функций $g_j(\bullet)$ по переменным u и ξ критические точки ξ^c будут соответствовать вершинам многогранника Ξ . Это условие существенно ограничивает применение рассмотренных выше постановок задач анализа гибкости (А) и определение индекса гибкости (Б) при проектировании химических производств, поскольку возникают определенные трудности в проверке условий выпуклости функций ограничений $g_j(\bullet)$.

Вторая проблема, возникающая при решении сформулированных выше задач (А) и (Б) методом анализа вершин многогранника Ξ , – проблема размерности решаемой задачи. Так при $n_p = 10$ требуется решение экстремальных задач типа (4.10) 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 оптимального проектирования химического производства проектные переменные d должны быть выбраны таким образом, чтобы минимизировать математическое ожидание стоимости $C(d, u, \xi)$ проекта химического производства, используя двухэтапную постановку (стратегию)

$$\min_d M_\xi \left[\min_u C(d, u, \xi) \mid g(d, u, \xi) \leq 0 \right], \quad (4.12)$$

где $M_\xi \{\bullet\}$ – символ математического ожидания случайной величины ξ . Причина, по которой задача (4.12) названа двухэтапной, заключается в том, что ее решение состоит из двух этапов.

1. Внутренняя задача

$$\min_u C(d, u, \xi)$$

при ограничениях

$$g(d, u, \xi) \leq 0.$$

Ее решение осуществляется как бы на стадии функционирования производства при фиксированных значениях d (проект реализован и функционирует) и ξ (предполагается, что вектор ξ может быть идентифицирован при эксплуатации производства). Будем обозначать решение внутренней задачи через $\hat{C}(d, \hat{u}_{d,\xi}, \xi)$.

2. Внешняя задача

$$\min_d M_\xi \left\{ \hat{C} \left(d, \hat{u}_{d,\xi}, \xi \right) \right\}$$

решается на стадии проектирования и поскольку нам неизвестен вектор ξ , то решение внутренней задачи и вычисление $\hat{C}(d, \hat{u}_{d,\xi}, \xi)$ осуществляется многократно (в данном случае бесконечное число раз), чтобы вычислить математическое ожидание $M_\xi \left\{ \hat{C} \left(d, \hat{u}_{d,\xi}, \xi \right) \right\}$.

В вышеописанной двухэтапной стратегии неявно принимается допущение о том, что управление u может быть немедленно установлено в зависимости от изменения ξ . При этом не учитываются задержки в измерениях переменных состояния производства, вычислениях и реализации управляющих переменных $u_{d,\xi}$. Кроме того, при реализации этой стратегии может возникнуть ситуация, когда для некоторых значений $\tilde{d}, \tilde{\xi}$ не удастся подобрать управляющие переменные u , при которых выполняются ограничения $g(d, u, \xi) \leq 0$. Это означает, что область изменения неопределенных параметров $\Xi(\delta)$ необходимо уменьшать за счет изменения величины δ :

$$\Xi(\delta) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \Delta \xi^+ \right\}.$$

В этом случае задачу (4.12) можно переформулировать как

$$\min_d M_{\xi \in \Xi(F)} \left[\min_u C(d, u, \xi) \mid g(d, u, \xi) \leq 0 \right],$$

при ограничениях

$$\max_{\xi \in \Xi(F)} \Psi(d, \xi) \leq 0,$$

где F – индекс гибкости производства.

Бесконечное число точек $\Xi(F)$ может быть аппроксимировано дискретным множеством точек ξ^k , $k=1, 2, \dots, K$, которое выбирается из условия наилучшего покрытия множества $\Xi(F)$ сеткой. В результате можно получить конечномерную по ξ задачу оптимального проектирования:

$$\min_{d, u^1, u^2, \dots, u^k} \sum_{k=1}^K w_k C(d, u^k, \xi^k) \quad (4.13)$$

при ограничениях

$$g(d, u^k, \xi^k) \leq 0, \quad k = \overline{1, K},$$

где w^k – веса, которые присвоены каждой точке ξ^k ; $\sum_{k=1}^K w_k = 1$. Весовые коэффициенты могут быть выбраны (интерпретированы) как вероятности того, что вектор неопределенных параметров ξ примет значение ξ^k .

Алгоритм аппроксимации задачи (4.12) с помощью задачи (4.13) включает следующие шаги.

Шаг 1. Выбирается априори начальное множество точек ξ^k , $k = \overline{1, k}$.

Шаг 2. Решается многомерная задача оптимизации (4.10) с целью определения вектора проектных переменных параметров d .

Шаг 3. Проверяется работоспособность проекта химического производства в области $\Xi(F)$, определяемого вектором d , через решение задачи

$$F = \max \delta$$

при ограничении

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi).$$

Если проект химического производства осуществим, то процедура прерывается, иначе находится критическая точка ξ^c из оценки гибкости, которая добавляется в дискретный ряд ξ^k – точек и осуществляется переход к шагу 2.

Заметим, что при решении практических задач проектирования требуется максимум одна – две итерации для нахождения работоспособного проекта производства этим методом и определения области $\Xi(F)$.

4.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

При проектировании технологических объектов (систем) всегда следует учитывать ограничения по качеству, производительности аппаратов, безопасности производства, экологической безопасности и др. Проблема выполнения ограничений сильно осложняется наличием неопределенности физической, химической, технологической и экономической информации, используемой при проектировании процесса.

Как и ранее, здесь будем использовать следующие обозначения: $\xi \in \Xi$, $\Xi = \{\xi \mid \xi^L \leq \xi \leq \xi^U\}$, ξ – вектор неопределенных параметров, принадлежащих области Ξ ; причем $\xi = \{\xi^1, \xi^2\}$, где $\xi^1 \in \Xi_1$ – подвектор компонентов ξ , которые могут быть с достаточной точностью определены (измерены или идентифицированы) на стадии эксплуатации производства; $\xi^2 \in \Xi_2$ – подвектор компонентов ξ , которые не удастся идентифицировать даже на стадии эксплуатации производства; $\Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, \rho}\}$ – множество производимых продуктов (ассортимент); $d \in D$ – вектор проектных (конструктивных) параметров (множество D определяется типом аппаратного оформления производства); $C(\cdot)$ – критерий оптимального проектирования производства.

Математическая постановка задачи анализа гибкости проектируемого производства при заданных вариантах структуры \mathfrak{A} производства, ассортименте Ω выпускаемых продуктов, типов a аппаратного оформления технологического объекта может быть сформулирована следующим образом: для фиксированного значения $d \in D$ требуется подобрать вектор управляющих переменных u в статике, при которых выполняется условие гибкости

$$\forall \omega_i \in \Omega \quad \chi(d) = \text{Вер}_\xi \left\{ \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0 \right\}, \quad (4.14)$$

где $\chi(d)$ – соответствует функции гибкости проекта производства с вектором d .

Заметим, что условие гибкости (4.14) записывается в более "мягкой" форме в отличие от (А).

При $\chi(d) \geq \rho_{\text{зад}}$ получаем работоспособный проект производства для заданного ассортимента выпускаемой продукции и всей области Ξ возможных изменений вектора неопределенных параметров ξ . При $\chi(d) < \rho_{\text{зад}}$ проект неработоспособен для некоторой области Ξ и при выпуске определенных продуктов ω_i из заданного ассортимента Ω .

По аналогии с задачей (Б) сформулируем математическую постановку задачи определения индекса гибкости F проектируемого производства, описываемого вектором проектных параметров d :

$$F = \max \delta \quad (4.15)$$

при ограничениях

$$\chi(d) = \text{Вер}_\xi \left\{ \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0 \right\} \geq \rho_{\text{зад}}, \quad (4.16)$$

$$\Xi(\delta) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta \cdot \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \cdot \Delta \xi^+ \right\};$$

$$\Xi(F) = \left\{ \xi \mid \xi^N - F \cdot \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + F \cdot \Delta \xi^+ \right\},$$

где δ – неотрицательная скалярная переменная; ξ^N – номинальное (например, среднее) значение вектора неопределенных параметров; $\Delta \xi^+$, $\Delta \xi^-$ – ожидаемые отклонения от номинального значения.

Решение задачи (4.14) анализа гибкости проекта приобретает важное значение на ранних стадиях проектирования), когда формируется множество альтернативных вариантов осуществления химического производства. Вычисление индекса гибкости F становится необходимым для определения возможного расширения ассортимента выпускаемой продукции без реконструкции производства и необходимости увеличения показателей регулируемости объекта по основным каналам управления. Улучшение динамических свойств объекта возможно за счет уменьшения размеров технологического оборудования и снижения времени транспортного запаздывания в объекте. Чем меньше индекс гибкости проекта, тем точнее должна быть задана исходная информация, и это приводит к наименьшим капитальным затратам при оптимальном проектировании технологических объектов (систем).

Для решения задач анализа гибкости проекта в постановке (4.14) и вычисления индекса гибкости в постановке (4.15), (4.16) будем использовать теорию А-задач стохастического программирования, разработанную В.И. Бодровым [41]. В соответствии с положениями этой теории функцию, записанную в фигурных скобках выражения (4.14),

$$\psi(d, \xi) = \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi),$$

можно представить в форме стандартной задачи математического программирования

$$\psi(d, \xi) = \min_{u, \alpha} \alpha \quad (4.17)$$

при ограничениях

$$g_j(d, u, \xi) \leq \alpha, \quad j \in J, \quad (4.18)$$

где α – скалярная переменная.

Если функции $g_j(d, u, \xi)$ – нелинейные по u , то задача (4.17), (4.18) представляет собой задачу нелинейного программирования.

С учетом преобразования (4.17), (4.18) задачу анализа гибкости проекта (4.14) можно записать в виде

$$\psi(d, \xi) = \min_{u, \alpha} \alpha \quad (4.19)$$

при ограничениях

$$\left. \begin{aligned} g_j(d, u, \xi) \leq \alpha, \quad j \in J; \\ \text{Вер}_\xi \{ g_j(d, u, \xi) \leq 0 \} \geq \rho_{\text{зад}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

В соответствии с методологией решения А-задач стохастического программирования нами предлагается следующий алгоритм решения задачи (4.19), (4.20).

Алгоритм 1

Шаг 1. Положим $v = 0$ и зададим начальные значения величин $\alpha^{(v)}, u^{(v)}$ и ξ^N .

Шаг 2. Методом нелинейного программирования решаем задачу

$$\psi(d, \xi^N) = \min_{u, \alpha} \alpha$$

при ограничениях

$$g_j(d, u, \xi^N) \leq \alpha, \quad j \in J$$

и определяем $u_{\alpha}^{\wedge}, \hat{\alpha}$ – решение задачи НЛП.

Шаг 3. При фиксированном значении $u = u_{\alpha}^{\wedge}$ проверяем выполнение условий

$$\text{Вер}_{\xi} \left\{ g_j \left(d, u_{\alpha}^{\wedge}, \xi \right) \leq 0 \right\} \geq p_{\text{зад}}. \quad (4.21)$$

Шаг 4. Если для представительной выборки значений ξ из области Ξ вероятностные ограничения выполняются, то проект, определяемый вектором d , является гибким и его можно рекомендовать для дальнейшей проработки. В противном случае условие гибкости для проекта с вектором d не выполняется и он отвергается.

Подобная процедура может быть применена и для расчета индекса гибкости проекта при решении задачи (4.15), (4.16).

Перейдем к рассмотрению задачи оптимального проектирования, в которой конструктивные переменные d и режимные (управляющие) переменные должны быть выбраны таким образом, чтобы минимизировать приведенные затраты, включающие стоимость реализуемого проекта (капитальные затраты) и эксплуатационные затраты.

Эксплуатационные затраты включают в себя следующие виды затрат на:

- 1) сырье и материалы;
- 2) потребляемую оборудованием электро- и тепловую энергию;
- 3) заработную плату обслуживающего персонала;
- 4) социальные нужды;
- 5) содержание и эксплуатацию технологического оборудования.

Отметим, что основной составляющих эксплуатационных затрат являются затраты на сырье и энергию. Поэтому при минимизации этой составляющей затрат при проектировании технологических процессов, аппаратов и системы управления фактически добиваются энерго- и ресурсосбережения при создании нового химического производства. Особенно это важно при проектировании многопродуктовых химических производств.

При проектировании химических производств необходимо учитывать гибкость (работоспособность) проекта. При этом у нас есть два выбора:

1) убедиться в гибкости проекта при найденном векторе d^* в задаче оптимального проектирования, т.е. показать, что $\chi(d^*) \leq 0$;

2) максимизировать меру гибкости и в то же время минимизировать стоимость проекта.

Для сформулированной задачи оптимизации при наличии неопределенности исходной информации необходимо определить форму целевой функции и ограничений. В основе этого лежит концепция двух этапов "жизни" химического производства: проектирования и эксплуатации.

Формулировку условия гибкости (задающего ограничения задачи) определяют следующие факторы.

1. Характер информации, содержащей неопределенность. Неопределенность может быть параметрической или модельной. В первом случае известна форма математической модели, но неизвестны точные значения некоторых ее параметров. Во втором случае предполагают, что нет точного знания о модели технологического объекта. Имеется ряд альтернативных моделей, одна из которых соответствует действительности.

2. Существование и величина неопределенности информации на втором этапе (на первом этапе неопределенность присутствует практически всегда). Возможны следующие случаи:

а) на этапе эксплуатации все параметры могут быть определены точно в каждый момент времени (либо прямым измерением, либо в результате решения обратной задачи на основе информации, полученной в результате измерений);

б) на этапе эксплуатации область неопределенных параметров та же, что и на этапе проектирования;

в) на этапе эксплуатации некоторые из параметров ξ_i могут быть определены точно, другие имеют такой же интервал, что и на этапе проектирования;

г) на этапе эксплуатации все параметры ξ_i содержат неопределенность, но их интервалы неопределенности меньше, чем соответствующие интервалы на этапе проектирования.

3. Способ обеспечения гибкости технологического объекта:

а) имеются конструктивные и управляющие переменные;

б) имеются только конструктивные переменные;

в) имеются только управляющие переменные.

4. Тип ограничений: ограничения могут быть "жесткими" и "мягкими" (вероятностными). Жесткие ограничения не должны нарушаться ни при каких условиях. Мягкие ограничения должны выполняться с заданной вероятностью. В нашей работе мы будем рассматривать следующие случаи:

а) все ограничения являются "жесткими";

б) все ограничения являются "мягкими";

в) часть ограничений является – "жесткими", другая часть – "мягкими".

Большинство реальных задач относится к третьему случаю. Например, ограничения по безопасности производства относятся к разделу "жестких", а ограничения на производительность и селективность часто могут быть отнесены к разделу "мягких".

Отметим, что при формулировании задачи оптимального проектирования важным является требование согласованности d и u в критериях для двух этапов (требование реализуемости режимов).

Сформулируем ряд задач интегрированного проектирования химического производства при наличии неопределенности исходной информации.

Задача 1. Имеются конструктивные и управляющие переменные. На этапе эксплуатации процесса область неопределенных параметров та же, что и на этапе проектирования. В этом случае задача оптимального проектирования формулируется следующим образом: для заданного ассортимента Ω выпускаемой продукции требуется определить векторы конструктивных параметров d^* технологического оборудования и режимных (управляющих) переменных u^* такие, что

$$C(d^*, u^*) = \min_{d, u} M_{\xi} \{ C(d, u, y(d, u, \xi), \xi) \} \quad (4.22)$$

при связях в форме уравнений математической модели ХТП

$$y = F(d, u, \xi) \quad (4.23)$$

и ограничениях

$$\text{Вер}_{\xi} \{ g_j(d, u, y(d, u, \xi)) \leq 0 \} \geq \rho, \quad j \in J. \quad (4.24)$$

Сформулированная задача (4.22) – (4.24) носит название одноэтапной задачи оптимизации.

Перепишем задачу (4.22) – (4.24) в терминах А-задач стохастического программирования: требуется найти m -мерный вектор постоянных величин $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_m^*)$, векторы конструктивных d_{α^*} и управляющих u_{α^*} переменных такие, что

$$C(d_{\alpha^*}, u_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in A} \left\{ \min_{d, u} \sum_{k=1}^K \gamma_k C(d, u, \xi^k) \mid g_j(d, u, \xi) \leq \alpha_j, \quad j \in J \right\}; \quad (4.25)$$

$$A = \left\{ \alpha \mid \forall_j, \text{Вер}_{\xi} [g_j(d_{\alpha}, u_{\alpha}, \xi) \leq 0] \geq \rho \right\}, \quad (4.26)$$

где γ_k – веса, которые присвоены каждой точке ξ^k , $\sum_{k=1}^K \gamma_k = 1$. Весовые коэффициенты могут быть интерпретированы как вероятности того, что вектор неопределенных параметров ξ принимает значения ξ^k , $\bar{\xi} = \int_{\Xi} \xi P(\xi) |_{d,u} d\xi$; $P(\xi)$ – плотность распределения случайной величины ξ .

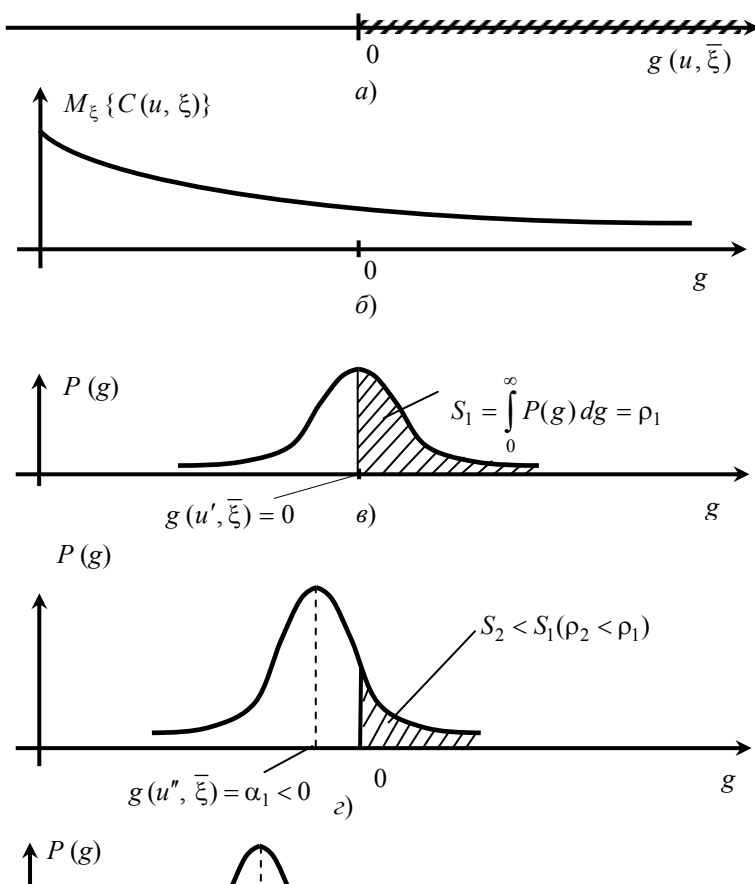
Идея такого подхода, в сущности, очень проста. Поясним ее на примере одномерной задачи стохастического программирования с одним ограничением $g(u, \xi) \leq 0$. На рис. 45, а заштрихована недопустимая область ограничения. Пусть соотношение между целевой функцией $M_{\xi} \{C(u, \xi)\}$ и $g(u, \xi)$ такое, как показано на рис. 45, б. Следует заметить, что такое соотношение (кроме, конечно, экзотических случаев) в оптимизационных задачах химической технологии бывает всегда, т.е. наиболее предпочтительные значения целевой функции лежат в недопустимой области (см. рис. 45), поскольку в противном случае ограничение было бы неактивным и его не следовало бы учитывать. В этом случае решение u' традиционной задачи оптимизации достигается при $g(u', \bar{\xi}) = 0$. Очевидно, при реализации этого решения u' значения $g(u', \xi)$ будут иметь случайный разброс вследствие наличия случайной величины ξ . На рис. 45, в показан этот разброс, который может имитироваться на вероятностной модели $F(u', \xi)$.

В зависимости от вхождения случайной величины в функцию $g(u', \xi)$ закон распределения этой функции может изменяться. Следовательно, эта вероятность может быть как меньше, так и больше 0,5. Таким образом, при решении традиционной задачи при $\xi = \bar{\xi}$ мы даже не знаем, какова вероятность нарушения технологических ограничений.

В сформулированной выше задаче стохастической оптимизации мы требуем, чтобы эта вероятность была меньше, чем некоторая заданная величина $1 - \rho_{\text{зад}}$, где $\rho_{\text{зад}}$ – заданное значение вероятности выполнения ограничений.

Идея А-задач стохастического программирования заключается в следующем: исходное ограничение задачи заменяется на ограничение вида $g(u, \alpha) \leq \alpha$, где $\alpha < 0$, т.е. исходное ограничение как бы ужесточается (см. рис. 45, з). После этого решается детерминированная задача оптимизации с новыми ограничениями

$$\min_u \{ C(u, \bar{\xi}) \mid g(u, \xi) \leq \alpha_1 \}.$$



**Рис. 45. Геометрическая иллюстрация идеи решения А-задачи
стохастической оптимизации**

При этом решение задачи u'' будет соответствовать тому, что технологические ограничения $g(u'', \bar{\xi})$ будет равным α_1 (см. рис. 45, з). Соответственно, вероятность нарушения ограничения уменьшается по сравнению с ρ_1 , т.е. $\rho_2 < \rho_1$, а значение целевой функции возрастает (рис. 4.5, б). Таким образом, мы приблизились к оптимальному решению задачи, которое изображено на рис. 45, д. Отметим, что при выполнении этой процедуры мы не вычисляли вероятность выполнения (нарушения) ограничения на каждом шаге поиска u^* . Вычисление $\text{Вер}_{\xi} [g(u, \xi) \leq 0]$ производится в оптимальной точке u^* для того, чтобы проверить выполнение условия $\text{Вер}_{\xi} [g(u, \xi) \leq 0] \geq \rho_{\text{зад}}$. В том случае, если эти условия не выполняются, выбирается новое число $\alpha_2 < \alpha_1 < 0$ и вновь решается детерминированная задача оптимизации с ограничением $g(u, \bar{\xi}) \leq \alpha_2$. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет найдено такое α^* , при котором технологическое ограничение $g(u, \xi) \leq 0$ выполняется с заданной вероятностью т.е. $\text{Вер}_{\xi} [g(u^*, \xi) \leq 0] \geq \rho_{\text{зад}}$ или $\rho_3 \leq 1 - \rho_{\text{зад}}$.

Следует заметить, что 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 (4.25), (4.26).

Алгоритм 2

Шаг 1. Задается начальное значение $v = 0$ и вектора $\alpha^{(v)} = (\alpha_1^{(v)}, \alpha_2^{(v)}, \dots, \alpha_m^{(v)})$.

Шаг 2. Методом последовательного квадратичного программирования решается задача НЛП

$$C(d_{\alpha}, u_{\alpha}) = \min_{d, u} \sum_{k=1}^K \gamma_k C(d, u, y(d, u, \xi^k)) \quad (4.27)$$

при связях

$$y = F(d, u, \xi^k) \quad (4.28)$$

и ограничениях

$$g_j(d, u, y(d, u, \xi^k)) \leq \alpha_j^{(v)}, \quad \alpha_j^{(v)} < 0, \quad j \in J, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.29)$$

Шаг 3. В точке $(d_{\alpha^{(v)}}, u_{\alpha^{(v)}})$, которая является решением задачи (4.27)-(4.29), вычисляются вероятности выполнения ограничений с использованием имитационной модели

$$y = F(d, u, \xi)$$

и проверяется выполнение условий

$$\text{Вер}_\xi \{g_j(d, u, \xi) \leq 0\} \geq \rho, \quad j \in J$$

Шаг 4. Если вероятностные ограничения не выполняются, т.е. $\alpha^{(v)} \notin \Lambda$, включается алгоритм входа в допустимую область Λ . 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 α^* находим из решения внешней А-задачи оптимизации

$$C(d_{\alpha^*}, u_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in \Lambda} C(d_\alpha, u_\alpha). \quad (4.30)$$

В общем случае задача (4.30) может быть решена подходящим методом нелинейного программирования. Однако нами применялся простейший алгоритм коррекции вектора $\alpha \in \Lambda$ путем увеличения его компонентов на величину

$$\Delta \alpha_j = \lambda^{(v)} \left(\text{Вер}_\xi [g_j(\bullet) \leq 0] - \rho \right),$$

где $\lambda^{(v)}$ – шаг коррекции на v -й итерации, подбираемый опытным путем. Поиск α^* прекращается, если $\Delta \alpha_j$ для \forall_j становится меньше заранее заданного малого числа ε (точность поиска α^*).

Вычисление вероятностных интегралов производится стандартными методами (Монте-Карло или на аппроксимирующей сетке).

Задача 2. Имеются конструктивные и управляющие переменные. На этапе эксплуатации неопределенные параметры могут быть определены в некоторый момент времени и управляющие переменные могут быть использованы для обеспечения выполнения ограничений.

Для этого случая использовать в качестве критерия выражение $M_\xi \{C^*(d, \xi)\}$, где $C^*(d, \xi) = \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J$, которое мы применяли для задачи с жесткими ограничениями, нельзя. Это связано с тем, что сам вид этого критерия предполагает выполнение всех ограничений при всех ξ из заданной области, т.е. жестким образом. Построим для этого случая критерий оптимизации.

Обозначим через $\hat{\Xi}$ множество значений ξ из заданной области, при которых могут быть выполнены ограничения задачи и $\text{Вер}_\xi \left[\xi \in \hat{\Xi} \right] \geq \rho_{\text{зад}}$. Тогда в критерии оптимизации для исходного $\xi \in \hat{\Xi}$ переменную u следует выбирать из условия минимума $C(d, u, \xi)$ при условии выполнения ограничений $g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J$, а при $\xi \notin \hat{\Xi}$ либо просто из условия минимизации $C(d, u, \xi)$, либо из условия минимизации функции, учитывающей величину $C(d, u, \xi)$ и штраф за нарушение ограничений $g_j(d, u, \xi) \leq 0$. При этом будем использовать следующие обозначения:

$$\hat{C}(d, u, \xi) = C(d, u, \xi) + A \cdot \max \left(\max_{j \in J^*} g_j(d, u, \xi), 0 \right), \quad j \in J^*, \quad (4.31)$$

где A – штрафной коэффициент; J^* – множество индексов ограничений, за нарушение которых берется штраф.

В этом случае задача оптимального проектирования может быть записана следующим образом:

$$\min_d C(d) = \min_d (C_1(d) + C_2(d)), \quad (4.32)$$

$$C_1(d) = \int_{\hat{\Xi}} \left(\min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right) P(\xi) d\xi;$$

$$C_2(d) = \int_{\hat{\Xi}} \left(\min_u \hat{C}(d, u, \xi) \right) P(\xi) d\xi,$$

где $\hat{C}(\bullet)$ определяется из (4.31) при $j \in J^*$;

$$\hat{\Xi} = \hat{\Xi}(d) = \left\{ \xi : \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi \right\}; \quad (4.33)$$

$$\text{Вер}[\xi \in \hat{\Xi}] \geq \rho_{\text{зад}}. \quad (4.34)$$

Отметим, что если существует такое d , что $\max_{\xi \in \hat{\Xi}} \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0$ при $\rho_{\text{зад}} \rightarrow 1$, имеем $\hat{\Xi} \rightarrow \Xi$ и в пределе при $\rho_{\text{зад}} = 1$ задача (4.32) – (4.34) переходит в двухэтапную задачу с жесткими ограничениями.

Решение двухэтапной задачи оптимизации (4.32) – (4.34) гораздо сложнее одноэтапной задачи (4.32) – (4.34) и для ее решения также будем использовать метод дискретизации критерия для получения дискретного аналога задачи (4.32) – (4.34). С помощью квадратурной формулы функцию

$$M_{\xi} \left\{ C^*(d, \xi) = \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right\}$$

можно приближенно заменить на функцию

$$M_{\xi} \left\{ C^*(d, \xi) \right\} = \sum_{i \in I_1} \gamma_i C^*(d, \xi^i),$$

где ξ^i – аппроксимационные точки; I_1 – множество индексов аппроксимационных точек.

Обозначим через u^i значение вектора u , являющиеся решением задачи

$$C^*(d, \xi) = \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J$$

при $\xi = \xi^i$. Тогда

$$\sum_{i \in I_1} \gamma_i C^*(d, \xi^i) = \sum_{i \in I_1} \gamma_i \min_{u^i} \left\{ C(d, u^i, \xi^i) \mid g_j(d, u^i, \xi^i) \leq 0, j \in J \right\}. \quad (4.35)$$

Поскольку под знаком суммы задачи оптимизации зависят каждая от своих поисковых переменных, операции суммирования и минимизации можно поменять местами и задача (4.32) – (4.34) может быть представлена в виде

$$\min_d \left\{ \sum_{i \in I_1} \min_{u^i} \left[C(d, u^i, \xi^i) \mid g_j(d, u^i, \xi^i) \leq 0, j \in J \right] + \sum_{l \in I_2} \min_{u^l} \left[C(d, u^l, \xi^l) + A \cdot \max_{j \in J^*} (g_j(d, u, \xi), 0), j \in J \right] \right\},$$

$$\text{Вер}[\xi \in \hat{\Xi}] \geq \rho_{\text{зад}}$$

или

$$\min_{d, u^i, u^l, i \in I_1, l \in I_2} \left\{ \sum_{i \in I_1} \left[C(d, u^i, \xi^i) \right] + \sum_{l \in I_2} \left[C(d, u^l, \xi^l) + A \cdot \max_{j \in J^*} (g_j(d, u, \xi), 0) \right] \right\} \quad (4.36)$$

при ограничениях

$$g_j(d, u^i, \xi^i) \leq 0, \quad j \in J, \quad i \in I_1 \quad (4.37)$$

и

$$\text{Вер}[\xi \in \hat{\Xi}] \geq \rho_{\text{зад}}. \quad (4.38)$$

Решение сформулированной задачи возможно с использованием эффективных методов решения задач нелинейного программирования и имитационного моделирования.

Нами разработан алгоритм решения задачи (4.35) – (4.38), базирующийся на методе имитационного моделирования [41].

Задача 3. Имеются конструктивные и управляющие переменные. Вектор неопределенных параметров состоит из двух подвекторов ξ^1 и ξ^2 ($\xi = (\xi^1, \xi^2)$). В подвектор ξ^1 входят параметры, которые могут быть только определены на стадии эксплуатации процесса, в подвектор ξ^2 – параметры, имеющие неопределенности на этапе эксплуатации те же, что и на этапе проектирования. Пусть при этом $\xi^1 \in \Xi^1$ и $\xi^2 \in \Xi^2$.

Эта задача в большей степени соответствует реальным задачам проектирования, поскольку внешние случайные факторы всегда будут иметь место не только на стадии проектирования, но и на стадии эксплуатации производства. Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{aligned} \min_d \left\{ \int_{\hat{\Xi}} \left(\min_u M_{\xi^2} (C(d, u, \xi^1, \xi^2) \mid \text{Вер}_{\xi^2} [g_j(d, u, \xi^1, \xi^2) \leq 0] \geq \rho_{\text{зад}}, \quad j \in J) \times \right. \right. \\ \times P(\xi^1) d\xi^1 + \int_{\Xi \setminus \hat{\Xi}} \min_u M_{\xi^2} (C(d, u, \xi^1, \xi^2) + \\ \left. \left. + A \cdot \max_{j \in J^*} \left(\rho_{\text{зад}} - \text{Вер}_{\xi^2} (g_j(d, u, \xi^1, \xi^2) \leq 0) \right); \quad 0 \right) P(\xi^1) d\xi^1, \right\} \end{aligned} \quad (4.39)$$

$$\hat{\Xi} = \left\{ \xi^1 : \min_u \max_{j \in J^*} \left[\rho_{\text{зад}} - \text{Вер}_{\xi^2} [g_j(d, u, \xi^1, \xi^2) \leq 0] \leq 0, \quad \xi^1 \in \Xi^1 \right] \right\}, \quad (4.40)$$

где A – штрафной коэффициент; J^* – множество индексов ограничений, за нарушение которых берется штраф.

Здесь также отметим, что если существует $d \in D$, при котором

$$\max_{\xi^1 \in \Xi^1} \min_u \max_{j \in J} \left(\rho_{\text{зад}} - \text{Вер}_{\xi^2} [g_j(d, u, \xi^1, \xi^2) \leq 0] \right) \leq 0,$$

то существует $\{d\} \neq \emptyset$, при котором $\hat{\Xi} = \Xi$ и

$$\int_{\hat{\Xi}} \min_u M_{\xi^2} (\bullet) P(\xi^1) d\xi^1 = 0.$$

При этом сформулированная задача (4.39), (4.40) переходит в двухэтапную задачу с жесткими ограничениями.

Задача 4. Имеются конструктивные и управляющие переменные. На этапе эксплуатации ХТП область неопределенных параметров та же, что и на этапе проектирования. Этот случай соответствует

задаче проектирования ХТП, когда на этапе эксплуатации область неопределенных параметров не может быть уточнена.

Эта задача может быть сформулирована (в отличие от задачи 1) следующим образом):

$$C^* = \min_{d,u} M_{\xi} \{ C(d, u, \xi) \}$$

при условии

$$\max_{\xi} \max_j g_j(d, u, \xi) \leq 0$$

или

$$\max_{\xi} g_j(d, u, \xi) \leq 0, \quad j \in J.$$

Упростим сформулированную задачу. Для этого заменим математическое ожидание с помощью квадратурной формулы некоторой суммой

$$M_{\xi} \{ C(d, u, \xi) \} \approx \sum_{i \in I_1} v_i C(d, u, \xi^{(i)}),$$

где v_i – весовые коэффициенты, $\sum_{i \in I_1} v_i = 1$, I_1 – множество аппроксимационных точек в области Ξ .

Совокупность точек $\xi^{(i)}$, $i \in I_1$, будем обозначать через S_1 , а множество критических точек на v -м шаге – через $S_2^{(v)} = \{ \xi^{(k)} : k \in I_2^{(v)} \}$.

Алгоритм 3

Шаг 1. Положим $v=0$. Выбираем совокупность аппроксимационных точек S_1 и начальную совокупность критических точек $S_2^{(v)}$.

Шаг 2. Решаем задачу

$$\min_{d,u} \sum_{i \in I_1} \gamma_i C(d, u, \xi^{(i)});$$

$$g_j(d, u, \xi^{(k)}) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \quad k \in I_2^{(v)}$$

и определяем $d^{(v)}$, $u^{(v)}$.

Шаг 3. Решаем m -задач

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(d^{(v)}, u^{(v)}, \xi^k), \quad j = \overline{1, m}$$

и определяем m точек $\xi^{(j)*}$, $j = \overline{1, m}$.

Шаг 4. Образует множество

$$R^{(v)} = \{ \xi^{(j)*} : g_j(d^{(v)}, u^{(v)}, \xi^{(j)*}) > 0 \}.$$

Если это множество пустое, то решение задачи получено. В противном случае перейдем к шагу 5.

Шаг 5. Определим

$$S_2^{(v+1)} = S_2^{(v)} \cup R^{(v)}.$$

Положим $v := v+1$ и переходим к шагу 2.

Характерной чертой алгоритма 3 является увеличение числа критических точек на каждом шаге, соответственно увеличивается число 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

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(d^{(v)}, u^{(v)}, \xi^k), \quad j = \overline{1, m}$$

находится в одной из вершин параллелепипеда Ξ [28]. В начальное множество критических точек $S_2^{(0)}$ включается некоторое количество угловых точек куба Ξ , а на шаге 3 рассчитываются значения функций $g_j(d^{(v)}, u^{(v)}, \xi^k)$, $j = \overline{1, m}$ во всех угловых точках куба Ξ , не принадлежащих множествам $S_2^{(v)}$ и S_1 . Среди этих точек выбираются m точек, в которых функции $g_j(d^{(v)}, u^{(v)}, \xi^k)$, $j = \overline{1, m}$ принимают наибольшие значения. Далее определим множество критических точек $S_2^{(v+1)} = S_2^{(v)} \cup R^{(v)}$ и переходим к шагу 2 алгоритма 2.

Задача 5. Имеются конструктивные и управляющие переменные. На этапе эксплуатации неопределенные параметры могут быть определены в каждый момент времени. Для обеспечения выполнения ограничений $g_j(d, u, \xi) \leq 0$, $j \in J$ могут быть использованы конструктивные и управляющие переменные. Для этого случая условие гибкости (работоспособности) можно записать в виде

$$\forall \xi \in \Xi \exists u, d \forall j \in J [g_j(d, u, \xi) \leq 0]$$

или

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0. \quad (4.41)$$

Изменение конструктивных переменных гибкого аппарата на стадии эксплуатации производства возможно за счет его модульно-блочной структуры. Тогда оптимизационная задача в условиях неопределенности на стадии проектирования будет иметь вид

$$C^* = M_{\xi} \left\{ \min_{d, u} C(d, u, \xi) \right\}$$

при условии (4.41).

Используя квадратурную формулу, функцию $M_{\xi} \{\bullet\}$ можно приближенно заменить выражением

$$M_{\xi} \{C^*(d, u, \xi)\} \approx \sum_{i \in I_1} v_i C^*(d, u, \xi^i),$$

где v_i – весовые коэффициенты; ξ^i – аппроксимационные точки; I_1 – множество индексов аппроксимационных точек.

Операции суммирования и минимизации можно поменять местами и задача может быть представлена в виде

$$C^* = \min_{d^i, u^i} \sum_{i \in I_1} v_i C(d^i, u^i, \xi^i)$$

при выполнении условия гибкости и $g_j(d^i, u^i, \xi^i) \leq 0$, $i \in I_1$, $j \in J$.

Сформулированная задача также, как и задача 4, относится к одноэтапным задачам оптимизации и может быть решена с помощью алгоритма 3.

Задача 6. Формулировка этой задачи та же, что и задачи 2, за исключением того, что условие гибкости (работоспособности) проекта ХТП записывается в жесткой форме

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0. \quad (4.42)$$

В задаче 6 существенно различаются роли конструктивных d и технологических переменных u на двух этапах. Переменные d , выбранные на этапе проектирования, естественно, остаются неизменными на всем этапе функционирования процесса. С другой стороны, технологические режимные (управляющие) переменные на этапе функционирования могут настраиваться в зависимости от того, какие значения принимают параметры ξ . Фактически в данном случае решается задача выбора оптимальных коэффициентов запаса для конструктивных переменных, обеспечивающих выполнение технологических ограничений при любых значениях параметров $\xi \in \Xi$.

Использование возможности изменять параметры u (с помощью системы управления) на этапе функционирования процесса "облегчает" переменным d удовлетворять ограничениям, что, в свою очередь, позволит уменьшить коэффициенты запаса.

Двухэтапную задачу оптимального проектирования можно записать в виде

$$C^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right\}$$

при ограничениях (4.42).

Используя прием дискретизации, перепишем последнюю задачу в виде

$$\min_{d, u^{(i)}} \sum_{i \in I_1} v_i C(d, u^{(i)}, \xi^{(i)}), \quad (4.43)$$

$$g_j(d, u^{(i)}, \xi^{(i)}) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \quad i \in I_1; \quad (4.44)$$

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{u \in U} \max_{j \in J} g_j(d, u, \theta) \leq 0. \quad (4.45)$$

Решение задачи (4.43) – (4.45) прямыми методами не представляется возможным, поскольку вычисление $\chi(d)$ в каждой точке может привести к очень большим объемам вычислений. В связи с этим здесь будет рекомендована итерационная процедура, основанная на идеях метода "ветвей и границ" [44] и обеспечивающая приближение значений целевой функции (4.43). При этом не требуется непосредственно вычислять величину $\chi(d)$.

В дальнейшем нам потребуются два соотношения:

$$\min_x \max_y f(x, y) \geq \max_y \min_x f(x, y); \quad (4.46)$$

$$\max_x \max_y f(x, y) = \max_y \max_x f(x, y), \quad (4.47)$$

где x, y – векторы дискретных или непрерывных переменных.

Последнее соотношение является очевидным.

Введем функцию

$$\varphi(d, u, \xi) = \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi).$$

Тогда величина имеет вид

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \varphi(d, u, \xi).$$

В соответствии с соотношением (4.46) имеем

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \varphi(d, u, \xi) \leq \min_u \max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi) = \chi^U(d), \quad (4.48)$$

где $\chi^U = \min_u \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) = \min_u \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} g_j(d, u, \xi)$.

Введем обозначение

$$\hat{\varphi}_j(d, u) = \max_{\xi} g_j(d, u, \xi),$$

отсюда

$$\chi^U(d) = \min_u \max_j \hat{\varphi}_j(d, u).$$

Известно, что задача вычисления $\chi^U(d)$ может быть сведена к следующей:

$$\min_{u, \alpha} \alpha \mid \hat{\varphi}_j(d, u) \leq \alpha. \quad (4.49)$$

Из (4.48) следует, что если $\chi^U(d) \leq 0$, то $\chi(d) \leq 0$. Поэтому условие

$$\chi^U(d) \leq 0$$

является достаточным условием допустимости (работоспособности) проекта, определяемого вектором конструктивных параметров d . Для определения величины $\chi^U(d)$ необходимо решить задачу (4.49), тогда $\chi^U(d) = \alpha^*$, где α^* – оптимальное значение переменных α .

Аналогично можно показать, что

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{u \in U} \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \geq \chi(d),$$

где

$$\chi^L(d) = \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J} \min_{u \in U} g_j(d, u, \xi) = \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} \min_{u \in U} g_j(d, u, \xi).$$

Отсюда следует, что если

$$\chi^L(d) \geq 0,$$

то и $\chi(d) \geq 0$. Поэтому это условие является достаточным условием недопустимости (неработоспособности) проекта с вектором d . Для определения $\chi(d)$ необходимо решить m задач вида

$$\max_{\xi \in \Xi} \min_{u \in U} g_j(d, u, \xi), \quad j \in \overline{1, m}.$$

Каждая из этих задач эквивалентна следующей

$$\max_{\xi, \alpha} \alpha \mid \min_{u \in U} g_j(d, u, \xi) \leq \alpha.$$

Таким образом, имеем

$$\chi^L(d) \leq \chi(d) \leq \chi^U(d). \quad (4.50)$$

Следовательно, вычислив значения χ^L и χ^U , получим оценки снизу и сверху величины χ – критерия гибкости (работоспособности) Гроссмманна.

Проанализируем физический смысл условия

$$\chi^U(d) \leq 0.$$

Будем искать такой вектор u , который обеспечивает допустимость вектора d при любых ξ :

$$\exists u, \forall \xi, \forall_j g_j(d, u, \xi) \leq 0.$$

Используя этот критерий, мы ищем единственный вектор u , который обеспечивает допустимость вектора d при любых значениях ξ . Напомним, что в критерии гибкости Гроссмманна $\chi(d)$ каждому значению ξ соответствует свой вектор u , обеспечивающий допустимость вектора d .

Если разность $\chi^U - \chi^L$ мала, то рассмотренный подход дает возможность оценить гибкость ХТП, в противном случае необходима какая-либо регулярная процедура, позволяющая изменить эту разность. Рассмотрим одну из этих процедур [43, 44].

Разобьем область Ξ на N областей Ξ_i , ($i = \overline{1, N}$). Для каждой области определяем величину

$$\chi_i^U = \min_{u \in U} \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi_i} g_j(d, u, \xi).$$

Для этого необходимо решить задачу

$$\min_{u, \alpha} \alpha \tag{4.51}$$

$$\max_{\xi \in \Xi_i} g_j(d, u, \xi) \leq \alpha.$$

Определим теперь величину $\bar{\chi}^U$ следующим образом:

$$\bar{\chi}^U = \max_i \min_{u \in U} \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi_i} g_j(d, u, \xi).$$

Поскольку $\Xi_i \subset \Xi$, то имеет место неравенство

$$\chi_i^U \leq \chi^U,$$

откуда

$$\bar{\chi}^U = \max_i \chi_i^U \leq \chi^U.$$

Далее можно показать, что

$$\chi \leq \bar{\chi}^U \leq \chi^U.$$

Следовательно, получена уточненная верхняя оценка критерия гибкости Гроссмманна. Заметим, что чем плотнее покрытие области Ξ , тем ближе будет $\bar{\chi}^U$ к χ . Однако такой путь может приводить к решению большого числа задач (4.51). В связи с этим рассмотрим другой путь вычисления $\chi(d)$. Для этого представим критерий $\chi(d)$ в виде

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \psi(d, \xi),$$

где $\psi(d, \xi) = \min_u \max_j g_j(d, u, \xi)$.

Здесь вычисление $\chi(d)$ сводится к определению точки ξ^* , в которой функция $\psi(d, \xi)$ принимает максимальное значение. Для определения этой точки воспользуемся процедурой метода "ветвей и границ" [48]. Цель этой процедуры будет состоять в том, чтобы разбивая область Ξ на все большее число подобластей Ξ_i , постараться локализовать точку ξ^* .

Пусть на v -м шаге область Ξ разбита на N областей $\Xi_i^{(v)}$, $i = \overline{1, N_v}$: $\Xi = \overline{\Xi_1^{(v)} \cup \Xi_2^{(v)} \cup \dots \cup \Xi_{N_v}^{(v)}}$. Далее выбирается одна из областей $\Xi_{k_v}^{(v)}$, которая в свою очередь разбивается на некоторое число областей. Для простоты будем считать, что область $\Xi_{k_v}^{(v)}$ делится на две области: $\Xi_S^{(v+1)}$ и $\Xi_q^{(v+1)}$ ($\Xi_{k_v}^{(v)} = \Xi_S^{(v+1)} + \Xi_q^{(v+1)}$). В качестве области $\Xi_{k_v}^{(v)}$ берется та из областей $\Xi_i^{(v)}$, ($i = \overline{1, N_v}$), в которой с наибольшей вероятностью находится оптимальная точка ξ^* .

Вычислим для каждой области $\Xi_i^{(v)}$ величину χ_i^U :

$$\chi_i^U \geq \max_{\xi \in \Xi_i} \psi(d, \xi).$$

Величина χ_i^U является верхней оценкой для значения функции $\psi(d, \xi)$ внутри области $\Xi_i^{(v)}$. Поэтому закономерно в качестве квазиоптимальной области выбрать область $\Xi_{k_v}^{(v)}$, для которой величина χ_i^U принимает наибольшее значение:

$$\chi_k^U = \max_i \chi_i^U.$$

Для проведения процедуры метода ветвей и границ на каждой итерации необходимо также знать нижнюю границу значения величины $\chi(d) = \psi(d, \xi^*)$. Будем вычислять ее следующим образом [45]. Обозначим через ξ_i^* решение задач (4.51) и найдем

$$\psi(d, \xi_i^*) = \min_u \max_j g_j(d, u, \xi_i^*).$$

Для этого необходимо решить задачу

$$\min_{u, \alpha} \alpha; \tag{4.52}$$

$$g_j(d, u, \xi_i^*) \leq \alpha, \quad (j = \overline{1, m}).$$

Вычислим $\psi(d, \xi_i^*)$ для всех областей $\Xi_i^{(v)}$, ($i = \overline{1, N_v}$).

Введем величину

$$\chi_{(v)}^L = \max_j \psi(d, \xi_j^*).$$

Очевидно, что

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \psi(d, \xi) \geq R^{(v)},$$

что и определяет $R^{(v)}$ как нижнюю границу для максимального значения функции $\psi(d, \xi)$. Пусть для некоторой области выполняется соотношение $R^{(v)} \geq \chi_i^U$, тогда в соответствии с неравенством $\chi_i^U \geq \max_{\xi \in \Xi_i} \psi(d, \xi)$ имеем $R^{(v)} \geq \psi(d, \xi)$, $\forall \xi \in \Xi_i^{(v)}$. Следовательно, точка ξ^* заведомо не принадлежит области $\Xi_i^{(v)}$ и в дальнейшем не рассматривается. Процедура прекращается при выполнении соотношения

$$\left| R^{(v)} - \chi_{k_v}^U \right| \leq \varepsilon,$$

где ε – малая величина.

Если речь идет об оценке гибкости производства, а не о вычислении $\chi(d)$, то описанная процедура может закончиться раньше, чем выполнится последнее условие. Действительно, пусть на v -й итерации выполнится условие

$$\max_i \chi_i \leq 0,$$

тогда

$$\chi_{k_v} \leq 0.$$

Далее, на каждом шаге необходимо найти два значения χ_S и χ_q , соответствующих областям $\Xi_S^{(v+1)}$ и $\Xi_q^{(v+1)}$, на которые разбивается квазиоптимальная область $\Xi_{k_v}^{(v)}$. Для этого потребуется два раза решить задачу (4.51) и, кроме того, необходимо найти величины $\psi(d, \xi_S^*)$ и $\psi(d, \xi_q^*)$, дважды решив задачу (4.52) для $i=S$ и $i=q$.

Вернемся теперь к решению задачи (4.43) – (4.45):

$$C_B^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right\}; \quad (B)$$

$$\chi(d) = \max_\xi \min_u \max_j g_j(d, u, \xi) \leq 0.$$

Используя полученные выше оценки $\chi^L(d)$, $\chi^U(d)$, можно получить оценки оптимального значения целевой функции [45]. Действительно, рассмотрим следующие вспомогательные задачи:

$$C_\Gamma^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right\}; \quad (Г)$$

$$\chi^U(d) \leq 0.$$

$$C_D^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right\}; \quad (Д)$$

$$\chi^L(d) \leq 0.$$

Задачи (Г) и (Д) отличаются от задачи (В) только тем, что в них ограничение $\chi(d) \leq 0$ заменено соответственно на ограничения $\chi^U(d) \leq 0$ и $\chi^L(d) \leq 0$. Поскольку имеет место неравенство

$$\chi^L(d) \leq \chi(d) \leq \chi^U(d),$$

то можно записать

$$C_D^* \leq C_B^* \leq C_\Gamma^*,$$

где C_B^* , C_Γ^* , C_D^* – оптимальные значения целевой функции задач (В), (Г) и (Д), соответственно. Следует отметить, что решение задачи (Г) и (Д) проще, чем решение задачи (В). Если разность $C_\Gamma^* - C_D^*$ достаточно мала, то в качестве приближенных оптимальных значений конструктивных переменных могут быть приняты значения

$$d_k^{(B)*} = 0,5(d_k^{(\Gamma)*} + d_k^{(D)*})$$

при условии

$$\chi(d^{(B)*}) \leq 0.$$

Введем еще одну вспомогательную задачу, разбив область Ξ на N областей Ξ_i ($i = \overline{1, N}$) и определяя

$$\chi_i^U(d) = \min_{u \in U} \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} g_j(d, u, \xi).$$

$$C_E^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_u C(d, u, \xi) \mid g_j(d, u, \xi) \leq 0, j \in J \right\}; \quad (E)$$

$$\chi_i^U(d) \leq 0, \dots, \chi_N^U(d) \leq 0.$$

Поскольку имеет место неравенство $\chi(d) \leq \bar{\chi}^U \leq \chi^U(d)$, то

$$C_B^* \leq C_E^* \leq C_\Gamma^*.$$

Пусть величина $r(\Xi_i)$ характеризует размер подобласти Ξ_i . При выполнении условия

$$r(\Xi_i) \leq \varepsilon,$$

где ε – достаточно малое число, можно получить достаточно хорошее приближение к решению задачи (4.43) – (4.45).

Рассмотрим алгоритм решения задачи (4.43) – (4.45) с помощью задачи (E), в которой разбиение на области Ξ_i будет проводиться более "экономичным" способом. Обозначим через $\Xi_i^{(v)}$, $i = \overline{1, N^{(v)}}$ подобласти, на которые разбивается область Ξ на k -й итерации.

Алгоритм 4 [44]

Шаг 1. Положим $v = 0$. Выбрать начальное разбиение области Ξ на подобласти $\Xi_i^{(v)}$, $i = \overline{1, N^{(v)}}$ и начальное значение $d^{(v)}$ вектора d .

Шаг 2. Решить задачу (E). Пусть $C_E^{(v)}$ и $d^{(v)}$ – оптимальные значения критерия и вектора d .

Шаг 3. Найти множество $S^{(v)}$ номеров активных ограничений:

$$\chi_i^U(d^{(v)}) = 0, \quad i \in S^{(v)}.$$

Очевидны соотношения

$$\chi_i^U(d^{(v)}) \geq \chi_j^U(d^{(v)}), \quad \forall i \in S^{(v)}, j \neq i.$$

Шаг 4. Если множество $S^{(v)}$ – пустое, то решение задачи (4.43)-(4.45) получено. В противном случае перейти к шагу 5.

Шаг 5. Проверить условие

$$r(\Xi_i) \leq \delta, \quad \forall i \in S^{(v)},$$

где δ – заранее заданное малое число.

Если условие выполняется, то итерационную процедуру закончить, в противном случае перейти к шагу 6.

Шаг 6. Разбить каждую область $\Xi_i^{(v)} (i \in S^{(v)})$ на две подобласти $\Xi_{i_1}^{(v+1)}$ и $\Xi_{i_2}^{(v+1)}$ и образовать новое разбиение, исключив из предыдущего разбиения подобласти $\Xi_i^{(v)} (i \in S^{(v)})$ и добавив новые области $\Xi_{i_1}^{(v+1)}, \Xi_{i_2}^{(v+1)} (i \in S^{(v)})$.

Шаг 7. Положить $v := v+1$ и перейти к шагу 2. Поскольку

$$\Xi_{i_1}^{(v+1)} \subset \Xi_i^{(v)}, \Xi_{i_2}^{(v+1)} \subset \Xi_i^{(v)}, \chi_i^{U^{(v)}}(d) \geq \chi_{i_1}^{U^{(v+1)}}(d), \chi_i^{U^{(v)}}(d) \geq \chi_{i_2}^{U^{(v+1)}}(d).$$

Следовательно, $C_E^{(v)} \geq C_E^{(v+1)}$.

Приведенный алгоритм позволяет определить локальный минимум задачи (4.43) – (4.45).

Особенность этого алгоритма состоит в том, что на каждой итерации выполняется операция, которая приближает ограничение (E) к ограничению (4.48) (шаги 5 и 6). Идея этой операции близка к идее метода "ветвей и границ" [48], поскольку на каждой итерации разбиению подвергаются те подобласти $\Xi_i^{(v)}$, для которых верна оценка величины $\chi(d)$ наибольшая. Фактически поиск можно прекратить при выполнении условия

$$\left| C_E^{(v)} - C_E^{(v+1)} \right| \leq \varepsilon,$$

где ε – достаточно малое число.

Задача 7. Формулировка этой задачи та же, что и задачи 3, за исключением того, что условие гибкости (работоспособности) проекта записывается в виде

$$\chi(d) = \min_{\xi^1 \in \Xi^1} \min_{u \in U} \max_{\xi^2 \in \Xi^2} \max_{j \in J} g_j(d, u, \xi) \leq 0. \quad (4.53)$$

Рассмотрим вопрос, связанный с представлением критерия оптимизации. Для фиксированного момента времени на этапе эксплуатации ХТП значение ξ^1 известно, а ξ^2 может принимать любое значение из области Ξ^2 . Поэтому для фиксированного момента времени будем иметь следующую постановку оптимизационной задачи:

$$\hat{C}(d, \xi^1) = \min_{u \in U} M_{\xi^2} \left\{ C(d, u, \xi^1, \xi^2) \mid \max_{\xi^2 \in \Xi^2} g_j(d, u, \xi^1, \xi^2) \leq 0, j \in J \right\}.$$

В качестве критерия оптимального проектирования должно быть взято математическое ожидание по ξ^1 от величины $\hat{C}(d, \xi^1)$.

В результате приходим к задаче

$$C^* = \min_d M_{\xi^1} \left\{ \hat{C}(d, \xi^1) \right\} \quad (4.54)$$

при ограничении (4.53).

Используя метод дискретизации критерия, получим дискретный аналог задачи (4.54), (4.53):

$$C^* = \min_{d, u^i} \sum_{i \in I_1} w_i C(d, u^i, \xi^{1i}, \xi^{2i})$$

при условиях (4.53) и

$$\max_{\xi^2 \in \Xi^2} g_j(d, u^i, \xi^{I_1}, \xi^2) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad i \in I_1.$$

где $w_{ij} = w_i v_j$, w_i, v_j – весовые коэффициенты ($\sum v_j = 1, \sum w_i = 1$), I_1, I_2 – множества индексов аппроксимационных точек.

Сформулированная задача (4.54), (4.53) представляет определенный интерес для практики и может быть решена при помощи модифицированного алгоритма 4.

4.4. СТРАТЕГИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Задачи статической оптимизации технологических объектов традиционно формулируются в форме задачи нелинейного программирования (НЛП) с ограничениями типа равенств и неравенств. В работах [29 – 34] установлено, что 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 методе последовательного квадратичного программирования решение общей задачи НЛП ищется путем замены каждой нелинейной функции локальной квадратичной аппроксимацией в точке приближенного решения d^0 и решения получаемой последовательности аппроксимирующих подзадач. При этом установлено [30], что для задач квадратичного программирования существуют специальные методы, дающие решение за конечное число итераций без одномерного поиска при использовании вместо него итерации симплексного типа.

В 1980 г. К. Шитковский опубликовал в работе [34] результаты обширного исследования программ НЛП. В экспериментах использовались более 20 программ и 180 тестовых задач, генерируемых случайным образом; при этом структура задач была заранее определена, и для каждой из них многократно задавались начальные приближения. Тесты были проведены для четырех программ методов штрафных функций, 11 программ методов множителей Лагранжа, трех программ метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ) и четырех программ метода последовательного квадратичного программирования (ПКП).

Программы оценивались по следующим критериям: 1) робастность; 2) надежность; 3) глобальная сходимость; 4) способность решать вырожденные и плохо обусловленные задачи; 5) чувствительность к малому изменению условий задачи; 6) простота обращения с программой.

На основе многочисленных тестов К. Шитковский пришел к весьма интересным выводам относительно классов алгоритмов и дал рекомендации по разработке программного обеспечения. В соответствии с его исследованиями классы алгоритмов можно проранжировать следующим образом: 1) методы ПКП; 2) Методы ОПГ; 3) методы множителей; 4) методы штрафных функций, не вошедшие в первые три класса.

Теперь рассмотрим некоторые принципы проведения оптимизационного исследования. Известно, что задача, к которой можно применить оптимизационные методы, должны включать критерий эффективности, независимые переменные, ограничения в виде равенств и неравенств, которые и образуют модель рассматриваемой системы.

Описанные и построенные модели реального объекта – важнейший этап оптимизационного исследования, так как он определяет практическую ценность получаемого решения и возможность его реализации.

Процесс оптимизации с использованием модели можно рассматривать как метод отыскания оптимального решения для реального объекта без непосредственного экспериментирования с самим объектом. "Прямой" путь, ведущий к оптимальному решению, заменяется "обходным", включающим построение и оптимизацию модели, а также преобразование полученных результатов в практически реализуемую форму. Очевидно, что такой подход к оптимизации объекта обязательно требует использова-

ния некоторого упрощенного представления реального объекта. При формировании такого приближенного представления или модели следует учитывать только важнейшие характеристики объекта, которые должны быть отражены в модели, а менее существенные особенности в модель можно не включать. Необходимо также сформулировать логически обоснованные допущения, выбрать форму представления модели, уровень ее детализации и метод реализации на ЭВМ. Указанные соображения относятся к этапу построения модели и являются в той или иной мере произвольными. Модели можно упорядочить по степени адекватности описания поведения реального объекта в представляющей интерес области эксплуатации. Таким образом, качество модели нельзя оценивать ни по структуре, ни по форме. Единственным критерием такой оценки может служить лишь достоверность полученных на модели примеров поведения реального объекта.

В то же время адекватность модели часто невозможно строго оценить и поэтому выбор той или иной модели в значительной степени субъективен. Так, например, одна модель может оказаться более точной, чем другая, в определенном диапазоне изменения переменных, но менее точной в другом диапазоне.

Следует отметить, что соответствие модели реальному объекту носит в лучшем случае правдоподобный характер. Поскольку модель по своей сути не более чем упрощение реальных соотношений, то не существует абсолютных примеров, с помощью которых можно было бы ранжировать модели. Всегда есть ситуации, требующие субъективной оценки и предвидения того, как поведет себя реальный объект. Как следствие очень важно, чтобы создатель модели детально знал моделируемую систему, понимал технические принципы, лежащие в основе модели, а в случае оптимизации проекта сам руководил вычислениями, необходимыми для получения практически реализуемого проекта.

Работа по созданию модели является самым дорогим этапом оптимизационного исследования, так как она требует привлечения компетентных специалистов, хорошо знающих предметную область и изучаемый объект. Поскольку стоимость создания моделей резко возрастает по мере их детализации, необходимо тщательно продумывать уровень детализации, чтобы он соответствовал целям исследования и отвечал качеству доступной информации об объекте.

В оптимизационных исследованиях обычно используются модели трех основных типов: 1) аналитические; 2) модели поверхности отклика (регрессионные); 3) имитационные.

Вычислительные трудности, связанные с решением задачи, обычно вызываются четырьмя основными причинами: плохим масштабированием, несоответствием программ для вычисления значений функции и программ для вычисления производных, недифференцируемостью входящих в модель функций, неправильным заданием области определения значений аргументов функций. Только при тщательном анализе модели можно выявить эти ситуации и исключить их путем простой модификации модели.

В результате масштабирования осуществляется переход к относительным значениям величин, используемых в модели. В идеальном случае все переменные модели масштабируются таким образом, чтобы их значения находились в интервале $0,1 \dots 10$. Таким же образом по оценкам ограничений в приближенном решении исследуется чувствительность ограничений к изменениям значений переменных. Для этого вычисляется матрица, составляемая из градиентов ограничений. Наилучший случай, когда все ограничения имеют почти одинаковую чувствительность к изменениям значений переменных и значения градиентов ограничений находятся внутри одного и того же интервала значений. Благодаря этому невязки ограничений получают одинаковые веса и матричные операции с якобианом ограничений не приводят к потере точности вычислений.

Для надежной оптимизации объектов, целевые функции которых могут иметь несколько локальных минимумов, следует воспользоваться несколькими методами решения задачи, чтобы найти глобальный минимум. Отыскать глобальный минимум желательно не только в связи с тем, что это лучшее возможное решение задачи, но также и потому, что локальный минимум может привести к неправильным оценкам результатов расчетов по определению влияния переменных модели. Методы поиска глобального оптимума являются в настоящее время предметом интенсивных исследований. Известные методы поиска делятся на детерминированные и стохастические, которые в свою очередь могут быть эвристическими и строго обоснованными. Простейший и наиболее широко используемый метод состоит в проведении ряда оптимизационных расчетов при различных начальных условиях. В этом методе начальные точки выбираются из определенной решетки или же генерируются случайным образом. В первом случае допустимая область разбивается на непересекающиеся области и оптимизация выполняется каждой такой области по отдельности. Во втором случае начальные точки выбираются случайным образом,

считая, что они распределены равномерно. В обоих случаях в качестве глобального оптимума из всех найденных локальных минимумов принимается локальный минимум с минимальным значением целевой функции. Оба этих метода эвристические. Теоретически, обратные методы глобальной оптимизации разработаны только для задач со специальной структурой.

Оптимизационные исследования не заканчиваются получением решения задачи. Напротив, самая важная часть исследования заключается в обосновании правильности решения и анализе его чувствительности. Наиболее важным является информация о состоянии объекта в окрестности решения, что позволяет глубже понять его основные свойства. Важнейшими результатами исследования являются ответы на вопросы: 1) Какие ограничения активны в полученном решении? 2) Что составляет основную часть затрат (стоимости)? 3) Какова чувствительность решения к изменениям значений параметров?

Активные ограничения указывают на ограниченные возможности объекта или на то, что из-за проектных соображений объект усовершенствовать нельзя. По величине затрат (стоимости) находят тот блок объекта, параметры которого должны быть улучшены. Чувствительность решения к изменению значений параметров указывает на то, какие оценки параметров следует улучшить для того, чтобы безошибочно найти оптимально решение.

Рассмотренную выше стратегию оптимизационного исследования будем применять для решения задачи интегрированного проектирования технологических объектов и систем управления.

Далее остановимся на методах динамической оптимизации технологических объектов. Пусть функционирование управляемого технологического объекта (аппаратура, установки и т.п.) описывается на интервале $[t_1, t_2]$ дифференциальным уравнением

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t), \quad x \in E^n, n \in E^r. \quad (4.55)$$

Будем считать, что область допустимых управлений есть множество всех ограниченных кусочно-непрерывных функций $u(t)$ на $[t_0, t_1]$ таких, что $u \in U$ для любого $t \in [t_0, t_1]$, где $u \in E^r$ – заданное подмножество из r -мерного евклидова пространства E^r .

Введем скалярный критерий качества

$$I = V_3(x(t_1), t_1) + \int_{t_0}^{t_1} L(x, u, t) dt, \quad (4.56)$$

где $L(x, u, t)$ – действительная функция на $E^n \times E^r \times [t_0, t_1]$ и $V_3(x(t_1), t_1)$ – действительная функция на $E^n \times [t_0, t_1]$.

Будем считать, что функции $f(x, u, t)$ и $L(x, u, t)$ непрерывны и дифференцируемы по совокупности переменных x, u, t . Пусть S – заданное множество из $E^n \times [t_0, t_1]$, назовем S множеством целей (множеством конечных состояний) и $V_3(x(t_1), t_1)$ – функцией конечных состояний.

Задачей оптимального управления для системы (4.55) при сделанных предположениях относительно начального состояния $x(t_0) \in E^n$, области $u \in E^r$ допустимых управлений $u(t) \in U$ и множества конечных состояний S является отыскание такого управления $u(t) \in U$, что функционал (4.56) достигает минимального значения.

Конкретизация выражений $f(x, u, t)$, $L(x, u, t)$, $V_3(x(t_1), t_1)$ и множества целей S порождает различные типы задач оптимального управления.

Классическое вариационное исчисление (в случае непрерывности $u(t)$) и принцип максимума Л.С. Понтрягина сводят задачу оптимального управления к решению двухточечной краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений. Принцип максимума применим к задачам с управлением общего вида. В случае описания движения объекта линейными дифференциальными уравнениями общая теория задач оптимального управления, основанная на проблеме моментов, предложена и обоснована Н.Н. Красовским [35].

Характерным для задач оптимального управления является то, что точные аналитические решения удается получить лишь в редких случаях, к которым относятся задачи с линейными объектами и квадратичными функционалами.

Сложность или невозможность получения аналитических результатов для задач в более общей постановке привели к развитию вычислительных и приближенных методов построения оптимального управления [36].

Решение сформулированной выше задачи оптимального управления получают обычно в форме так называемого программного управления, т.е. $u^* \equiv u^*(t)$, которое реализуется в разомкнутой системе управления. Применение таких систем управления процессами химической технологии не дает желаемого результата ввиду больших затрат машинного времени для расчета программы управления из-за изменчивости начальных условий и неточности реализации программы в процессе его функционирования. В связи с этим более перспективным направлением в автоматизации и оптимизации динамических режимов процессов химической технологии является синтез систем управления с обратной связью.

Методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) позволяют синтезировать оптимальный закон управления (оператор обратной связи в виде $u^* = \psi(x)$) [37 – 40].

Остановимся здесь на модифицированном А.А. Красовским [38] методе аналитического конструирования, который заключается в видоизменении минимизируемого функционала, позволяющим численно получить решение для достаточно сложных нелинейных задач динамической оптимизации. Пусть управляемый процесс описывается дифференциальным уравнением типа

$$\dot{x} = f(x, t) + \varphi(x, t)u,$$

а минимизируемый функционал имеет вид

$$I = V_3[x(t_1)] + \int_{t_0}^{t_1} Q_3[x(t), t] dt + \int_{t_0}^{t_1} \{U_3[u(t), t] + U_3^*[u^*(t), t]\} dt, \quad (4.57)$$

где U_3, U_3^* – заданные функции аргументов такие, что $\left\{ U_3(u, t) + U_3^*(u^*, t) - \left[\frac{\partial}{\partial u} U_3(u^*, t) \right] u \right\}$ – положительно определенная функция относительно u , обращающаяся в нуль при $u = u^*$. Заметим, что функция u^* в (4.57) – пока неизвестное оптимальное управление.

В работе [38] показано, что оптимальное управление $u = u^*$ в данном случае определяется соотношением

$$\frac{\partial U_3(v, t)}{\partial v} = -\frac{\partial V}{\partial x} \varphi(x, t),$$

где $V = V(x, t)$ есть решение уравнения Ляпунова для неуправляемого ($u \equiv 0$) объекта

$$\frac{\partial V}{\partial t} + -\frac{\partial V}{\partial x} f(x, t) = -Q_3(x, t)$$

при граничном условии

$$V_{t=t_1} = V_3(x).$$

Для случая функционала (4.64) с квадратичной функцией

$$V_3 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^r \frac{u_j^2 + u_j^{*2}}{k_j^2} dt$$

оптимальным управлением являются функции

$$u_j = u_j^* = -k_j^2 \sum_{i=1}^n \varphi_{ij}(x, t) \frac{\partial V}{\partial x_i}, \quad j = \overline{1, r}. \quad (4.58)$$

Таким образом, оптимальное управление при функционале "обобщенной работы" А.А. Красовского (4.57) имеет такой же внешний вид, как и при классическом функционале. Однако функция $V = V(x, t)$ здесь есть решение линейного уравнения с частными производными

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \sum_{i=1}^n \varphi_j \frac{\partial V}{\partial x_i} = -Q_3 \quad (4.59)$$

при граничном условии

$$V_{t=t_1} = V_3, \quad (4.60)$$

в то время как при классическом функционале $V = V(x, t)$ есть решение нелинейного уравнения Беллмана. Это принципиальное отличие, сохраняющееся для всех задач оптимального управления по функционалу обобщенной работы, обуславливает широкие возможности для синтеза систем оптимального управления периодическими процессами и пусковыми режимами непрерывных процессов химических производств.

4.5. 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 проектируемого химического производства. Совокупность данных, характеризующих проектируемое химическое производство (физико-химические, термодинамические свойства веществ, параметры оборудования и технологической схемы, показатели эффективности производства и т.д.) составляют *информационную базу САПР*.

Основными 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 химической технологии 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: а) низкая точность; б) 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); в) 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 не-

прерывности зависимости свойств от параметров); г) невозможность экстраполяции функциональной зависимости за область определения параметров; д) 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 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 включает: литературный поиск, разработку расчетных и экспериментальных методов их получения, оценку.

4.6. ПРИКЛАДНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

Математическое моделирование как метод исследования в настоящее время получил достаточно широкое распространение. С достаточно общих позиций *математическое моделирование* можно рассматривать как один из самых мощных методов и инструментов познания, анализа и синтеза, которым располагают специалисты, ответственные за разработку и функционирование сложных технических устройств и технологических объектов (например, процессов, аппаратов и систем био- и химических технологий). Идея *математического моделирования* состоит в замене реального объекта его "образом" – *математической моделью* – и в дальнейшем изучении модели с целью получения новых знаний об этом объекте. При этом у исследователя появляется возможность экспериментировать с моделью объекта даже в тех случаях, когда делать это на реальном объекте практически невозможно или нецелесообразно. Работа не с самим объектом (явлением, процессом), а с его математической моделью дает возможность относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых мыслимых ситуациях (преимущества теории). В то же время вычислительные (имитационные) эксперименты с моделями объектов позволяют подробно и глубоко изучать объекты в достаточной полноте, недоступной чисто теоретическим подходам (преимущества эксперимента) [49].

Основу современного кибернетического подхода к решению задач анализа и синтеза химико-технологических объектов составляет системный анализ [2]. Сущность системного анализа определяется его стратегией, в основе которой лежат общие принципы, применимые к решению любой системной задачи. К ним можно отнести: 1) четкую формулировку цели исследования, постановку задачи по достижению заданной цели и определение критерия эффективности решения задачи; 2) разработку развернутой стратегии исследования с указанием основных этапов и направлений в решении задачи: последовательно-параллельное продвижение по всему комплексу взаимосвязанных этапов и возможных направлений; организацию последовательных приближений и повторных циклов исследований на отдельных этапах; принцип нисходящей иерархии анализа и восходящей иерархии синтеза при решении составных частных задач. При этом формализация системы осуществляется с помощью математической модели, отображающей связь между *выходными переменными* системы, ее *внутренними параметрами* и *входными переменными*, в том числе *управляющими* и *возмущающими воздействиями*.

Методология *математического моделирования* предусматривает тщательную отработку моделей. Обычно, начав с очень простой модели, постепенно продвигаются к более совершенной ее форме, отражающей сложную природу изучаемого объекта более точно. Искусство моделирования состоит в спо-

способности анализировать проблему, выделять из нее путем абстракции наиболее существенные черты, выбирать и должным образом модифицировать предположения, характеризующие объект (систему), а затем отрабатывать и совершенствовать модель до тех пор, пока она не станет давать полезные для практики результаты. Таким образом, разработка и применение компьютерных моделей все еще в большей степени искусство, нежели наука. Следовательно, как и в других видах искусства, успех или неудача определяется не столько методом, сколько тем, как он применяется.

В складывавшейся десятилетиями последовательности основных этапов разработки и проектирования технических устройств в большинстве отраслей машиностроения и приборостроения, технологических процессов, аппаратов и систем био- и химической технологий некоторый начальный объем необходимой информации формировался путем так называемых проектировочных расчетов, степень достоверности которых должна была обеспечивать лишь довольно грубый отбор альтернатив. Основная часть необходимой для принятия окончательного решения количественной информации (как по степени подробности, так и по уровню достоверности) формировалась на стадии экспериментальной отработки технических устройств, технологических процессов, аппаратов и систем био- и химических технологий. По мере их усложнения и удорожания, а также удлинения стадии их экспериментальной отработки значимость проектировочных расчетов стала расти. Возникла необходимость в повышении достоверности таких расчетов, обеспечивающей более обоснованный отбор альтернатив на начальной стадии проектирования и формулировку количественных критериев для структурной и параметрической оптимизации.

Развитие био- и химических технологий, гибких автоматизированных производственных систем и устройств, сверхзвуковой авиации, возникновение ракетно-космической техники, ядерной энергетики и ряда других быстро развивающихся наукоемких отраслей современного машиностроения и приборостроения привели к дальнейшему усложнению разрабатываемых и эксплуатируемых технических устройств, технологических процессов, аппаратов и систем био- и химических технологий. Их экспериментальная отработка стала требовать все больших затрат времени и материальных ресурсов, а в ряде случаев ее проведение в полном объеме превратилось в проблему, не имеющую приемлемого решения.

Существенно увеличилось значение расчетно-теоретического анализа характеристик таких устройств, технологий и систем. Этому способствовал и прорыв в совершенствовании вычислительной техники и численных методов, приведший к появлению современных ЭВМ с феноменальными объемом памяти и скоростью выполнения арифметических операций. В результате возникла материальная база для становления и быстрого развития компьютерного моделирования (математического моделирования и вычислительного эксперимента) не только в качестве расчетно-теоретического сопровождения на стадии отработки технических устройств, технологических процессов, аппаратов и систем био- и химических технологий, но и при их проектировании, подборе и оптимизации их эксплуатационных режимов, анализе надежности и прогнозировании отказов и аварийных ситуаций, а также при оценке возможностей форсирования характеристик и модернизации технических устройств, технологических процессов, аппаратов и систем био- и химических технологий.

Собственно компьютерное моделирование представляет собой процесс конструирования модели реального химико-технологического объекта (системы) и постановки вычислительных экспериментов на этой модели с целью либо понять (исследовать) поведение этой системы, либо оценить эффективность различных стратегий (алгоритмов) ее функционирования с помощью реализуемых на компьютерах вычислительно-логических алгоритмов. Таким образом, процесс компьютерного моделирования включает и конструирование модели, и ее применение для решения поставленной задачи: анализа, исследования, оптимизации или синтеза (проектирования) химико-технологических процессов, аппаратов и систем.

В настоящее время компьютерное моделирование стало составной частью общих подходов, характерных для современных информационных технологий. Принципиально важно то, что компьютерное моделирование позволило объединить формальное и неформальное мышление и естественным образом сочетать способность ЭВМ во много раз быстрее, точнее и лучше человека делать формальные арифметические операции, отслеживать логические цепочки с удивительными свойствами человеческого интеллекта – интуицией, способностью к ассоциациям и т.д. [50]. Не менее важно и то, что современные средства интерфейса дают возможность вести с ЭВМ диалог – анализировать альтернативы, проверять гипотезы, экспериментировать с математическими моделями.

Практическая реализация возможностей компьютерного моделирования существенно повышает эффективность инженерных разработок особенно при создании принципиально новых, не имеющих прототипов технологических машин и приборов, материалов и технологий, что позволяет сократить затраты времени и средств на использование в технике и технологиях передовых достижений физики, химии, ме-

ханики и других фундаментальных наук. Отмеченные возможности компьютерного моделирования еще далеко не исчерпаны, представляются достаточно перспективными и поэтому заслуживают детального рассмотрения.

Изучая сложные химико-технологические процессы, аппараты и физико-химические явления, мы не можем учесть все факторы: какие-то оказываются существенными, а какими-то можно пренебречь. При этом выдвигается система допущений (гипотез), которая тщательно обосновывается и позволяет выявить и учесть при математическом описании наиболее характерные черты исследуемого объекта. В результате формируется математическая модель исследуемого химико-технологического объекта.

В процессе компьютерного моделирования исследователь имеет дело с тремя объектами: системой (реальной, проектируемой, воображаемой), математической моделью и программой ЭВМ, реализующей алгоритм решения уравнений модели. Традиционная схема компьютерного моделирования, как единого процесса построения и исследования модели, имеющего соответствующую программную поддержку, может быть представлена как на рис. 46.

Исходя из того, что компьютерное моделирование применяется для исследования, оптимизации и проектирования реальных химико-технологических объектов (систем), можно выделить следующие этапы этого процесса:

- 1) определение объекта – установление границ, ограничений и измерителей эффективности функционирования объекта;
- 2) формализацию объекта (построение модели) – переход от реального объекта к некоторой логической схеме (абстрагирование);
- 3) подготовку данных – отбор данных, необходимых для построения модели, и представление их в соответствующей форме;
- 4) разработку моделирующего алгоритма и программы ЭВМ;
- 5) оценку адекватности – повышение до приемлемого уровня степени уверенности, с которой можно судить относительно корректности выводов о реальном объекте, полученных на основании обращения к модели;
- 6) стратегическое планирование – планирование вычислительного эксперимента, который должен дать необходимую информацию;
- 7) тактическое планирование – определение способа проведения каждой серии испытаний, предусмотренных планом эксперимента;
- 8) экспериментирование – процесс осуществления имитации с целью получения желаемых данных и анализа чувствительности;
- 9) интерпретацию – построение выводов по данным, полученным путем имитации;
- 10) реализацию – практическое использование модели и результатов моделирования.

Перечисленные этапы компьютерного моделирования определены в предположении, что сформулированная задача может быть решена наилучшим образом именно этим методом. Однако это может быть не самый эффективный метод. В том случае, если задача может быть сведена к простой линейной модели и решена *аналитически*, нет никакой нужды в компьютерном моделировании. Следует изыскивать все возможные средства, подходящие для решения данной конкретной задачи, стремясь при этом к оптимальному сочетанию стоимости и желаемых результатов. Поэтому, прежде чем приступать к оценке возможностей компьютерного моделирования, следует самому убедиться, что простая аналитическая модель для данного случая не пригодна.

Сейчас математическое моделирование вступает в третий принципиально важный этап своего развития, встраиваясь в структуру так называемого *информационного общества*. Впечатляющий прогресс средств переработки, передачи и хранения информации отвечает мировым тенденциям к усложнению и взаимному проникновению различных сфер человеческой деятельности. Без владения информационными ресурсами нельзя и думать о решении все более укрупняющихся и все более разнообразных проблем, стоящих перед мировым сообществом. Однако информация как таковая зачастую мало что дает для анализа и прогноза, для принятия решений и контроля за их исполнением. Нужны надежные способы переработки информационного "сырья" в готовый "продукт", т.е. в точное знание. История методологии математического моделирования убеждает: она может и должна быть *интеллектуальным ядром* информационных технологий, всего процесса информатизации общества.

4.6.1. СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящее время для решения практических задач анализа, оптимизации и синтеза химико-технологических процессов и производств применяют современные системы компьютерной математики (*MatLab*, *ChemCad* и др.).

Одним из наиболее мощных и универсальных пакетов прикладных программ, обеспечивающих решение широкого спектра задач по расчету и оптимизации химико-технологических процессов и производств [51] является система *MatLab* (сокращение от *Matrix Laboratory*) фирмы *MathWorks, Inc/* (США, штат Массачусетс, г. Нейтик). *MatLab* является интерактивной системой для выполнения инженерных и научных расчетов, которая ориентирована на работу с массивами данных. Спектр задач, исследование которых может быть осуществлено при помощи *MatLab*, охватывает: матричный анализ, задачи матема-

тической физики, статистики, одно- и многомерной интерполяции, нечеткой логики, обработки и визуализации данных, аппроксимации с помощью нейронных сетей и др.

Система *MatLab* – это одновременно и операционная среда, и язык программирования. По способу трансляции *MatLab* является интерпретатором, что позволяет упростить процесс отладки программы. Преимуществом *MatLab* по сравнению с другими пакетами является открытость кода, что дает возможность опытным пользователям разбираться в запрограммированных алгоритмах и, при необходимости, изменять их. В *MatLab* реализованы современные численные алгоритмы решения задач линейной алгебры, дифференциальных уравнений и систем, интерполяции и аппроксимации, вычисления определенных интегралов и др. Символические вычисления в *MatLab* основаны на библиотеке, являющейся ядром пакета *Maple*. Решение уравнений и систем, интегрирование и дифференцирование, вычисление пределов, разложение в ряд и суммирование рядов, поиск решения дифференциальных уравнений и систем – вот далеко не полный перечень возможностей *MatLab* для проведения аналитических выкладок и расчетов.

MatLab обладает хорошо развитыми возможностями визуализации двух- и трехмерных данных. Редактор графиков помогает оформить результат надлежащим образом.

Программный интерфейс приложения *API* реализует связь среды *MatLab* с программами, написанными на языках *C* или *Fortran*. Библиотеки программного интерфейса позволяют вызывать имеющиеся модули *C* или *Fortran* из среды или программы *MatLab*, а также обращаться к функциям *MatLab* из программ на *C* или *Fortran*, осуществлять обмен данными между приложениями *MatLab* и другими программами, создавать приложения типа клиент – сервер.

Программным продуктом, предоставляющим инструментальные средства моделирования ХТП и оборудования, является *ChemCAD*. Программный комплекс *ChemCAD*, разработанный американской фирмой "Хемстайшенс", предназначен для решения широкого круга задач, связанных с анализом, оптимизацией и синтезом химико-технологических процессов и оборудования, а также проведением технологических расчетов химических производств. Программное обеспечение комплекса позволяет:

- использовать для расчетов ХТП физико-химические свойства веществ (в базе данных содержится около 2000 химических веществ) и рассчитать термодинамические параметры смесей веществ по 36 имеющимся методикам;
- осуществлять построение (конструирование) на экране дисплея принципиальной технологической схемы химического производства с использованием имеющихся в комплексе типовых модулей ХТП (включает порядка 40 пиктограмм технологических аппаратов);
- производить постадийный автоматизированный расчет материальных и тепловых балансов производства;
- выполнять технологические расчеты оборудования химических производств;
- осуществлять компьютерное моделирование и анализ статических и динамических режимов технологической схемы производства;
- включать собственные методики расчета и оптимизации ХТП и оборудования.

Пакет прикладных программ *ChemCAD* представляет собой достаточно развитые инструментальные средства компьютерного моделирования для решения задач исследования, расчета и проектирования химико-технологических процессов, аппаратов и производств.

В *ChemCAD* имеется графический реактор, позволяющий компоновать технологическую схему химического производства из имеющихся пиктограмм технологических аппаратов и вспомогательного оборудования. Построение технологической схемы при этом сводится к размещению изображений технологического оборудования производства в нужном порядке на экране и соединению их потоками. У каждого аппарата имеется множество пиктограмм, однако для решения практических задач их может оказаться недостаточно. Поэтому в *ChemCAD* предусмотрены возможности модификации пиктограмм.

После завершения компоновки аппаратов технологической схемы их необходимо соединить материальными потоками. Каждый аппарат имеет позиции входа и выхода, которые устанавливаются при создании пиктограмм. Пиктограмма ориентирует потоки по отношению к этим позициям.

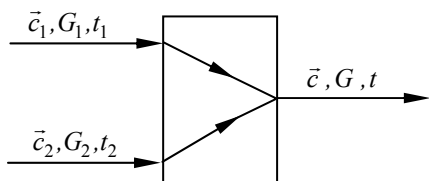
Следующим этапом является задание параметров потоков питания и разрываемых потоков для схем с обратными связями (рециклами). *ChemCAD* содержит разнообразные методы (~ 50) расчета констант фазового равновесия и теплофизических характеристик веществ. По аналогии с назначением параметров потоков задаются конструктивные параметры технологического оборудования.

В ChemCAD широко представлены модули для осуществления проектного и поверочного расчетов кожухотрубчатых теплообменников, колонных аппаратов (тарельчатых и насадочных колонн ректификации и абсорбции нефтяных смесей, хемосорбции и др.), химических реакторов (идеального вытеснения (RFR) и смешения (CSTR)), аппаратов высокого давления, трубопроводов, нормально сужающих устройств (диафрагм) и регулирующих клапанов.

В ChemCAD имеются также средства для исследования и оптимизации статических и динамических режимов функционирования как отдельных химико-технологических аппаратов, так и всей химико-технологической схемы; чувствительности выходных переменных этих аппаратов по отношению к входным переменным и возмущающим воздействиям.

4.6.2. ПРИМЕРЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТЕЙШИХ ТИПОВЫХ ПРОЦЕССОВ БИО- И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1. **Модель процесса смешения потоков** (рис. 47). Пусть в смеситель поступают два потока веществ, характеризующихся расходом G_j , вектором концентраций веществ $c_{j,i}$ и температурой t_j .



Исходные данные:
концентрации $c_{j,i}$ веществ во входных потоках, расходы G_1 и G_2 и температуры t_1 и t_2 входных потоков.

Требуется построить математическую модель, позволяющую по исходным данным рас-

Рис. 47. Структурная схема смесителя потоков

считывать концентрации c_i веществ и температуру t потока на выходе из смесителя.

Примем следующие допущения: 1) внутри аппарата реализуется режим идеального смешения и отсутствуют источники (стоки) вещества и теплоты; 2) удельные теплоемкости компонентов j -го потока в зависимости от температуры t_j рассчитываются по формуле

$$c_{pj,i} = a_i + b_i t_j + d_i t_j^2 + e_i t_j^3,$$

где a_i, b_i, d_i, e_i – эмпирические коэффициенты, найденные для каждого i -го вещества.

Составим общее уравнение материального баланса при смешении двух потоков веществ в смесителе и уравнения покомпонентного материального баланса:

$$\begin{aligned} G_1 + G_2 - G &= 0; \\ c_{1,i} G_1 + c_{2,i} G_2 - c_i G &= 0, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned}$$

где $c_{1,i}, c_{2,i}, c_i$ – массовые доли i -го вещества в потоках; m – число веществ в потоке.

Из последнего балансового уравнения можно рассчитать концентрации c_i веществ на выходе из смесителя

$$c_i = (c_{1,i} G_1 + c_{2,i} G_2) / G.$$

Далее составим уравнение теплового баланса для смесителя:

$$c_{p1} G_1 t_1 + c_{p2} G_2 t_2 - c_p G t = 0,$$

где c_p – удельная теплоемкость потока рассчитывается по формуле

$$c_{pj} = \sum_{i=1}^m c_{pj,i} c_{j,i}, \quad j=1, 2.$$

Из последнего балансового уравнения можно рассчитать температуру выходного потока

$$t = (c_{p1} G_1 t_1 + c_{p2} G_2 t_2) / (c_p G).$$

Обратим внимание на нелинейность последнего уравнения, поскольку удельная теплоемкость выходного потока нелинейным образом зависит от температуры. Для его решения можно воспользоваться методом простой итерации:

$$t^{(v+1)} = (c_{p1}(t_1) G_1 t_1 + c_{p2}(t_2) G_2 t_2) / (c_p(t^{(v)}) G),$$

где $v = 0, 1, 2, \dots$ – номер итерации.

В качестве условия окончания итерационного процесса (счета) можно использовать следующее условие $|t^{(v+1)} - t^{(v)}| \leq \varepsilon$, а в качестве начального приближения принять $t^{(0)} = (t_1 + t_2) / 2$.

2. **Модель процесса теплообмена, осуществляемого в кожухотрубчатом теплообменнике** (рис. 48). В трубном пространстве одноходового кожухотрубчатого теплообменника охлаждается жидкость от температуры t_n до температуры t_k . Охлаждающая жидкость (хладагент) проходит противотоком по межтрубному пространству с расходом G_x и начальной температурой t_x^H .

Исходные данные: поверхность F теплообмена кожухотрубчатого теплообменника, коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 в трубном и межтрубном пространствах, толщина δ_i , теплопроводность λ_i стенки и слоев загрязнений, $i = \overline{1, n}$; расход G , начальная и конечные

Рис. 48. Структурная схема теплообменника

температуры t_n и t_k , удельные теплоемкости c_p и c_{px} охлаждаемой жидкости и хладагента, расход G_x и начальная температура t_x^H хладагента.

Требуется построить математическую модель, позволяющую рассчитывать температуру хладагента t_x^K на выходе из теплообменника.

Примем следующие допущения: 1) теплопередача не сопровождается изменением агрегатного состояния теплоносителей; 2) движение теплоносителей – противоток; 3) потери теплоты в окружающее пространство не учитываются.

Составим общее уравнение теплового баланса для кожухотрубчатого теплообменника:

$$c_p G (t_n - t_k) - c_{px} G_x (t_x^K - t_x^H) = 0.$$

Из последнего уравнения можно выразить величину t_k :

$$t_k = t_n - \frac{t_x^K - t_x^H}{c_p G / c_{px} G_x}.$$

Запишем теперь уравнение теплового баланса с учетом процесса теплопередачи через стенки труб теплообменника:

$$c_p G (t_H - t_K) - K_T F \frac{(t_H - t_x^K) - (t_K - t_x^H)}{\ln \left[(t_H - t_x^K) / (t_K - t_x^H) \right]} = 0.$$

Если теперь в последнее уравнение подставить t_K , то с учетом обозначений $\chi_1 = c_p G / (c_{px} G_x)$, $\chi_2 = K_T F / (c_p G)$ получим

$$t_x^K = t_x^H + (t_H - t_x^H) \chi_1 \frac{\exp(\chi_2(1 - \chi_1)) - 1}{\exp(\chi_2(1 - \chi_1)) - \chi_1}.$$

Коэффициент теплопередачи K_T рассчитывают по формуле

$$K_T = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_i \delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_2},$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи в трубном и межтрубном пространствах $[\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}]$; δ_i и λ_i – толщина и теплопроводность стенки и слоев загрязнений, $i = \overline{1, n}$; $\lambda \sim [\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}]$.

Значения коэффициентов теплоотдачи зависят от гидродинамической и тепловой обстановки около теплообменной поверхности и в общем случае определяются на основе экспериментальных исследований, обобщаемых в виде корреляционных соотношений между критериями подобия: Нуссельта, Пекле, Прандтля, Рейнольдса, Галилея, Грасгофа [52].

3. **Модель периодического процесса растворения смеси полидисперсных частиц** [53]. Предположим, что начальные значения массы непористых сферических частиц различны, растворение частиц не сопровождается тепловым эффектом, а кинетика растворения отдельной частицы описывается уравнением вида

$$\frac{dm}{dt} = f(m, c_y) = -k_p \chi (c_{yH} - c_y) m^{2/3}; \quad (4.61)$$

$$m(0) = m_0,$$

где m – масса частицы; k_p – эмпирический коэффициент растворения, $k_p = a_1 [\Delta \rho D^2 / \mu]^{1/3}$; a_1 – эмпирическая константа; $\Delta \rho$ – разность плотностей твердого материала и растворителя; D – коэффициент диффузии; μ – коэффициент динамической вязкости; c_{yH}, c_y – концентрация насыщения и фактическая концентрация основной массы раствора; χ – коэффициент формы частицы (для шарообразной частицы $\chi = \sqrt[3]{36\pi/\rho^2}$).

Исходные данные: плотность распределения $P(m_0)$ массы m_0 частиц в начальный момент времени, общая начальная масса M_0 частиц, загруженных в аппарат, объем V_y растворителя в аппарате, концентрация c_y раствора в начальный момент времени, константа k_p растворения и концентрация c_{yH} насыщения.

Требуется построить математическую модель, позволяющую по исходным данным рассчитывать зависимости концентраций $c_y(t)$ раствора и общей массы $M(t)$ нерастворившихся частиц от времени.

Запишем уравнение кинетики состояния среды, которое при сделанных выше допущениях сводится к уравнению материального баланса

$$V_y \frac{dc_y}{dt} = - \int_{(m_0)} \hat{P}_0(m_0) f[m(m_0, t), c_y] dm_0 =$$

$$= k_p \chi (c_{yH} - c_y) \int_{m_0}^{\infty} \hat{P}_0(m_0) \left\{ m_0^{1/3} - \frac{1}{3} k_p \chi \int_0^t [c_{yH} - c_y(t_1)] dt_1 \right\}^2 dm_0; \quad (4.62)$$

$$c_y(0) = c_y^0,$$

где $\hat{P}_0(m_0)$ – ненормированная плотность распределения массы m_0 частиц в начальный момент времени, $\hat{P}_0(m_0) = N_0 P_0(m_0)$, N_0 – число частиц, поступивших в аппарат, $N_0 = M_0 / \int_{(m_0)} m_0 P_0(m_0) dm_0$.

При решении этого уравнения необходимо учитывать, что масса m частицы может быть отрицательной, что эквивалентно условию

$$m_0^{1/3} \geq \frac{1}{3} k_p \chi \int_0^t [c_{yH} - c_y(t_1)] dt_1.$$

Поскольку масса вещества в растворе увеличивается только за счет уменьшения массы частиц при их растворении, то общая масса частиц, находящихся в аппарате в момент времени t , рассчитывается по формуле

$$M(t) = M_0 - V_y [c_y(t) - c_y(0)]. \quad (4.63)$$

Приведенная модель (4.61) – (4.63) периодического процесса растворения относится к классу динамических нелинейных моделей с сосредоточенными координатами. Для определения зависимости $c_y(t)$ необходимо вначале одним из численных способов, например, методом Рунге-Кутты четвертого порядка, решить нелинейное дифференциальное уравнение (4.62). При этом на каждом шаге интегрирования системы также численным способом, например, методом Симпсона, вычисляются значения определенных интегралов. После этого по соотношению (4.63) можно рассчитать $M(t)$.

4. Модель непрерывного процесса растворения монодисперсных частиц [3]. Предположим, что на вход аппарата подаются частицы одинаковой массы m_0 , их растворение не сопровождается тепловым эффектом, а кинетика растворения частиц описывается уравнением (4.61).

Исходные данные: G_x^{BX} , G_y , m_0 , c_y^{BX} – соответственно расходы твердой фазы и растворителя, масса отдельной частицы, концентрация раствора на входе в аппарат; k_p – константа растворения; c_{yH} – концентрация насыщения и V_y – объем растворителя, находящегося в аппарате.

Требуется построить математическую модель, позволяющую по исходным данным рассчитывать концентрацию c_y раствора, плотность распределения массы $P(m)$ и общую массу G_x^{BIX} частиц, выгружаемых из аппарата в единицу времени.

Запишем уравнение материального баланса, описывающее состояние среды:

$$G_y (c_y - c_y^{BX}) = \int_0^{m_0} \hat{P}[\alpha(m)] dm, \quad (4.64)$$

где $\hat{P}(\alpha)$ – ненормированная плотность распределения возраста α частиц в аппарате. Для режима идеального смешения имеем

$$\hat{P}(\alpha) = n_0 \exp(-\alpha / \Theta), \quad (4.65)$$

где $\Theta = V_y / G_y$ – среднее время пребывания частиц в аппарате, $n_0 = G_x^{BX} / m_0$ – число частиц, поступающих в аппарат в единицу времени.

Массовый расход частиц, покидающих аппарат, можно определить из соотношения

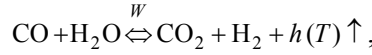
$$G_x^{BIX} = G_x^{BX} + G_y (c_y^{BX} - c_y). \quad (4.66)$$

Плотность распределения массы частиц на выходе из аппарата удовлетворяет при $0 < m < m_0$ соотношению

$$P(m) = \frac{P[\alpha(m)]}{f(m, c_y)} = \left[\Theta k_p \chi (c_{yH} - c_H) m^{2/3} \right]^{-1} \times \exp \left[-\frac{3(m_0^{1/3} - m^{1/3})}{\Theta k_p \chi (c_{yH} - c_y)} \right].$$

Приведенная модель (4.61), (4.64) – (4.66) относится к классу статических нелинейных моделей с сосредоточенными координатами.

5. **Модель химического процесса конверсии оксида углерода.** В каталитическом трубчатом реакторе (рис. 49) осуществляется экзотермическая обратимая химическая реакция



где $h(T)$ – тепловой эффект реакции.

Скорость химической реакции W описывается выражением вида

$$W = k(T) \frac{c_{\text{CO}} c_{\text{H}_2\text{O}} - k_p^{-1}(T) c_{\text{H}_2} c_{\text{CO}_2}}{A(T) c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{CO}_2}},$$

где $c_{\text{CO}}, c_{\text{H}_2\text{O}}, c_{\text{H}_2}, c_{\text{CO}_2}, c_{\text{и.г}}$ – концентрации оксида углерода, воды, водорода, двуокиси углерода и инертных газов, соответственно; $k(T), A(T), k_p^{-1}(T)$ – кинетические параметры, зависящие от температуры T :

$$k_p^{-1}(T) = \exp \left[2,3 \left(\frac{2240}{T} + 0,62 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 2,62 \right) \right];$$

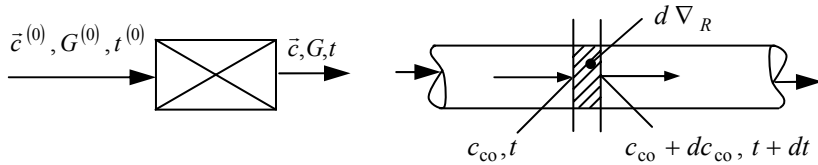


Рис. 49. Структурная схема химического реактора и элемента каталитического трубчатого реактора

для железохромового катализатора имеем:

$$\begin{aligned} \lg k &= -34\,000 / (4,57T) + 10,2, \\ \lg A &= -8800 / (4,57T) + 3/32; \end{aligned}$$

для цинкохроммедного катализатора:

$$\begin{aligned} \lg k &= -34\,000 / (4,57T) + 12,98, \\ \lg A &= -8800 / (4,57T) + 3,48. \end{aligned}$$

Температурные зависимости теплового эффекта реакции $h(T)$ и удельной теплоемкости $c_p(T)$ описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} h(T) &= 10\,000 + 0,219T - 2,845 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 0,967 \cdot 10^{-6} \cdot T^3; \\ c_p(T) &= \sum_{i=1}^m (a_i + b_i T + d_i T^2 + e_i T^3). \end{aligned}$$

Исходные данные: концентрации $c_{\text{CO}}^{(0)}, c_{\text{H}_2\text{O}}^{(0)}, c_{\text{H}_2}^{(0)}, c_{\text{CO}_2}^{(0)}, c_{\text{и.г}}^{(0)}$ оксида углерода, воды, водорода, двуокиси углерода и инертных газов на входе в реактор; плотность ρ_i и концентрация (объемные доли) c_i i -го компонента; массовый расход G потока веществ; температура $T^{(0)}$ потока на входе в реактор; тепловой эффект реакции h , удельная теплоемкость c_p потока веществ в реакторе, кинетические параметры $k(T), A(T), k_p^{-1}(T)$.

Требуется построить модель химического процесса, осуществляемого в каталитическом реакторе конверсии оксида углерода (рис. 49), позволяющую рассчитывать температуру и концентрации веществ в каждой точке и на выходе реактора.

Примем следующие допущения: 1) химический процесс осуществляется в адиабатическом трубчатом каталитическом реакторе; 2) режим движения газовой смеси в слое катализатора соответствует режиму идеального вытеснения.

Выберем в качестве ключевого компонента оксид углерода CO и составим по этому компоненту уравнение материального баланса:

$$c_{\text{CO}} \frac{G}{\rho_{\text{г.с}}} - (c_{\text{CO}} + dc_{\text{CO}}) \frac{G}{\rho_{\text{г.с}}} - W(c_{\text{CO}}, T) dV_p = 0,$$

где $\rho_{\text{г.с}} = \sum_{i=1}^m \rho_i c_i$ – плотность парогазовой смеси; ρ_i – плотность i -го компонента; c_i – концентрация (объемные доли) i -го компонента; $G/\rho_{\text{г.с}}$ – объемный расход потока; V_p – объем реактора.

Учитывая, что $d\tau = \frac{dV_p}{(G/\rho_{\text{г.с}}) \cdot 3600}$ – условное время контакта в слое объемом dV_p и выполнив предельный переход, получим

$$\frac{dc_{\text{CO}}}{d\tau} = k(T) \left[\frac{c_{\text{CO}} c_{\text{H}_2\text{O}} - k_p^{-1} c_{\text{H}_2} c_{\text{CO}_2}}{A(T) c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{CO}_2}} \right],$$

$$c_{\text{CO}}(0) = c_{\text{CO}}^{(0)}.$$

Далее составим уравнение теплового баланса

$$c_V \frac{G}{\rho_{\text{г.с}}} T + W(c_{\text{CO}}, T) h(T) dV_p - c_V \frac{G}{\rho_{\text{г.с}}} (T + dT) = 0$$

и, осуществляя предельный переход, получим

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{h(T)}{c_V W(c_{\text{CO}}, T)} = \frac{h(T)}{c_V k(T) \left[\frac{c_{\text{CO}} c_{\text{H}_2\text{O}} - k_p^{-1} c_{\text{H}_2} c_{\text{CO}_2}}{A(T) \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{CO}_2}} \right]},$$

$$T(0) = T^{(0)}.$$

Концентрации водяного пара, водорода, двуокиси углерода и инертных газов рассчитываются из уравнений материального баланса концентраций веществ по известной концентрации ключевого компонента:

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = c_{\text{H}_2\text{O}}^{(0)} - (c_{\text{CO}}^{(0)} - c_{\text{CO}}) = c_{\text{H}_2\text{O}}^{(0)} - \Delta c_{\text{CO}};$$

$$c_{\text{H}_2} = c_{\text{H}_2}^{(0)} - \Delta c_{\text{CO}};$$

$$c_{\text{CO}_2} = c_{\text{CO}_2}^{(0)} + \Delta c_{\text{CO}};$$

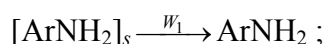
$$c_{\text{и.г}} = 1 - (c_{\text{CO}} + c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{H}_2} + c_{\text{CO}_2}).$$

Таким образом, математическая модель химического процесса конверсии оксида углерода представляет собой статическую модель с распределенными по длине реактора концентрациями веществ \bar{c} и температурой T и выражается системой нелинейных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных с начальными условиями, решение которой можно получить, например, методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

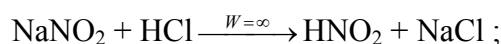
6. **Математическая модель непрерывного процесса diazotирования ароматических аминов в производстве азопигментов.** Перечень наиболее вероятных реакций, протекающих при diazotировании ароматических аминов нитритом натрия, и уравнения кинетики процесса diazotирования приведены ниже.

Diazotирование (реакция экзотермическая)

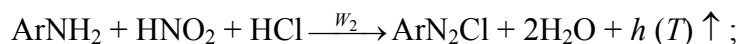
растворение твердой фазы амина в среде соляной кислоты



образование diazотирующего агента (HNO_2)



целевая реакция diazotирования



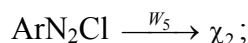
разложение азотистой кислоты



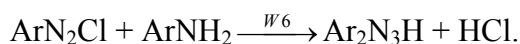
образование diazosмол



разложение diazosоединения с образованием diazosмол



образование diaзоаминосоединений



5. Уравнения кинетики и кинетические константы процесса diazotирования

| Кинетическое уравнение | Порядок реакции | Предэкспоненциальный множитель, $(\text{м}^3)^{n-1}/\text{моль}^{n-1}/\text{с}$ | Энергия активации, Дж/моль $\cdot 10^{-3}$ |
|---|-----------------|---|--|
| $W_2 = k_2(T) \cdot [\text{ArNH}_2] \cdot [\text{HNO}_2]$ | 2 | $3,75 \cdot 10^5$ | 46,82 |
| $W_3 = k_3(T) \cdot [\text{HNO}_2]^4 / P_{\text{NO}}^2$ | 4 | $7,17 \cdot 10^{21} / (9,81 \cdot 1)$ | 119,65 |

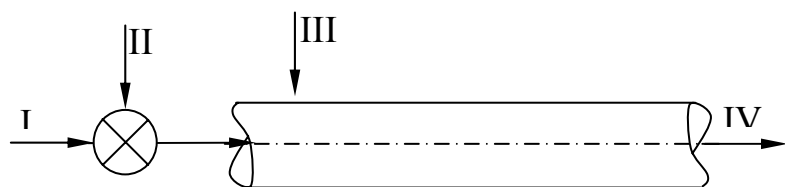
| | | $\sigma^4)^2$ | |
|---|---|----------------------|-------|
| $W_4 = k_4(T) \cdot [\text{ArN}_2\text{Cl}] \cdot [\text{HNO}_2]$ | 2 | $0,32 \cdot 10^5$ | 63,69 |
| $W_5 = k_5(T) \cdot [\text{ArN}_2\text{Cl}]$ | 1 | $1,10 \cdot 10^{10}$ | 87,15 |

Обозначения: A – ArNH_2 (амин); AK – HNO_2 ; CK – HCl ; σ – NO ; D – ArN_2Cl (диазосоединение); $\chi = (\chi_1, \chi_2)$; P_{NO} – парциальное давление нитрозных газов; r – радиус частицы амина; l – текущая координата длины реактора; c_A^* – равновесная концентрация амина; ρ_A, M_A – плотность и молекулярная масса амина; $\hat{\psi}(r, l)$ – ненормированная плотность распределения числа N частиц амина по размеру, т.е. $\hat{\psi} = dN/dr$; G_l, G_s, G_N – расходы жидкой и твердой фаз суспензии амина и нитрита натрия; $S_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубы реактора; c_p – теплоемкость; ϑ – скорость потока; K – коэффициент теплопередачи; h – тепловой эффект реакции; индексы: (0) – вход в реактор; x – хладагент; (i) – точка распределенного по длине ввода реагентов в реактор.

На рис. 50 представлены трубчатые турбулентные аппараты, позволяющие осуществлять процессы тонкого органического синтеза с твердой фазой в высокотурбулентных потоках.

Схема материальных потоков в трубчатом реакторе приведена на рис. 51.

При составлении уравнений математической модели примем следующие допущения: 1) реакция диазотирования протекает в растворе и диазоаминсоединение в процессе диазотирования не образуется, т.е. $W_6 = 0$; 2) гидродинамические режимы течения реакционной смеси и хладагента близки к режиму идеального вытеснения; 3) реактор является объектом с распределенными только по длине l координатами, скорость потока $\vartheta(l) = \text{const}$; 4) потери тепла в окружающую среду пренебрежимо малы; 5) теплофизические характеристики принимаются постоянными в рабочем диапазоне температур; 6) форма кристаллов амина близка к сферической.



a)

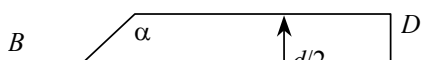


Рис. 50. Малогабаритные турбулентные трубчатые реакторы:
a – цилиндрического типа; *b* – диффузор-конфузорного типа;
в – комбинированного типа;
 d_L – диаметр диффузора, d – диаметр конфузора; *I, II, III, IV* – потоки веществ

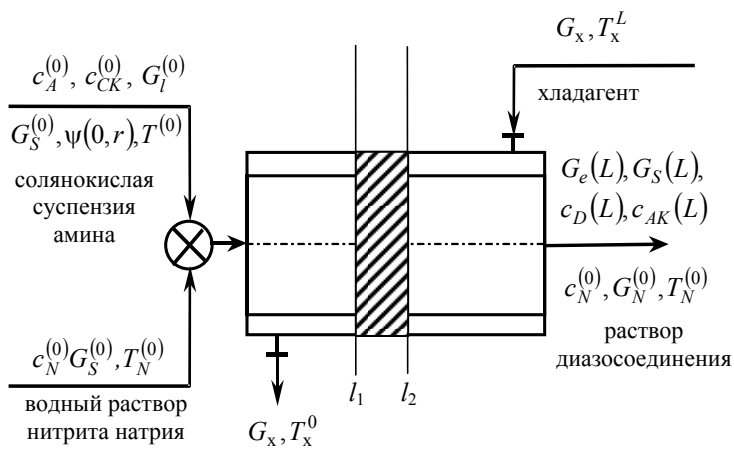


Рис. 51. Схема материальных потоков в трубчатом реакторе диазотирования:
 $\psi(r)$ – гранулометрический состав; x – хладагент; l – жидкая фаза;
 S – твердая фаза; σ, χ – нитрозные газы и диазосмолы, соответственно

С учетом принятых обозначений и допущений составим уравнения материального покомпонентного баланса на участке трубы (l_1, l_2) за промежутки времени (t_1, t_2) например, по растворенному амину:

$$G_l \int_{t_1}^{t_2} [c_A(l_2) - c_A(l_1)] dt + S \int_{t_1}^{t_2} \int_{l_1}^{l_2} \left[W_2(c_A, c_{AK}, T) - \frac{1}{M_A} \int_0^\infty \hat{\Psi}(\xi, r) W_1(c_A, T) dr \right] d\xi dt = S \int_{l_1}^{l_2} [C(\xi, t_2) - C(\xi, t_1)] d\xi.$$

Пользуясь теоремой о среднем, получим равенство

$$G_l [c_A(l_2) - c_A(l_1)] \Big|_{t=t_3} \Delta t + S \left[W_2(c_A, c_{AK}, T) - \frac{1}{M_A} \int_0^\infty \hat{\Psi}(\xi, r) W_1(c_A, T) dr \right] \Big|_{\substack{\xi=l_4 \\ t=t_4}} \Delta l \Delta t = S [c(\xi, t_2) - c(\xi, t_1)] \Big|_{\xi=l_3} \Delta l,$$

которое при помощи теоремы о конечных приращениях можно преобразовать к виду

$$G_l \frac{\partial c_A(l, t)}{\partial l} \Big|_{\substack{l=l_5 \\ t=t_3}} \Delta t \Delta l + S \left[W_2(c_A, c_{AK}, T) - \frac{1}{M_A} \int_0^\infty \hat{\Psi}(\xi, r) W_1(c_A, T) dr \right] \Big|_{\substack{\xi=l_4 \\ t=t_4}} \Delta l \Delta t = S \frac{\partial c(l, t)}{\partial t} \Big|_{\substack{l=l_3 \\ t=t_5}} \Delta l \Delta t.$$

Переходя к пределу при $l_1, l_2 \rightarrow l$ и $t_1, t_2 \rightarrow t$, получим уравнение

$$G \frac{\partial c_A}{\partial l} + W_2(c_A, c_{AK}, T) - \frac{1}{M_A} \int_0^\infty \hat{\Psi}(l, r) W_1(c_A, T) dr = \frac{\partial c}{\partial t}; \quad (4.67)$$

$$c_A(l, 0) = c_{A0}(l); \quad c_A(0, t) = c_A^{(0)}(t).$$

Аналогичным образом можно получить уравнения динамики трубчатого реактора и для других компонентов реакционной смеси:

- по азотистой кислоте (AK):

$$G \frac{\partial c_{AK}}{\partial l} + W_2(c_A, c_{AK}, T) + W_3(c_{AK}, T) + W_4(c_{AK}, c_D, T) = \frac{\partial c_{AK}}{\partial t}; \quad (4.68)$$

$$c_{AK}(l, 0) = c_{AK0}(l); \quad c_{AK}(0, t) = c_N^{(0)} G_N^{(0)}(t) / G_l^{(0)}(t);$$

- по диазосоединению (D):

$$G \frac{\partial c_D}{\partial l} - W_2(c_A, c_{AK}, T) + W_4(c_{AK}, c_D, T) + W_5(c_D, T) = \frac{\partial c_D}{\partial t}; \quad (4.69)$$

$$c_D(l, 0) = c_{D0}(l); \quad c_D(0, t) = c_D^{(0)}(t);$$

- по продуктам разложения (σ, χ) :

$$9 \frac{\partial c_{\sigma}}{\partial l} - W_3(c_{AK}, T) = \frac{\partial c_{\sigma}}{\partial t}; \quad c_{\sigma}(l, 0) = c_{\sigma}^0(l); \quad c_{\sigma}(0, t) = c_{\sigma}^0(t); \quad (4.70)$$

$$9 \frac{\partial c_{\chi}}{\partial l} - W_4(c_{AK}, c_D, T) - W_5(c_D, T) = \frac{\partial c_{\chi}}{\partial t}; \quad (4.71)$$

$$c_{\chi}(l, 0) = c_{\chi 0}(l); \quad c_{\chi}(0, t) = c_{\chi}^{(0)}(t);$$

Составим теперь уравнение динамики для фракции частиц амина, характеризующихся размером от r до $r + dr$ на участке трубы (l_1, l_2) за время (t_1, t_2) :

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} [N(l_2, t) \psi(l_2, t, r) dr - N(l_1, t) \psi(l_1, t, r) dr] dt + \\ & + \frac{1}{9} \int_{t_1}^{t_2} \int_{l_1}^{l_2} N(\xi, t) [\psi(\xi, t, r) W_1^{(r)}(\xi, t, r) - \psi(\xi, t, r + dr) W_1^{(r)}(\xi, t, r + dr)] = \\ & = \frac{1}{9} \int_{l_1}^{l_2} [N(\xi, t_2) \psi(\xi, t_2, r) dr - N(\xi, t_1) \psi(\xi, t_1, r) dr] d\xi, \end{aligned}$$

которое с использованием приведенной выше техники можно преобразовать к уравнению вида:

$$9 \frac{\partial \psi(l, t, r)}{\partial l} - \frac{\partial}{\partial r} \left[\hat{\psi}(l, t, r) W_1^{(r)}(l, t, r) \right] = \frac{\partial \psi(l, t, r)}{\partial t}, \quad (4.72)$$

$$\hat{\psi}(0, t, r) = \hat{\psi}^{(0)}(t, r); \quad \hat{\psi}(l, 0, r) = \hat{\psi}_0(l, r).$$

Получим теперь уравнения динамики теплообмена в трубчатом реакторе:

- по реакционной смеси:

$$\begin{aligned} c_p \rho \int_{t_1}^{t_2} [T(l_2, t) - T(l_1, t)] dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_{l_1}^{l_2} [-hS W_2(\xi, t) + K_1 \pi D [T(\xi, t) - T_x(\xi, t)]] d\xi dt = \\ \text{по хладагенту (х):} \\ = c_p \rho S \int_{l_1}^{l_2} [T(\xi, t_2) - T(\xi, t_1)] d\xi; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_p^x \rho_x G_x \int_{t_1}^{t_2} [T_x(l_2, t) - T_x(l_1, t)] dt - \int_{t_1}^{t_2} \int_{l_1}^{l_2} [K_1 \pi D [T(\xi, t) - T_x(\xi, t)]] d\xi dt = \\ = c_p^x \rho_x S_p \int_{l_1}^{l_2} [T(\xi, t_2) - T_x(\xi, t_1)] d\xi. \end{aligned}$$

Проводя рассуждения аналогичные предыдущим, получим уравнения динамики теплообмена в процессе диазотирования в трубчатом реакторе:

$$c_p \rho G_l \frac{\partial T(l, t)}{\partial l} - hS W_2(l, t) + K_1 \pi D [T(l, t) - T_x(l, t)] = c_p \rho S \frac{\partial T(l, t)}{\partial t}; \quad (4.73)$$

$$T(l, 0) = T_0(l); \quad T(0, t) = T^{(0)}(t);$$

$$c_p^x \rho_x G_x \frac{\partial T_x(l, t)}{\partial l} - K_1 \pi D [T(l, t) - T_x(l, t)] = c_p^x \rho_x S_p \frac{\partial T_x(l, t)}{\partial t}; \quad (4.74)$$

$$T_x(l, 0) = T_{x0}(l); \quad T_x(L, t) = T_x^{(0)}(t).$$

Таким образом, уравнения динамики непрерывного процесса диазотирования в трубчатом реакторе представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных первого порядка, для решения которых можно использовать метод характеристик или конечно-разностные методы [54].

Уравнения статики легко получить из выведенной системы уравнений динамики приравниванием нулю производной по времени, т.е.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0.$$

Математическая модель статики процесса диазотирования, осуществляемого в трубчатом реакторе, представляет собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (4.67') – (4.74').

Наибольшую сложность при решении системы дифференциальных уравнений, описывающих статические режимы диазотирования, представляет уравнение, описывающее гранулометрический состав твердой фазы амина в l -м сечении трубчатого реактора

$$\vartheta \frac{\partial \hat{\psi}(l, r)}{\partial l} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\hat{\psi}(l, r) W_1^{(r)}(l, r) \right], \quad (4.75)$$

$$\hat{\psi}(0, r) = \hat{\psi}^{(0)}(r).$$

В случае линейного уравнения кинетики растворения частицы амина

$$\frac{dr}{dt} = -Ar^{-\alpha} \exp(-E_1/RT) (c_A^* - c_A) / \rho_A, \quad (4.76)$$

где A, α – кинетические константы; c_A^*, c_A – равновесная и текущая концентрации амина; ρ_A – плотность амина.

Решение уравнения (4.75) может быть получено методом характеристик в аналитическом виде [54]. Решение уравнения (4.76) запишем в виде

$$r(l) = f(r_0, l) = \left[r_0^{\alpha+1} - (1+\alpha) \frac{\int_0^l A \exp(-E_1/RT) (c_A^* - c_A) d\tilde{l}}{\rho_A \vartheta} \right]^{\frac{1}{1+\alpha}},$$

откуда можно рассчитать начальный радиус r_0 частицы по формуле

$$r_0 = f_1(r, l) = \left[r^{\alpha+1} + (1+\alpha) \frac{\int_0^l A \exp(-E_1/RT) (c_A^* - c_A) d\tilde{l}}{\rho_A \vartheta} \right]^{\frac{1}{1+\alpha}}.$$

В этом случае решение уравнения (4.75) с начальным условием может быть записано в виде

$$\hat{\psi}(r, l) = \hat{\psi}^{(0)}(f_1(r, l)) \exp \left[\int_0^l \frac{\partial W_1^{(r)}}{\partial r} [r(\tilde{l}, f_1(r, \tilde{l}))] d\tilde{l} \right], \quad (4.77)$$

В случае нелинейного уравнения кинетики растворения частицы, например, в виде

$$\frac{dm}{dt} = -\beta^* (c_A^* - c_A) S,$$

где β – эффективный коэффициент массоотдачи; S – поверхность частицы, необходимо использовать численный алгоритм решения уравнения (4.75).

Аппроксимируя дифференциальные уравнения в частных производных (4.75) конечной системой дифференциальных уравнений в обыкновенных производных с использованием конечно-разностной схемы первого порядка, получим

$$\frac{d\hat{\Psi}_i}{dl} = W_1^{(r)}\left(\frac{r_i + r_{i-1}}{2}, c_A, c_{AK}\right) \left[\frac{\hat{\Psi}_i - \hat{\Psi}_{i-1}}{\Delta r_i} \right] - \frac{\partial W_1^{(r)}}{\partial r}(r_i, c_A, c_{AK}) \Psi_i, \quad (4.78)$$

$\hat{\Psi}_1(0) = \hat{\Psi}^{(0)}(r_i, l)$, Δr_i – шаг сетки.

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений (4.78) одновременно с другими уравнениями модели может быть решена каким-либо численным методом. При этом могут возникнуть сложности, поскольку в начальной фазе процесса диазотирования скорость растворения твердой фазы и скорость реакции диазотирования различаются на несколько порядков, т.е. система дифференциальных уравнений математической модели процесса диазотирования является жесткой. В этом случае явные методы Рунге-Кутты исключаются из рассмотрения.

Для решения системы дифференциальных уравнений модели статики процесса диазотирования можно рекомендовать два метода: неявный метод трапеций и метод Дормана-Принса пятого порядка точности с автоматическим выбором шага, которые дают вполне сопоставимые результаты и обеспечивают получение решения с заданной точностью.

Математическая модель динамики процесса диазотирования, осуществляемого в турбулентном трубчатом аппарате, включает нелинейные дифференциальные уравнения с частными производными (4.67) – (4.74), для решения которых целесообразно использовать конечно-разностный метод [55].

Для математического описания процесса диазотирования, осуществляемого в турбулентном трубчатом реакторе комбинированного типа, необходимо к уравнениям (4.67) – (4.74) добавить уравнения, описывающие протекание процесса диазотирования в камере смешения.

В неустановившемся режиме текущий радиус частицы r кроме начального значения r_0 зависит также от возраста частицы τ и текущего времени t . Кинетика растворения частицы описывается квазилинейными дифференциальным уравнением с частными производными первого порядка

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial r}{\partial \tau} = W_1(r, c_{CK}, c_A, T), \quad (4.79)$$

где W_1 – скорость растворения частицы; c_{CK}, c_A – концентрации соляной кислоты и амина, соответственно; T – температура.

Начальные условия определим следующим образом:

$$t_0 = 0, \quad \tau = \tau_0, \quad r(\tau_0) = r_0(\tau_0). \quad (4.80)$$

Решение уравнения (4.79) при заданных начальных условиях (4.80) имеет вид

$$\frac{r^{(\alpha+1)}(\tau, t)}{\alpha+1} = \frac{r_0^{\alpha+1}(\tau_0)}{\alpha+1} - A \int_0^t \exp(-E_1 / RT(\tilde{t})) (c_A^*(c_{CK}, T) - c_A(\tilde{t})) d\tilde{t};$$

где

$$W_1(r, c_{CK}, c_A, T) = -A \int_0^t \exp(-E_1 / RT(\tilde{t})) (c_A^*(c_{CK}(\tilde{t}), T(\tilde{t})) - c_A(\tilde{t})) d\tilde{t}.$$

Учитывая, что $\tau - \tau_0 = t - t_0$, получим $\tau_0 = \tau - t + t_0$ и

$$\frac{r^{(\alpha+1)}(\tau, t)}{\alpha+1} = \frac{r_0^{\alpha+1}(\tau - t)}{\alpha+1} - A \int_0^t \exp(-E_1 / RT(\tilde{t})) (c_A^*(c_{CK}(\tilde{t}), T(\tilde{t})) - c_A(\tilde{t})) d\tilde{t}.$$

Плотность распределения массы частиц в каждый момент времени описывается дифференциальными уравнениями, получаемыми из материального баланса для фракции частиц

$$\frac{\partial \hat{\Psi}(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial \left[\hat{\Psi} W_1 \right]}{\partial r} + n^{(0)} \hat{\Psi}^{(0)}(r, t) - \hat{\Psi}(r, t) / \theta(t), \quad (4.81)$$

где $\theta(t)$ – среднее время пребывания частиц в модуле-реакторе.

Решением уравнения (4.81) при начальных условиях (4.80) будет

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}(r, t) = & \exp \left[F(0, t, r, c_{CK}, c_A, T) \left\{ \Psi_0 \left[\varphi(0, t, r, c_{CK}, c_A, T) \right] \right\} \right] + \\ & \int_0^t \hat{G}_s^{(0)} \left[\varphi(\tilde{t}, t, r, c_{CK}, c_A, T), \tilde{t} \right] \exp \left[F(0, \tilde{t}, r, c_{CK}, c_A, T), c_{CK}, T \right] d\tilde{t}, \end{aligned} \quad (4.82)$$

где

$$F(0, t, r, c_{CK}, c_A, T) = \int_0^t \left\{ W_{1r} \left[\varphi(\tilde{t}, t, r, c_{CK}, c_A, T), c_{CK}, c_A, T \right] + 1 / \theta(\tilde{t}) \right\} d\tilde{t},$$

$$W_{1r} = dW_1 / dr = \alpha A r^{-(\alpha+1)} \exp(-E_1 / RT) (c_A^*(c_{CK}, T) - C_A).$$

Подставляя зависимости (4.82) в уравнения покомпонентного материального и теплового балансов, получим:

$$\begin{aligned} \dot{c}_A = & \int_0^{r_{\max}} \hat{\Psi}(r, t) W_1(r, c_{CK}, c_A, T) dr / V + c_A^{(0)} G_I^{(0)} / V - \\ & - W_2(c_A, c_{AK}, T) - c_A G_I; \end{aligned} \quad (4.83)$$

$$c_A(0) = c_{A0};$$

$$\begin{aligned} \dot{c}_{AK} = & c_{AK}^{(0)} G_I^{(0)} / V + c_N^{(0)} G_N^{(0)} / V - (W_2(c_A, c_{AK}, T) + \\ & + W_3(c_{AK}, T) + W_4(c_A, c_D, T) - c_{AK} G_I / V); \end{aligned} \quad (4.84)$$

$$c_{AK}(0) = c_{AK0};$$

$$\dot{c}_{CK} = c_{CK}^{(0)} G_I^{(0)} / V - c_N^{(0)} G_N^{(0)} / V - W_2(c_A, c_{AK}, T) - c_{CK} G_I / V; \quad (4.85)$$

$$c_{CK}(0) = c_{CK0};$$

$$\dot{c}_D = c_D^{(0)} G_I^{(0)} / V + (W_2(c_A, c_{AK}, T) - W_4(c_{AK}, c_D, T) - W_5(c_D, T)) - c_D G_I / V; \quad (4.86)$$

$$c_D(0) = c_{D0};$$

$$\dot{c}_\chi = c_\chi^{(0)} G_I^{(0)} / V + W_4(c_{AK}, c_D, T) + W_5(c_D, T) - c_\chi G_I / V; \quad (4.87)$$

$$c_\chi(0) = c_{\chi0};$$

$$\begin{aligned} \dot{T} = & G_l^{(0)} T^{(0)} / V + c_v^N G_N^{(0)} T_N^{(0)} / c_v V - G_l T / V + \\ & + \frac{W_2(c_A, c_{AK}, T) h_2}{c_v V} + \frac{W_3(c_{AK}, T) h_3}{c_v V} - KF(T - T_x) / c_v V; \end{aligned} \quad (4.88)$$

$$T(0) = T_0;$$

$$\dot{T}_x = G_x^{(0)} T_x^{(0)} / V_p - G_x T_x / V_p + KF(T - T_x) / c_v^x V_p; \quad (4.89)$$

$$T_x(0) = T_{x0};$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений (4.82) – (4.89) представляет собой математическую модель динамики процесса диазотирования, осуществляемого в камере смешения.

7. Модель процесса бинарной ректификации [56, 57]. Ректификацией называется процесс переноса компонента (компонентов) между кипящей жидкой и насыщенной конденсирующейся паровой фазами при противотоке этих фаз. Ректификацию можно трактовать как совмещение процессов многократной дистилляции и многократной парциальной конденсации при противоточном контактировании потоков пара и жидкости. Дистилляция представляет собой частичное испарение (при температуре кипения) жидкой смеси. Пар при этом в соответствии с первым законом Коновалова обогащается низкокипящим компонентом (или азеотропом с минимумом температуры кипения), а жидкий остаток – высококипящим компонентом (или азеотропом с максимумом температуры кипения). В этом и состоит эффект разделения.

Для определенности будем рассматривать тарельчатую ректификационную колонну, содержащую n тарелок, в которой происходит разделение бинарной смеси (рис. 52). Исходное питание в количестве G_p состава x_p подается на f -ю тарелку. Сверху колонны отбирается дистиллят в количестве G_D состава x_D , а снизу колонны – кубовый продукт в количестве G_w состава x_w .

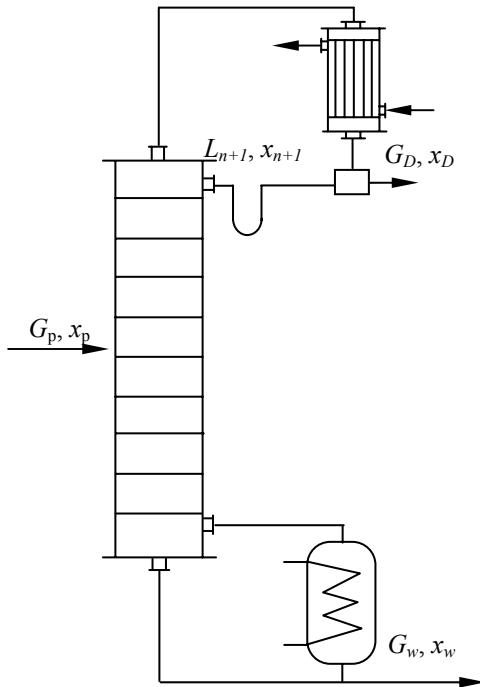


Рис. 52. Схематическое изображение ректификационной установки

Математическая модель может быть построена для ряда конструкций контактных устройств (тарелок) в зависимости от принятых допущений. Для характеристики интенсивности массообмена на контактном устройстве вводится понятие эффективности тарелки, которое определяется следующим образом:

$$\eta_j = \frac{(y_j - y_{j-1})}{(y_j^* - y_{j-1})},$$

где y_{j-1}, y_j – составы паровой фазы, поступающей на тарелку и покидающей ее, соответственно; y_j^* – концентрация в паре, равновесная с жидкостью, находящейся на j -й тарелке.

Исходные данные: известна зависимость равновесного состава пара от состава жидкости для заданного давления в колонне: $y_j^* = y_j(x_j)$; количество питания G_p , его состав x_p , величина отбора дистиллята G_D и скорость пара v в колонне, определяемая количеством тепла, подводимым к кубу.

Требуется построить математическую модель, позволяющую по исходным данным рассчитывать составы жидкости x_j и пара y_j на всех n тарелках колонны, составы получаемых продуктов, т.е. дистиллята x_D и кубового остатка x_w (рис. 53), для заданных условий разделения.

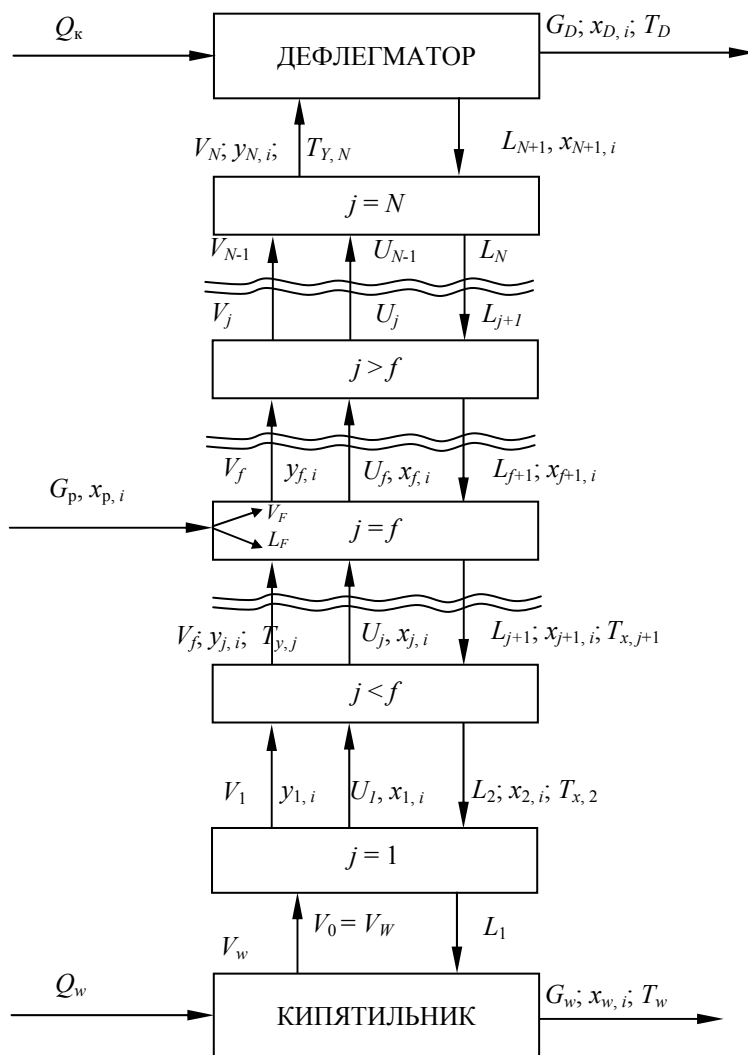


Рис. 53. Структурная схема ректификационной установки

При построении математического описания примем следующие основные допущения:

- 1) давление на контактном устройстве постоянно;
- 2) жидкость находится при температуре кипения, пар – при температуре точки росы;
- 3) разделяемые смеси близки к идеальным;
- 4) физико-химические свойства компонентов постоянны на данном контактном устройстве и усреднены в возможном диапазоне изменения концентраций;
- 5) жидкость на тарелках колонны, а также в кубе и флегмовой емкости идеально перемешана;
- 6) движение потока пара при его контакте с жидкостью на тарелках может быть описана гидродинамической моделью идеального вытеснения;
- 7) массопередача по фазам независимая, диффузионные сопротивления аддитивны;
- 8) интенсивность массообмена между жидкостью и паром на тарелке характеризуется объемным коэффициентом массопередачи K_y , значение которого постоянно для всех точек массообменного пространства тарелки;
- 9) куб колонны работает как парциальный испаритель;
- 10) в конденсаторе колонны происходит полная конденсация и дистиллят отбирается в жидкой фазе;
- 11) пар равномерно распределяется по всему массообменному пространству тарелки;
- 12) теплоты смешения потоков жидкости пренебрежимо малы;
- 13) режим работы контактного устройства – адиабатический.

Для стационарного режима система уравнений математического описания тарелки имеет вид:

$$L_j = \begin{cases} V_{j-1} + U_{j-1} + G_W, & j < f; \\ V_{j-1} + U_{j-1} - L_{n+1}, & j > f; \end{cases} \quad (4.90)$$

$$x_j = \begin{cases} (V_{j-1} y_{j-1} + U_{j-1} x_{j-1} + G_W x_0) / L_j, & j < f; \\ (V_{j-1} y_{j-1} + U_{j-1} x_{j-1} - L_{n+1} x_{n+1}) / L_j, & j > f, \end{cases}$$

где V – расход пара; U – унос жидкости; L – расход жидкости; f – номер тарелки питания; L_{n+1} – расход флегмы.

Уравнение для расчета состава пара, уходящего с тарелок имеет вид:

$$y_j = y_{j-1} + (y_j^* - y_{j-1}) \eta_j; \quad j \neq f;$$

$$\eta_j = 1 - \exp(-K_{yj} / V_{j-1}); \quad K_{yj} = S_j \frac{1}{1/\beta_{yj} + m_j/\beta_{xj}};$$

$$m_j = \left(\frac{\partial y^*}{\partial x} \right)_{x=x_j}; \quad y_j^* = y_j(x_j); \quad (4.91)$$

$$\beta_{yj} = \beta_{yj}(V_{j-1}, L_j, x_j, y_{j-1});$$

$$\beta_{xj} = \beta_{xj}(V_{j-1}, L_j, x_j, y_{j-1}), \quad j = 1, \dots, n, \quad j \neq f;$$

$$U_j = U_j(V_j),$$

где K_y – коэффициент массопередачи; β_x – коэффициент массоотдачи по жидкой фазе; β_y – коэффициент массоотдачи по газовой фазе; η – эффективность контактного устройства; S – эффективная площадь тарелки.

Уравнения теплового баланса на тарелках колонны

$$V_j = (V_{j-1}(H_{j-1} - h_j) + U_{j-1}(h_{j-1} - 2h_j + h_{j+1}) + G_W(h_{j+1} - h_j)) / (H_j - h_{j+1}), \quad j < f;$$

$$V_j (H_j - h_{j+1}) = V_{j-1} (H_{j-1} - h_j) + U_{j-1} (h_{j-1} - 2h_j + h_{j+1}) - L_{n+1} (h_{j+1} - h_j) + V_F (H_F - h_j) \quad \text{при } j > f;$$

$$H_j = H_j(T_{x_j}, T_{y_j}, r_j); \quad h_j = h_j(T_{x_j}, T_{y_j}); \quad T_{x_j} = T_x(x_j);$$

$$T_{y_j} = T_y(y_j); \quad r_j = r(x_j); \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq f,$$

где h, H – энтальпии жидкости и пара.

Величина уноса U в (4.91) зависит от конструктивных особенностей контактного устройства, физико-химических свойств компонентов и может быть определена по уравнениям, приведенным, например, в [58.]

Приведенная выше модель контактного устройства может быть использована для тарелки питания только при учете специфики энергетического состояния питания, подаваемого в колонну. Для данного случая уравнения модели тарелки питания имеют следующий вид:

$$V_f = \frac{V_{f-1}(H_{f-1} - h_f) - U_{f-1}(h_{f-1} - 2h_f + h_{f+1}) +}{H_f - h_{f+1}} +$$

$$+ \frac{G_W(h_{f+1} - h_f) + L_F(h_f - H_{f-1})}{H_f - h_{f-1}} + V_f;$$

$$y_f = \left[(y_{f-1} + (y^* - y_{f-1})\eta_f)(V_f - V_F) + G_p(1-q)y_F \right] / V_f;$$

$$y_F = \left[\alpha_1 - (\alpha_1 - 4\alpha_2\alpha_3)^{0,5} \right] / (2\alpha_2);$$

$$\alpha_1 = (\alpha - 1)(x_p - q) + \alpha; \quad \alpha_2 = (\alpha - 1)(1 - q); \quad \alpha_3 = \alpha x_p;$$

$$V_F = (1 - q)G_p; \quad x_F = [x_p - (1 - q)y_F] / q;$$

$$x_f = (V_{f-1}y_{f-1} + U_{f-1}x_{f-1} + G_W x_0); \quad L_f = V_{f-1} + U_{f-1} + G_W.$$

(4.92)

В простейшем случае уравнение, описывающее систему дефлегматор-конденсатор емкость, может быть представлено в виде

$$x_D = y_n + (y_D^* - y_n)\eta_D, \quad (4.93)$$

где η_D – эффективность дефлегматора, $0 \leq \eta_D \leq 1$.

Возможны частные случаи:

- 1) $\eta_D = 0$, что обычно справедливо для полного конденсатора, в этом случае $x_D = y_n$;
- 2) $\eta_D = 1$, что справедливо для парциального конденсатора, тогда $x_D = y_D^*$.

В простейшем случае уравнение, описывающее куб колонны, может быть представлено в виде

$$y_0 = x_0 + (y^*(x_0) - x_0)\eta_0, \quad (4.94)$$

где η_0 – эффективность кипятильника, $0 \leq \eta_0 \leq 1$.

Частные случаи:

- 1) $\eta_0 = 0$, что обычно справедливо для полного испарителя, т.е. $y_0 = x_0$;
- 2) $\eta_0 = 1$, что справедливо для парциального испарителя, тогда $y_0 = y^*(x_0)$.

Для построения математической модели всей установки необходимо описание отдельных частей установки дополнить уравнениями связи. В качестве таких уравнений обычно используют общие уравнения материального и теплового балансов для всей установки. Специальный выбор вида уравнений, описывающих контактные устройства в рекуррентной форме, позволяет отказаться от записи уравнений связи между контактными устройствами, поэтому приводим только общие уравнения:

$$G_f = G_W + G_D; \quad G_p x_p = G_W x_0 + G_D x_D;$$

$$x_D = x_{n+1}; \quad L_{n+1} = V_n - G_D;$$

$$L_F h(x_f) + V_F H(y_f) + Q_W = G_D h(x_D) + G_W h(x_0) + Q_k + Q_{пот},$$

(4.95)

где Q_w, Q_k – расходы тепла в кипятильнике и конденсаторе, соответственно; $Q_{пот}$ – потери тепла.

Приведенная система уравнений при сделанных выше предположениях полностью описывает стационарный режим работы колонны и может быть использована для решения различных задач компьютерного моделирования. Блок-схема расчета уравнений модели процесса ректификации (4.90) – (4.95) для $i < f$ представлена на рис. 54.

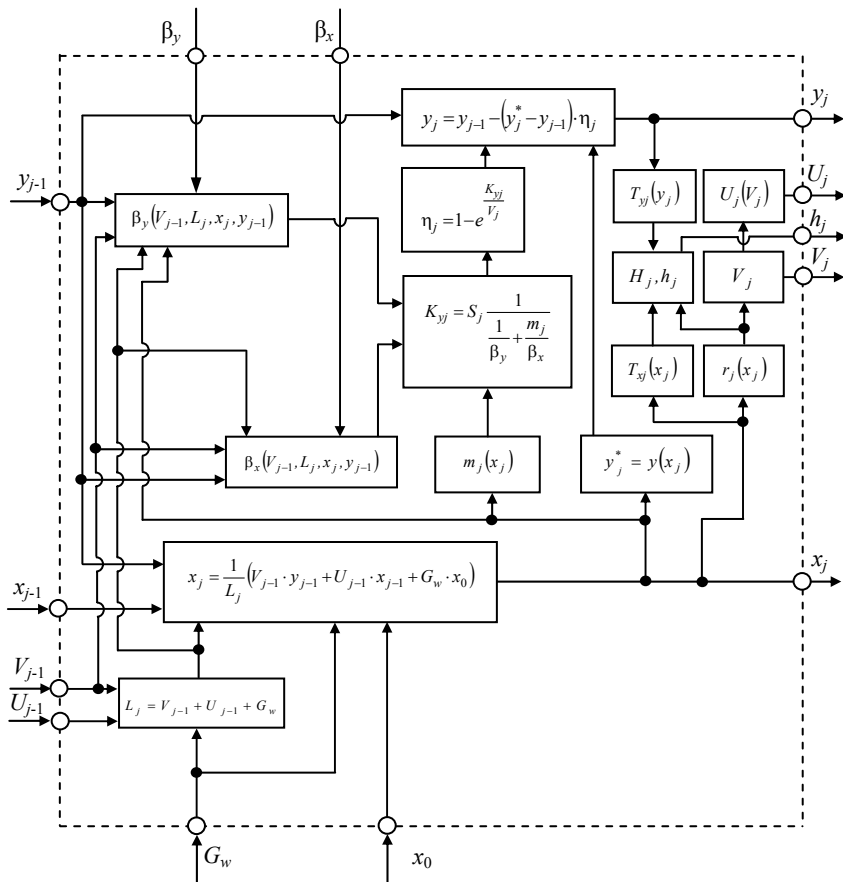


Рис. 54. Блок схема решения уравнений модели процесса ректификации (4.90) – (4.95) для $i < f$

Моделирующий алгоритм в данном случае должен в принципе обеспечивать возможность решения представленной системы алгебраических уравнений математического описания при любых значениях задаваемых параметров. Наиболее просто эта система может быть решена с использованием итерационного метода расчета "от тарелки к тарелке". Задается состав кубового остатка x_0 и далее по блок-схеме (см. рис. 54) рассчитывается состав жидкости x_1 на первой тарелке колонны, состав пара, уходящего с тарелки, и состав жидкости на вышележащей тарелке. Эта расчетная процедура повторяется для всех тарелок колонны, включая и тарелку питания (4.92), в результате чего находится состав дистиллята по формуле (4.93) или $x_D = x_{n+1}$, $L_{n+1} = V_n - G_D$ по формулам (4.95). Затем проверяется выполнение уравнения общего материального баланса колонны (4.95) для заданного состава кубового остатка и полученного расчетным путем состава дистиллята. Если баланс не выполняется с заданной точностью, расчет повторяется с измененным соответствующим образом составом кубового остатка, начиная с первого этапа, до тех пор пока общий материальный баланс колонны не будет сведен с заданной точностью.

Заметим, что каждая итерация сопровождается расчетом по всем тарелкам колонны. Разумеется, что эффективность предложенного алгоритма существенно зависит от того, насколько эффективен способ уточнения кубового остатка.

8. *Модель процесса сушки дисперсных материалов в неподвижном слое* [59]. Анализ процесса сушки дисперсных материалов в неподвижном слое является основным элементом моделирования тепло- и массообмена в сушилках с перекрестным движением материала и сушильного агента.

Для описания кинетики сушки отдельной частицы принимается уравнение, соответствующее периоду постоянной скорости сушки при условии, что вся теплота, конвективно подводимая к поверхности влажной частицы, затрачивается на испарение влаги:

$$-\frac{du}{d\tau} = \alpha F (t - t_m) / (V \rho_T r_c), \quad (4.96)$$

где F , V , ρ_T и u – площадь поверхности, объем, плотность и влагосодержание частицы; t – температура сушильного агента; α – коэффициент теплоотдачи от сушильного агента к поверхности влажной частицы;

r_c – теплота испарения; t_m – температура мокрого термометра.

Интегрирование уравнения (4.96) для сферической частицы диаметром d при начальном условии $u|_{\tau=0} = u_0$ дает текущее значение влагосодержания частицы с учетом возможного изменения температуры сушильного агента t у ее поверхности:

$$u = u_0 - \frac{6\alpha}{r_c \rho_T d} \int_0^{\tau} (t - t_m) d\tau. \quad (4.97)$$

Распределение температуры сушильного агента по высоте слоя материала (для определенности здесь полагается, что сушильный агент фильтруется через слой снизу вверх) определяется из уравнения теплового баланса для элементарного слоя dh в предположении режима полного вытеснения при фильтрационном движении сушильного агента через слой:

$$-cG dt = \alpha (t - t_m) [6(1 - \varepsilon) / d] dh, \quad (4.98)$$

где $6(1 - \varepsilon) / d$ – поверхность монодисперсных сферических частиц, приходящихся на единицу высоты слоя.

Интегрирование уравнения (4.98) дает экспоненциальный профиль температуры сушильного агента по высоте h слоя порозностью ε :

$$t = t_m + (t_0 - t_m) \exp(-Bh). \quad (4.99)$$

В этих уравнениях $B = 6\alpha(1 - \varepsilon) / (cGd)$, c , G и t_0 – теплоемкость, расход и температура поступающего в слой сушильного агента.

С учетом стационарного распределения температуры (4.99) по формуле (4.97) получим значение влагосодержания материала на высоте слоя h :

$$u = u_0 - [6\alpha / (r_c \rho_T d)] (t_0 - t_m) \exp(-Bh) \tau. \quad (4.100)$$

Величина среднего влагосодержания всего слоя материала высотой H находится интегрированием распределения (4.100) по высоте в пределах $0 \leq h \leq H$:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u dh = u_0 - \frac{cG(t_0 - t_m)}{r_c \rho_T (1 - \varepsilon) H} (1 - e^{-BH}) \tau. \quad (4.101)$$

Уравнения (4.100) и (4.101) описывают процесс сушки до момента времени τ^* , когда нижний слой частиц достигает равновесного влагосодержания u^* . Значение τ^* находится из распределения (4.100) при $h = 0$ и $u = u^*$:

$$\tau_* = (u_0 - u_*) / [6\alpha (r_c \rho_T d)^{-1} (t_0 - t_M)]. \quad (4.102)$$

Текущее положение координаты фронта равновесного влагосодержания оказывается линейной функцией времени сушки:

$$h_* = (\tau - \tau_*) / (B\tau_* - L), \quad (4.103)$$

где $L = (1 - \varepsilon) \rho_T (c_T + c_B u_*) / (cG)$.

Тогда профиль влагосодержания в пределах верхней влажной зоны описывается выражением

$$u(h, t) = u_0 - (u_0 - u_*) \exp[-B(h - h_*)]. \quad (4.104)$$

Среднее по высоте слоя влагосодержание материала находится интегрированием выражения для постоянного u_* в диапазоне $0 \leq h \leq h_*$ и распределения (4.104) в пределах от h_* до H :

$$\begin{aligned} \bar{u}(\tau) &= \frac{1}{H} \left\{ \int_0^{h_*} u_* dh + \int_{h_*}^H [u_0 - (u_0 - u_*) e^{-B(h-h_*)}] dh \right\} = \\ &= u_0 - (u_0 - u_*) \left[\frac{h_*}{H} + \frac{1}{BH} (1 - e^{-B(H-h_*)}) \right]. \end{aligned} \quad (4.105)$$

Приведенная модель процесса сушки дисперсных материалов в неподвижном слое (4.96) – (4.105) относится к классу динамических моделей с распределенными координатами.

9. Математическая модель биосинтеза. Микробиологический синтез (биосинтез) – это процесс, который протекает с участием микроорганизмов и сопровождается образованием биомассы. Целевым продуктом биосинтеза является либо сама биомасса, либо различные вещества, продуцируемые микроорганизмами в процессе их жизнедеятельности. Основные стадии процесса биосинтеза – рост микроорганизмов и накопление биомассы – происходит в ферментаторах, работающих чаще всего периодически. В них загружают питательную среду и засевную дозу микроорганизмов. Образовавшуюся культуральную жидкость интенсивно перемешивают. Однако, несмотря на перемешивание, культуральная жидкость не является однородной. Во-первых, клетки микроорганизмов могут объединяться, образуя агломераты; во-вторых, неоднородной является сама питательная среда: в ней могут содержаться диспергированные капли плохо растворимых углеводов и пузырьки газа. Кроме того, неодинаковыми могут быть и размеры клеток.

При моделировании периодического процесса биосинтеза при неоднородной биомассе предположим, что лимитирующий субстрат находится в питательной среде в растворенном виде, а биомасса, загружаемая в аппарат, представляет собой совокупность отдельных агломератов различной массы. Кинетика роста агломерата описывается уравнением:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{k_1 c_y}{k_2 + c_y} S = \frac{k_1 c_y}{k_2 + c_y} \chi m^{2/3}, \quad (4.106)$$

а скорость потребления субстрата агломератом клеток массы m равна

$$f_1[S(m), c_y] = \frac{k_3 c_y S}{k_2 + c_y} = \frac{k_3 c_y \chi m^{2/3}}{k_2 + c_y}, \quad (4.107)$$

где k_1, k_2, k_3 – кинетические константы; c_y – концентрация субстрата в питательной среде.

Исходные данные: ненормированная плотность распределения массы $\hat{P}(m_0)$ агломератов клеток в момент $t = 0$; объем среды V_y (предполагается, что в ходе процесса он не изменяется); начальная концентрация субстрата $c_y(0)$, константы k_1, k_2, k_3 ; коэффициент формы частиц χ .

Требуется построить модель и рассчитать зависимости, описывающие изменение во времени концентрации $c_y(t)$ субстрата и общей массы $M(t)$ микроорганизмов.

Аналитическое решение уравнения (4.106) при начальных условиях $m(0) = m_0$ имеет вид

$$m(t) = \left[m_0^{1/3} + \frac{1}{3} \chi k_1 \int_0^t \frac{c_y(t_1)}{k_2 + c_y(t_1)} dt_1 \right]^3.$$

При сделанных предположениях скорость потребления субстрата агломератом клеток начальной массой m_0 равна

$$F_1(m_0, c_y) = f_1[m(m_0, t), c_y] = \frac{k_3 c_y \chi}{k_2 + c_y} \left[m_0^{1/3} + \frac{1}{3} \chi k_1 \int_0^t \frac{c_y(t_1)}{k_2 + c_y(t_1)} dt_1 \right]^2.$$

Кинетика состояния среды описывается в этом случае уравнением материального баланса по лимитирующему субстрату

$$\begin{aligned} V_y \frac{dc_y}{dt} &= \int_{(m_0)} \hat{P}_0(m_0) F_1(m_0, c_y) dm_0 = \\ &= - \frac{k_3 c_y \chi}{k_2 + c_y} \int_{(m_0)} \hat{P}_0(m_0) \left[m_0^{1/3} + \frac{1}{3} \chi k_1 \int_0^t \frac{c_y(t_1)}{k_2 + c_y(t_1)} dt_1 \right]^2 dm_0. \end{aligned} \quad (4.108)$$

Изменение общей массы микроорганизмов можно найти с учетом того, что при сделанных допущениях рост массы клеток пропорционален уменьшению массы субстрата $V_y \frac{dc_y}{dt} = - \frac{k_3}{k_1} \frac{dM(t)}{dt}$, откуда

$$M(t) = M_0 - (k_3 / k_1) V_y [c_y(t) - c_y(0)]. \quad (4.109)$$

Уравнения (4.106) – (4.109) представляют собой математическое описание процесса биосинтеза для рассматриваемого случая. Расчет по модели сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения (4.108), которое может быть получено численно, например, методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Численные значения интегралов находят, например, по формулам прямоугольников или Симпсона.

Приведенная модель процесса биосинтеза (4.106) – (4.109) относится к классу динамических нелинейных моделей с сосредоточенными координатами.

4.7. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

Техническое обеспечение САПР включает в себя различные технические средства, используемых для выполнения автоматизированного проектирования, а именно: ЭВМ, периферийные устройства, сетевое оборудование, а также оборудование некоторых вспомогательных систем (например, измерительных), поддерживающих проектирование.

Используемые в САПР 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 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, ими могут быть большие ЭВМ, отдельные периферийные или измерительные устройства. Именно в АРМ должны быть средства 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*.

Структура технического обеспечения САПР для крупной организации представлена на рис. 55 [60]. Здесь показана типичная структура крупных корпоративных сетей САПР, называемая *клиент-сервер*. В сетях *клиент-сервер* выделяется один или несколько узлов, называемых *серверами*, которые выполняют в сети управляющие или общие для многих пользователей проектные функции, а остальные узлы (рабочие места) являются терминальными, их называют *клиентами*, в них работают пользователи. В общем случае *сервером* называют совокупность программных средств, ориентированных на выполнение определенных функций, но если эти средства сосредоточены на конкретном узле вычислительной сети, то понятие *сервер* относится именно к узлу сети.

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 сервера* для взаимосвязи сетей и подсетей, *специализированные серверы* для выполнения определенных телекоммуникационных услуг, например, серверы электронной почты.

4.7.1. АППАРАТУРА РАБОЧИХ МЕСТ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В качестве средств обработки данных в современных САПР широко используют рабочие станции, серверы, персональные компьютеры. Большие ЭВМ и в том числе суперЭВМ обычно не применяют, так как они дороги и их отношение производительность–цена существенно ниже подобного показателя серверов и многих рабочих станций.

На базе рабочих станций или персональных компьютеров создают АРМ. Типичный состав устройств АРМ: 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.

Память ЭВМ обычно имеет иерархическую структуру. Поскольку в памяти большого объема трудно добиться высокой скорости записи и считывания данных, память делят на сверхбыстродействующую кэш-память малой емкости, основную оперативную память умеренного объема и сравнительно медленную память большой емкости, причем, в свою очередь, кэш-память часто разделяют на уровни. Например, в персональных компьютерах на процессорах *Pentium III* кэш первого уровня имеет по 16 Кбайт для данных и для адресов. Он и кэш второго уровня емкостью 256 Кбайт встроены в процессорный кристалл, емкость оперативной памяти составляет десятки-сотни Мбайт.

Для связи наиболее быстродействующих устройств (процессора, оперативной и кэш-памяти, видео-

карты) используется системная шина пропускной способностью от одного – двух Гбайт/с. Кроме системной шины на материнской плате компьютера имеется шина расширения для подключения сетевого контроллера и быстрых внешних устройств и шина медленных внешних устройств, таких как клавиатура, мышь, принтер и т.п.

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 для машиностроения 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.

Типичные характеристики рабочих станций: несколько процессоров, десятки-сотни мегабайт оперативной и тысячи мегабайт внешней памяти, наличие кэш-памяти, системная шина со скоростями от сотен Мбайт/с до 1-2 Гбайт/с.

В зависимости от назначения существуют АРМ конструктора, АРМ технолога, АРМ руководителя проекта и т.п. Они могут различаться составом периферийных устройств, характеристиками ЭВМ.

В АРМ конструктора (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 различимых 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 видеосуилителя находится в пределах 110...150 МГц и поэтому частота кадровой развертки обычно снижается с 135Гц 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 300...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 (A3, A4), 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 принцип действия головки термический или пьезоэлектрический. 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 A1 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.

4.8. СИСТЕМНЫЕ СРЕДЫ И ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ САПР

В программном обеспечении САПР принято выделять общесистемное ПО, системные среды и прикладное ПО.

К общесистемному ПО относят операционные системы (ОС) используемых ЭВМ и вычислительных систем и сетевое ПО типовых телекоммуникационных услуг. Различают ОС со встроенными сетевыми функциями и оболочки над локальными ОС. Основными функциями сетевой ОС являются: управление каталогами и файлами; управление ресурсами; коммуникационные функции; защита от несанкционированного доступа; обеспечение отказоустойчивости; управление сетью.

Управление каталогами и файлами является одной из первоочередных функций сетевой ОС, обслуживаемых специальной сетевой файловой подсистемой. Пользователь получает от этой подсистемы возможность обращаться к файлам, физически расположенным на сервере или в другой станции данных, применяя привычные для локальной работы языковые средства.

Управление ресурсами включает в себя функции запроса и предоставления ресурсов.

Коммуникационные функции обеспечивают адресацию, буферизацию и маршрутизацию сообщений.

Защита от несанкционированного доступа возможна на любом из следующих уровней: ограничение доступа в определенное время, и (или) для определенных станций, и (или) заданное число раз; ограничение совокупности доступных конкретному пользователю директорий; ограничение для конкретного пользователя списка возможных действий (например, только чтение файлов); пометка файлов символами "только чтение", "скрытность при просмотре списка файлов".

Отказоустойчивость определяется наличием у серверов автономных источников питания, отображением и дублированием информации в дисковых накопителях. Отображение заключается в хранении двух копий данных на двух дисках, подключенных к одному контроллеру, а дублирование означает подключение каждого из этих двух дисков к разным контроллерам. Сетевая ОС, реализующая дублирование дисков, обеспечивает более высокий уровень отказоустойчивости.

В настоящее время выбор среди ОС происходит преимущественно между тремя основными операционными системами – *UNIX, Windows NT, Novell Netware*.

4.8.1. СИСТЕМНЫЕ СРЕДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

САПР относятся к числу наиболее сложных и наукоемких автоматизированных систем. Наряду с выполнением собственно проектных процедур необходимо автоматизировать также управление проектированием, поскольку сам процесс проектирования становится все более сложным и зачастую приобретает распределенный характер. На крупных и средних предприятиях заметна тенденция к интеграции САПР с системами управления предприятием и документооборота.

В типичной структуре ПО системных современных САПР можно выделить следующие подсистемы.

Ядро отвечает за взаимодействие компонентов системной среды, доступ к ресурсам ОС и сети, возможность работы в гетерогенной среде, настройку на конкретную САПР (конфигурирование) с помощью специальных языков расширения.

Подсистема управления проектом выполняет функции слежения за состоянием проекта, координации и синхронизации параллельно выполняемых процедур разными исполнителями.

Подсистема управления методологией проектирования представлена в виде базы знаний. В этой базе содержатся такие сведения о предметной области, как информационная модель (например, в виде диаграмм "сущность – соотношение"), иерархическая структура проектируемых объектов (например, в виде И-ИЛИ – дерева), описания типовых проектных процедур, типовые фрагменты маршрутов проектирования – так называемые потоки процедур, соответствие между процедурами и имеющимися пакетами прикладных программ, ограничение на их применение и т.п. Часто такую БЗ дополняют обучающей подсистемой, используемой для подготовки специалистов к использованию САПР.

Современные *системы управления проектными данными* называют *PDM*. Они предназначены для информационного обеспечения проектирования и выполняют следующие функции: хранение проектных данных и доступ к ним, в том числе ведение распределенных архивов документов, их поиск, редактирование, маршрутизация и визуализация; управление конфигурацией изделия, т.е. ведение версий проекта, управление внесением изменений; создание спецификаций; защита информации; интеграция данных (поддержка типовых форматов, конвертирование данных).

Основной компонент *PDM* – *банк данных*. Он состоит из системы управления базами данных и баз данных. Межпрограммный интерфейс в значительной мере реализуется через информационный обмен с помощью банка данных. *PDM* отличает легкость доступа к иерархически организованным данным, обслуживание запросов, выдача ответов не только в текстовой, но и в графической форме, привязанной к конструкции изделия. Поскольку взаимодействие внутри группы проектировщиков в основном осуществляется путем обмена данными, то в системе *PDM* часто совмещают функции управления данными и параллельным проектированием.

Подсистема интеграции ПО предназначена для организации взаимодействия программ в маршрутах проектирования. Она состоит из ядра, отвечающего за интерфейс на уровне подсистем, и оболочек процедур, согласующих конкретные программные модули, программы и (или) программно-методические комплексы (ПМК) со средой проектирования.

Интеграция ПО базируется на идеях объектно-ориентированного программирования. Следует различать синтаксический и семантический аспекты интеграции. Синтаксическая интеграция реализуется с помощью унифицированных языков и форматов данных, технологий для доступа к общему банку данных или компонентно-ориентированных технологий. Семантическая интеграция подразумевает автоматическое распознавание разными системами смысла передаваемых между ними данных и достигается значительно труднее.

Подсистема пользовательского интерфейса включает в себя текстовый и графический редакторы и поддерживается системами многооконного интерфейса типа *X Window System* или *Open Look*.

Подсистема CASE предназначена для адаптации САПР к нуждам конкретных пользователей, разработки и сопровождения прикладного ПО. *CASE*-система, как система проектирования ПО, содержит компоненты для разработки структурных схем алгоритмов и "экранов" для взаимодействия с пользователем в интерактивных процедурах.

Например, САПР Спрут (российская фирма *Sprut Technologies*) вообще создана как инструментальная среда для разработки пользователем потоков задач конструкторского и технологического проектирования в машиностроении с последующим возможным оформлением потоков в виде пользовательских версий САПР. Сконструированный поток поддерживается компонентами системы, в число которых

входят графические 2D и 3D подсистемы, СУБД, производственная экспертная система, документатор, технологический процессор создания программ для станков с ЧПУ.

В большинстве автоматизированных информационных систем применяют СУБД, поддерживающие реляционные модели данных. Среди общих требований к СУБД можно отметить: 1) обеспечение целостности данных (их полноты и достоверности); 2) защита данных от несанкционированного доступа и о искажений из-за сбоев аппаратуры; 3) удобство пользовательского интерфейса; 4) в большинстве случаев важна возможность распределенной обработки в сетях ЭВМ.

Первые два требования обеспечиваются ограничением прав доступа, запрещением одновременного использования одних и тех же обрабатываемых данных (при возможности их модификации), введением контрольных точек для защиты от сбоев и т.п.

Банк данных в САПР является важной обслуживающей подсистемой, он выполняет функции информационного обеспечения и имеет ряд особенностей. В нем хранятся как редко изменяемые данные (архивы, справочные данные, типовые проектные решения), так и сведения о текущем состоянии различных версий выполняемых проектов.

Отличительные особенности СУБД третьего поколения: расширенный набор возможных типов данных (это абстрактные типы, массивы, множества, записи, композиции разных типов, отображения величин с значениями разных типов), открытость (доступность из разных языков программирования, возможность обращения к прикладным СУБД), непроцедурность языка (общепринятым становится язык запросов *SQL*), управление асинхронными параллельными процессами, состояние которых отражает БД. Последнее свойство позволяет говорить о тесной взаимосвязи СУБД и подсистемы управления проектами *DesPM*.

Названные особенности управления данными с САПР нашли свое выражение в современных подсистемах управления проектными данными *PDM*. В *PDM* разнообразие типов проектных данных поддерживается их классификацией и соответствующим выделением групп с характерными множествами атрибутов. Такими группами данных являются описания изделий с различных точек зрения (аспекты). Для большинства САПР машиностроения характерными аспектами являются свойства компонентов и сборок, модели и их документальное выражение (основными примерами могут служить чертежи, 3D-модели визуализации, сеточные представления для конечно-элементного анализа, текстовые описания), структура изделий, отражающая взаимосвязи между компонентами и сборками и их описаниями в разных группах.

Вследствие большого объема проектных данных и наличия ряда версий проектов *PDM* должна обладать развитой системой поиска нужных данных по различным критериям.

4.8.2. ВАРИАНТЫ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ В СЕТЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

При сетевой организации автоматизированных систем информационное обеспечение может быть реализовано по одному из следующих вариантов: 1) *FS* – файловый сервер; 2) *RDA* – доступ к удаленным данным; 3) *DBS* – сервер баз данных; 4) *AS* – сервер приложений. Варианты различаются распределением между разными узлами сети функций хранения данных, управления данными, обработки данных в приложениях и интерфейса с пользователем.

Вариант файл-сервер характерен для локальных сетей на персональных ЭВМ с небольшим числом пользователей. Вследствие интенсивного трафика и трудностей с защитой информации эта структура для большинства автоматизированных систем малоэффективна. Поэтому предпочтительнее иметь СУБД в узле сервера.

Вариант *RDA* – это модель удаленного узла, она наиболее распространена в настоящее время среди автоматизированных систем. В ней уменьшен трафик по сравнению с *FS*, унифицирован интерфейс с СУБД на основе языка *SQL*.

Дальнейший переход к системе распределенных вычислений приводит к перемещению прикладного ПО или его части на специальный сервер или сервер БД, т.е. реализуются двух- и трехзвенные схемы. *DBS* – двухзвенная структура дистанционного управления, основанная на разделении прикладных процедур на две части: индивидуальные для каждого пользователя и общие для многих задач. В этой структуре под приложением понимают совокупность именно общих процедур. Эта совокупность обычно представляется на процедурных расширениях *SQL* и сохраняется в специальном словаре БД. В альтернативных вариантах (например, в *RDA*) все прикладные процедуры включаются в прикладные программы и, следовательно, при необходимости их изменения приходится модифицировать практически все прикладное ПО. Выделение

таких процедур в отдельное приложение облегчает их модификацию. Кроме того, в *DBS* снижается трафик, так как обмены по сети происходят не для каждой операции с БД, а для каждой *транзакции*, состоящей из нескольких операций. *Транзакцией* называют последовательность операций по удовлетворению запроса.

Вариант *AS* реализуется по *трехзвенной схеме*, в которой для приложений используются узлы, отделенные от терминального (локального) узла и от сервера БД, т.е. одновременно используются модели *DBS* и *RDA*.

Помимо проблемы распределения серверных функций между узлами сети, имеется проблема разделения этих функций между многими пользователями автоматизированных систем.

4.8.3. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЕМ В САПР

В зависимости от степени автоматизации управляющих функций можно выделить несколько уровней управления проектированием: 1) компонентный – на этом уровне пользователь должен знать специфические особенности каждой конкретной программы, используемой в маршруте проектирования; при организации маршрута он должен позаботиться об информационных интерфейсах используемых программ; другими словами, системная среда лишь представляет сведения об имеющихся программах и их интерфейсах; 2) ресурсный – пользователь по-прежнему оперирует программами при компиляции маршрута проектирования, но системная среда позволяет скрыть специфику каждой программы, так как общение унифицировано; 3) задачный – пользователь составляет маршрут проектирования не из отдельных программ, а из отдельных проектных процедур; покрытие маршрута программами выполняет системная среда; 4) проблемный – пользователь формулирует задания в форме "что нужно сделать", а не "как это сделать", т.е. не определяет маршрут проектирования, а ставит проектную проблему.

В системных средах САПР *управление проектированием* возлагается на подсистему *CAPE*, в некоторых системах обозначаемую как *DesPM (Design Process Manager)*. *DesPM* должна включать в себя компоненты: комплексы базовых знаний по тем предметным областям, которые определяются объектом проектирования, а также знаний о языках представления характеристик и ограничений; средства для генерации плана (маршрута проектирования), определения наличия средств и ресурсов для реализации плана; средства выполнения плана; средства оценки результатов. *DesPM* позволяет выбирать объекты проектирования, проводить декомпозицию моделей, для каждого компонента выбирать проектные процедуры из имеющегося набора.

Расширение возможностей управления проектированием и адаптация системной среды к конкретным САПР связано с применением языков расширения. *Язык расширения* – это язык программирования, позволяющий адаптировать и настраивать системную среду САПР на выполнение новых проектов. Язык расширения должен обеспечивать доступ к различным компонентам системной среды, объединять возможности базового языка программирования и командного языка, включать средства процедурного программирования.

Управление процессом проектирования включает в себя большое число действий и условий, поддерживающих параллельную работу многих пользователей над общим проектом. Управление выполняется на основе моделей вычислительных процессов. Используются спецификации моделей, принятые в *CASE*-системах, например, диаграммы потоков данных, ориентированные графы. Сначала модели составляют для задачного уровня, а затем система осуществляет их покрытие.

В общем случае полная формализация управления проектированием не может быть достигнута, поэтому полезную роль играют *системы поддержки решений*, принимаемых людьми. В качестве таких систем часто используют хранилища данных и *OLAP*-средства (*On-Line Analytical Processing*).

Использование хранилищ данных имеет ряд преимуществ в управлении большими объемами данных: имеется единое ядро, что исключает чрезмерные разветвленные и длительные транзакции, легче синхронизировать внесение изменений, поддерживать единство форматов данных, хранить предыдущие версии и т.п.

В ряде системных сред САПР (прежде всего, в САПР машиностроения) в подсистемах *PDM* объединяются функции управления данными и проектированием. Пример такой *PDM* – подсистема *Design Manager* в САПР *Euclid Quantum*. Функциями этой *PDM* являются управление потоками проектных данных, версиями проекта, взаимодействием разработчиков, защита информации, конфигурирование и адаптация версий системы для конкретных пользователей.

Подсистема *Design Manager* в САПР *Euclid Quantum* состоит из частей пользовательской, админи-

стратора и управления структурой продукта.

В пользовательской части данные при выполнении проектирования могут находиться либо в распоряжении конкретного разработчика, в частности в его индивидуальной БД (*User Area*), либо в зоне работы рабочей группы (*Workgroup Area*), в частности в ее БД. Утвержденные данные пересылаются в центральную БД (*Repository*). Пересылка данных из *User Area* в *Workgroup Area* происходит по инициативе разработчика командами *check in* или *share*. Первая из них начинает процедуру контроля данных, вторая обеспечивает разделение данных между всеми участниками рабочей группы. Разработчик может запрашивать данные для начала нового проекта по команде *copy out* или для модификации существующего проекта по команде *check out* (рис. 56).

Данные в БД организованы иерархически, группируются по именам проектов или по типам данных. Вызов данных из любой БД (*UA*, *WGA*, *R*) выполняется командой *retrieve*, посылка в БД – командой *store*. При обращении к БД пользователь видит структуру данных (директорию – имена папок и их частей) и определенный аспект данных выделенного в директории проекта. Такими аспектами могут быть свойства документа (имя, автор, дата, статус и т.п.), список версий проекта, 3D-изображение.

В функции администратора системы входят упорядочение данных с их распределением по дискам, контроль за правами доступа пользователей, связь с внешними системами (управление импортом – экспортом данных) и др.

Так, например, в системной среде *NELSYS CAD Framework* имеются следующие части: 1) *DMS* (*Design Management Services*) для поддержки иерархии данных, управления версиями и потоками задач; 2) *DMI* (*Design Management Interface*) с функциями открытия и закрытия баз данных, вызова и пересылки данных, доступа к *DMS*; 3) *FUS* (*Framework User Services*), включающая ряд браузеров для визуализации информации.

В *NELSYS CAD Framework* имеется несколько браузеров для общения с пользователем. Для каждого браузера может быть открыто свое окно.

1. *Design Flow Browser* – показывает взаимосвязь между проектными процедурами, историю получения объекта, список процедур, которые могут быть выполнены над объектом, позволяет задавать маршруты проектирования, вызывать проектные процедуры и задавать их параметры.
2. *Hierarchy Browser* – показывает граф иерархии и место объекта в ней.
3. *Version Browser* – показывает все виды (*view types*), статусы и номера версий выбранного объекта. Он может показать отношения эквивалентности, т.е. объекты, выражающие разные аспекты, например, топологию, схему, результаты моделирования физического объекта.
4. *Equivalence Browser* – отношения эквивалентности для выбранного объекта.
5. *Schema Browser* – показывает сущности и их отношения в виде схемы данных, в отдельном окне показываются запросы к БД и ответы на них.

4.9. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

CASE-системы часто отождествляют с инструментальными средами разработки ПО, 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 ОС *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.

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 (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 *Delphi* – 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*.

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*, апплет 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 *p-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 ней 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*.

4.9.1. КОМПОНЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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 объедине-

ния 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*.

Так, выше приведены примеры библиотек классов, применяя которые прикладные программисты могут создавать субклассы 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 отработкой 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 классов не профессиональными 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, выраженном 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.
- *OpenDoc* – технология, основанная на спецификациях *CORBA*, разработанных в начале 90-х гг. 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.

5. МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ КОМПЛЕКС – СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Внедрение новых информационных и телекоммуникационных технологий во все сферы жизни современного общества совершенно очевидно. Развитие этого процесса в сфере образования повлекло за собой множество методических, организационных и теоретических проблем. Здесь мы рассматриваем только одну из них, а именно – структуру электронного учебника с позиции ближайшей перспективы, которую обеспечивает процесс развития и совершенствования теории и техники информационных систем.

Конечная цель обучения состоит в том, что обучаемый должен владеть теоретическими основами изучаемого предмета, уметь применять их для решения конкретных задач и иметь навыки практического применения этого умения. Для достижения этих целей предусмотрены *лекции, практические занятия и лабораторные практикумы*. Эти виды занятий поддерживаются соответствующей литературой, причем практика преподавания выработала соответствующие виды изданий: учебник и учебные пособия – для изложения заданий, задачки и методические указания – для развития умения и навыков.

Какие же изменения уже произошли и происходят с этой дидактической триадой в связи с общим развитием системы знаний и информационных технологий? Их можно сформулировать следующим образом:

- инженерная практика требует интеграции знаний, придания им системного характера;

- современные технические средства в сочетании с пакетами прикладных программ позволяют избавить инженера от рутинных операций по применению известных теоретических методов для решения конкретных задач;

- сложность решаемых задач и ответственность за правильность принимаемых решений значительно повышают роль математического моделирования (имитационного, аналитического, численного) реальных объектов и процессов.

С этих позиций следует рассматривать требования к информационному обеспечению учебного процесса (этот термин имеет весьма общий характер, покрывая все источники, откуда обучающийся может получать информацию, необходимую для своего профессионального становления):

- информационное обеспечение должно обеспечивать *минимум информации*, необходимой для овладения специальностью или отдельной дисциплиной в объеме, предусмотренном образовательными стандартами, и в то же время должны быть предусмотрены возможности расширения области знания;

- нет смысла структурировать информационное обеспечение учебного процесса в соответствии с классической триадой (знания, умения, навыки);

- общая организация информационного обеспечения должна исключить (или, по крайней мере, свести к минимуму) участие *УЧИТЕЛЯ* в обучении *рутинным операциям* профессиональной деятельности;

- условия работы с информационным обеспечением должны удовлетворять основным эргономическим требованиям;

- необходимо учитывать, что значительный объем необходимой информации хранится в форме баз данных и баз знаний, т.е. в форме электронных документов.

Одним из вариантов построения информационной системы обеспечения учебного процесса, удовлетворяющей перечисленным требованиям, может быть следующий.

Основу системы составляет база данных – совокупность информационных массивов, каждый из которых является отдельным функционально законченным фрагментом информационного обеспечения (например, разделом учебника). Каждый такой фрагмент организуется таким образом, чтобы допускать управляемое логическое и техническое (программное) соединение с некоторой совокупностью других фрагментов. Это и будет электронный учебник, который представляет собой гипертекстовую систему с адаптивными связями между фрагментами, обеспечивающую возможность адаптивной компоновки нелинейного текста. Маршрутизация компоновки формируется навигатором, входящим в состав *системы управления базой данных*. Он дает указания компоновщику гипертекста об объединении соответствующих фрагментов. Управление навигатором осуществляется по нескольким контурам: 1) непосредственно пользователем в процессе работы; 2) пользователем по результатам анализа процесса обучения; 3) программой-анализатором по результатам автоматического тестового контроля знаний пользователя; 4) учителем по результатам личного общения с учащимся.

Какие же дополнительные (по сравнению с бумажным учебником) средства должны содержаться в электронном учебнике? Это, во-первых, система самопроверки знаний; во-вторых, система рубежного контроля; в-третьих, электронный учебник должен удовлетворять требованиям совместимости с электронной экзаменационной системой. Естественно, все эти дополнительные электронные средства должны давать возможность организовывать сравнительно простые схемы дистанционного образования.

Обратимся к системе самопроверки знаний в электронном учебнике и рассмотрим, каким требованиям она должна удовлетворять.

1. Главное требование к системе самопроверки знаний (самоконтроля) заключается в том, что тестовых вопросов должно быть много и совокупность этих вопросов по содержанию, должна охватывать весь материал учебника; кстати, эти вопросы могут быть использованы для экзаменационного тестирования.

2. Вопросы должны подаваться испытуемому в случайном порядке; это исключает возможность механического запоминания обучаемым последовательности вопросов.

3. Испытуемый должен каждый раз читать вопрос и осмысливать его, т.е. запоминать вопрос по смыслу, а не по порядку его следования или символу, его обозначающему.

4. Должен проводиться учет времени, затраченного на ответы, причем должны быть установлены ограничения на это время. Учет времени – один из способов борьбы со шпаргалкой. Чтобы иметь поло-

жительный результат самопроверки, нужно давать ответы не только правильно, но и достаточно быстро. Практика показывает, что среднее достаточное время для ответа на один вопрос – одна минута.

5. Целесообразно всю совокупность вопросов распределить по темам, чтобы обучающийся мог проверить уровень усвоения им учебного материала после изучения каждой темы (а также организовать рубежный контроль знаний).

6. В тестовую систему должна быть включена оценка степени правильности ответа на каждый заданный обучающемуся вопрос. Предлагается определять эту степень формально и в процентах. Окончательную отметку ставит преподаватель, ориентируясь на формальную оценку системы.

7. Компьютерный тест должен быть простым в использовании: представление вопросов на экране должно быть спроектировано дизайнером, а возможные действия обучающегося при ответе на вопрос продуманы эргономистом. В любом случае на экране должен быть минимум управляющих кнопок, и инструкции-подсказки по действиям обучающегося должны появляться только в нужное время в нужном месте, а не присутствовать на экране постоянно, загромождая его.

8. Тестовые вопросы и варианты ответов на них должны быть понятными по содержанию.

Технологии компьютерного образования не только стоят в одном ряду с традиционными формами обучения, но и являются главенствующими при дистанционной форме преподавания дисциплин, в экстернате, дополнительном профессиональном, кардинально меняют основную форму – очное обучение.

В нашем понимании электронный учебник как одна из форм технологии компьютерного обучения представляет собой набор мультимедиа – курсов (уроков) с анимацией, видео, звуковым сопровождением, записанных на *CD*-диске и имеет хорошие технические возможности для реализации различных дидактических идей.

Электронный учебник, естественно, не сможет заменить общения с преподавателем. Дополнительно учащиеся должны иметь возможность изучать теоретическую часть курса – лекции, печатные материалы. Настоящее учебное пособие и является таким комплексом, в котором соединены традиционный печатный учебник и электронный. Этот комплекс разработан с учетом рекомендаций, представленных в ряде интересных работ [61 – 65] естественно не все рекомендации этих работ могут быть приняты безоговорочно. Например, нельзя согласиться, на наш взгляд, с одним из положений работы [61], где говорится о том, что учебное пособие может быть подготовлено на бумаге и продублировано в виде гипертекстового аналога на компьютере. Да, такое дублирование учитывает некоторые индивидуальные наклонности студентов, так как одни воспринимают текст с экрана лучше, чем с печатного листа, другие наоборот. Электронный учебник, не исключая дублирования, должен содержать как можно больше иллюстрационных элементов, которые принципиально нельзя показать ни на доске, ни в печатном учебнике, ни на слайде (аудио-, видео-, анимационные материалы).

Такой электронный учебник вместе с традиционным печатным материалом будет соответствовать дуализму человеческого мышления [62] и способствовать изучению дисциплины на высоком уровне. В той же работе [62] и монографии [63] речь идет о когнитивной (т.е. способствующей познанию) компьютерной графике. На наш взгляд, это в полной мере относится и к электронному учебнику, как составляющей части настоящего учебного комплекса.

Для плодотворного восприятия учебного материала и создания у студента необходимого эмоционального настроения также способствует гуманитарная оболочка обучающей программы [64]. Для достижения этой цели в нашем электронном учебнике предусмотрены музыкальные вставки и цвет при оформлении изучаемого материала различных разделов.

Глубокому анализу проблем гуманитаризации образования и решению вопросов психологического обеспечения процесса обучения посвящена работа [65]. Авторы указанной работы особо отмечают, что целью использования психологических средств в организации учебного процесса является создания и поддержания заинтересованности учащихся, как самим ходом процесса обучения, так и его результатами. И далее, цитируя авторов: "Последние должны восприниматься учащимися не только как практически полезные сведения и навыки, необходимые для профессиональной работы, но и как фундаментальные идеи и положения, описывающие естественнонаучные, гуманитарные и культурные основы современного мира. Именно такой подход к гуманитаризации современного образования, по-видимому, должен являться одним из основных условий при получении техническими высшими учебными заведениями статуса технических университетов".

Авторы цитируемой работы также предупреждают создателей компьютерных обучающих программ об опасностях или ловушках общения между студентом и компьютером, "которые следуют из фундамен-

тальных трудностей актов коммуникации". В основе этого лежит тот факт, что субъекты коммуникации преподаватель и студент принципиально не тождественны друг другу. "Они не обладают одинаковым внутренним миром, одинаковыми системами ценностей, одинаковыми приоритетами мотиваций, наконец, субъекты общения не имеют полной логической конгруэнтности". И как следствие этого, разработчик компьютерной обучающей программы невольно навязывает студенту свои приоритеты и свою систему навигации при изучении дисциплины.

Одним из опасных моментов при разработке электронного учебника является ориентация его на "среднего" студента без учета диапазона мотиваций обучения: от искреннего желания глубокого изучения дисциплины до "как бы сдать экзамен".

Серьезной опасностью, по мнению автора работы [62], является влияние компьютеризации инженерной подготовки на мышление студента. В процессе обучения, по мнению автора этой работы, необходимо делать упор на развитие инженерного "чутья", в основе которого находятся знания фундаментальных физических свойств технических объектов и процессов, умение глубоко анализировать эти свойства. "Чтобы строить адекватные математические модели, необходимо глубоко понимать физическую природу объектов моделирования". Для учета исходного уровня знаний, способностей и мотиваций нами предпринята попытка создания двухуровневого изложения материала изучаемой дисциплины в мультимедийном комплексе. Первый уровень рассчитан на более подготовленного студента, а для второго уровня характерным является подробное изложение дисциплины с большим количеством иллюстративного материала. Это в некоторой степени обеспечивает индивидуальный подход при обучении студентов. Кроме того, использование нескольких уровней представления материала, на наш взгляд, несет в себе элементы тестирования своих знаний обучаемого. Также многоуровневая структура и хорошая оболочка его уменьшает причины появления у обучаемого дискомфорта и ощущения своей непригодности.

Разрабатывая электронные учебники, необходимо учитывать специфику дисциплин. Например, рассматриваемый курс "Проектирование химических предприятий" базируется на совокупности многих дисциплин, некоторые из них изучались студентами в первых семестрах и основательно забылись. Кроме того, обучаемые должны знать элементы тех дисциплин, преподавание которых не предусмотрено учебным планом ("Основы промышленного строительства"). Поэтому только нетрадиционные методы представления изучаемого материала, в данном случае анимация, позволяет, как показывает опыт, успешно освоить такой курс.

Результаты этого анализа и рекомендации, вытекающие из него, мы пытались реализовать при разработке мультимедийного комплекса.

Этот комплекс по проектированию выполнен в среде *Power Point* программного пакета *MS Office*, позволяющей совмещать видео файлы, звук, музыкальное сопровождение, текст, растровые файлы. Все это представляет учебный материал в различных формах и использует средства мультимедиа в полном объеме. Для работы с комплексом требуется компьютер *IBM PC* с процессором не ниже *Pentium 166*, ОЗУ 64 Мб, звуковой картой, 100 Мб свободного места на системном диске и полного программного пакета *MS Office*.

Такие высокие требования к компьютеру обусловлены наличием большого количества графической информации на некоторых виртуальных страницах, которая дается в совокупности со звуковым сопровождением. Многие анимации занимают несколько слайдов, которые "прокручиваются" автоматически.

Последовательность работы с учебником такова:

- запустить CD – щелчком левой кнопки мыши открыть файл "Основы проектирования";
- нажать "начать показ" или клавишу F5.

При запуске основного файла, содержащего главное меню, он автоматически переписывает с *CD* в каталог *TEMP* системного диска (обычно это диск *C*). Этот файл содержит в себе гиперссылки, которые позволяют открывать файл с нужным курсом. При щелчке мыши на выбранной гиперссылке требуемый файл также переписывается в каталог *TEMP* системного диска. При выходе из какого либо курса главное меню – файл содержащий этот курс автоматически из каталога *TEMP* стирается. Поэтому для нормальной работы программы требуется около 100 Мб свободного места. Мультимедийный комплекс на базе *IBM PC* состоит из главного файла меню "Основы проектирования", файлов, содержащих меню каждого курса, и файлов, содержащих курсы (уроки). Файл "Основы проектирования" необходимо запускать для просмотра учебника, остальные файлы подгружаются автоматически по мере продвижения по учебнику.

При создании комплекса было выбрано несколько принципов представления учебного материала. основополагающий принцип – максимальная замена текстовой информации на графическую (статическую и динамическую) и звуковое сопровождение. Если это чертеж, то на экране идет его построение. Если речь идет о зданиях или строительных элементах, даются их фотографии или трехмерные изображения. Формулировки и определения даются на экране шрифтом не ниже 24 кегля.

В мультимедийном комплексе используется двухуровневая иерархия. На первом уровне даются основные понятия и формулировки на втором – расшифровки основных понятий и подробные пояснения. Как первый так и второй уровни имеют разветвленную структуру. Для перехода с одного уровня на другой или в другие ветви текущего уровня, а также для перелистывания страниц, применяется гипертекстовая технология. Для гипертекстовых переходов используются активные слова, которые выделены цветом с тенью, кнопки, на которых написано название открываемого объекта и активные блоки.

Каждая тема комплекса выделена своим цветом. При открытии темы сначала показывается ее номер, затем цвет, название, после чего открывается меню темы. Из этого меню можно вызвать любой интересующий нас урок.

Представленные выше результаты анализа работ по созданию компьютерных обучающих программ, структура и методика разработки нашего мультимедийного комплекса могут служить элементами учебной дисциплины "Информационные технологии обучения", которую предлагает автор работы [61] включать в программы ФПК и учебные планы вузов: "Полученные знания понадобятся будущим специалистам, в потенциале руководителям различных подразделений на предприятиях и в организациях, квалифицированно решать вопросы подготовки и переподготовки кадров. К тому же, компьютерные обучающие системы становятся обязательным элементом при внедрении новых сложных машин и технологий. Поэтому их разработчики должны знать принципы создания и использования информационных технологий обучения".

Развитие информатики открывает новые, эффективные пути решения теоретических и практических задач в различных областях человеческой деятельности. Одной из таких задач является передача знаний от профессионала молодому специалисту, осуществляемая с помощью компьютера. Принято различать *декларативные* знания, то есть знания о фактах, явлениях и закономерностях, и *процедуральные* знания, представляющие собой умение решать задачи. Процедуральные знания возникают на основе декларативных исключительно путем интенсивной практики. Обладание ими отличает квалифицированных специалистов (экспертов) от новичков.

Компьютерные системы обучения декларативным знаниям появились достаточно давно и достигли высокого уровня совершенства благодаря современным технологиям гипертекста и мультимедиа. Существенно большие трудности связаны с передачей второго вида знаний, так как для этого необходима среда, в которой можно научить решению задач, основываясь на процедуральных знаниях эксперта. То есть должна быть построена модель процесса решения задач рассматриваемой предметной области. Создание подобных моделей для таких областей, как типовые математические задачи, – не проблема, поскольку в данном случае эксперт-математик может явно сформулировать идеальную стратегию, следуя которой новичок придет к корректному решению. Иначе обстоит дело со многими недостаточно определенными областями знаний, например, медицинской диагностикой или проектированием промышленных объектов.

Парадокс заключается в том, что опытный проектировщик, принимая решение во многих сложных случаях, не способен сформулировать правила своего поведения. Он может продемонстрировать пример готового решения, может его аргументировать, может повторить решение, но не рассказать, как он это делает. Исследования показывают, что по крайней мере часть знаний эксперта хранится на подсознательном уровне и не может быть вербализована [66]. Стратегия принятия решений, которую проектировщик-эксперт может сформулировать в явном виде, представляет лишь наиболее простую и очевидную составляющую его знаний. Поэтому модели принятия проектных решений, построенные на основе вопросов типа "Как вы это делаете?", имеют мало общего с тем, как на самом деле проектировщик-эксперт принимает решения.

Очевидно, что экспертом становятся не сразу. Согласно исследованиям в области когнитивной психологии, человек достигает высот профессионального мастерства не ранее, чем спустя 10 лет интенсивной практики. За это время не только увеличивается объем его знаний, но и меняется их структура, стратегия мышления. Можно ли сократить этот срок, используя эффективные системы обучения? Как без искажений передать знания эксперта сначала этим системам, а затем и обучаемым? Как организованы эти знания?

Основными этапами создания такой системы обучения являются:

- построение базы знаний, которая позволила бы формальным образом с высокой точностью имитировать решения эксперта;
- создание на основе этой базы знаний интерактивной среды обучения, помогающей новичку приобрести устойчивые навыки решения задач, близкие к навыкам эксперта.

Построение базы знаний – наиболее трудоемкий этап разработки экспертных систем. Сложность и ответственность этой задачи даже обусловили возникновение новой специальности – инженера-когнитолога, работающего в контакте с экспертами и профессионально занимающегося построением баз знаний. Мы должны так построить процесс извлечения знаний, чтобы от эксперта не требовалась формулировка эвристических правил, была обеспечена возможность проверки полученных знаний на непротиворечивость, а сам процесс укладывался в разумные временные рамки. Разработанный специалистами Института системного анализа РАН метод экспертной классификации, предназначенный для построения полных и непротиворечивых баз экспертных знаний, вполне удовлетворяет этим требованиям [66].

После того как определен способ компактного представления знаний эксперта, необходимо переходить к исследованию проблемы эффективного обучения искусству проектирования. Цель обучения – создание в долговременной памяти новичка подсознательных решающих правил, позволяющих ему действовать так же, как действует эксперт. При этом для обучаемого необходимо создание условий, в которых могут сформироваться подсознательные правила принятия решений, близкие к правилам эксперта. Обучение подсознательным решающим правилам – одно из направлений исследований в когнитивной психологии.

Обучение начинается с задач наименьшей сложности и заключается в самостоятельном решении большого количества задач методом проб и ошибок. Решающие правила эксперта, используемые в качестве эталона классификации, в явном виде обучаемому не сообщаются. Вместо этого при неправильном ответе предоставляются объяснения, аналогичные объяснениям эксперта своих действий.

Если испытуемый безошибочно решает достаточно длинную последовательность задач, то система повышает их сложность, предъявляя объекты следующего слоя. На основании данных о правильно и неправильно решенных задачах система строит прогноз решения для тех задач, которые еще не предъявлялись. При этом последующие задачи выбираются таким образом, чтобы как можно быстрее ликвидировать пробелы в знаниях обучаемого. Процесс обучения завершается, когда новичок способен уверенно решать задачи наивысшего уровня сложности, включая граничные объекты.

На наш взгляд, описание компьютерной системы обучения процедуральным знаниям свидетельствует о принципиально новых возможностях подготовки инженеров-проектировщиков в тех областях, где от них требуются практические умения. Начинаящие проектировщики смогут за более короткий срок и ценой меньшего числа ошибок овладеть навыками проектного дела, близкими к умению опытных проектировщиков. Эти навыки молодые специалисты могут дальше развивать и совершенствовать в ходе своей практики.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО И ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТОВ

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО И ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Учебное проектирование – самостоятельная работа студента, основной целью которой является развитие и закрепление теоретических знаний и расчетно-графических навыков при решении практических инженерных проблем с использованием последних достижений науки и техники, а также новых информационных технологий.

Тематика проектов направлена на решение следующих задач:

- создание новых энергосберегающих и безотходных технологических процессов;
- разработка нового технологического оборудования, основанная на использовании современных достижений науки и техники;
- модернизация известных модулей машин и аппаратов;
- создание экспериментального оборудования, установок и стендов с целью исследования технологических процессов;
- разработка подсистем автоматизированного расчета технологических установок, анализ эффективности их функционирования методом математического моделирования;
- разработка электронных версий учебников по специальности;
- разработка прогрессивных методов монтажа и ремонта оборудования;
- механизация и роботизация трудоемких ручных операций технологических производств;
- разработка мероприятий и оборудования по охране окружающей среды.

При проектировании на первый план выдвигаются вопросы повышения технического уровня производства, качества производимой продукции, эффективности использования оборудования.

В зависимости от рейтинга студенту выдается задание на выполнение типового проекта, проекта с исследовательской частью или исследовательской работы.

Проект (работа) состоит из расчетно-пояснительной записки (РПЗ) и графической части (чертежей, графиков), содержание и объем которых определяется видом проекта (работы).

6.1. ОРГАНИЗАЦИЯ КУРСОВОГО И ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Тематика курсовых и дипломных проектов определяется кафедрой, исходя из предложений промышленных предприятий, НИИ, и проектных организаций, которые являются базами производственной практики студентов. Темы проектов (работ) и их содержание подлежат рассмотрению на заседании кафедры.

Студент, получив тему проекта (работы), заполняет совместно с руководителем перед прохождением практики бланк задания с указанием задач проектирования. В соответствии с темой проекта студент в процессе прохождения практики собирает исходные материалы для проектирования, намечает с руководителями от университета и базы практики пути модернизации оборудования с целью улучшения качества выпускаемой продукции и повышения технико-экономических показателей производства, повышения экологической безопасности и т.п.

Студент работает над проектом под руководством преподавателя, который консультирует его и контролирует график выполнения проекта. При дипломном проектировании выполнение студентом экономического обоснования, обеспечения БЖД обслуживающего персонала, разработки функциональной схемы автоматизации и чертежей осуществляется под контролем и консультацией специалистов в соответствующих областях и нормоконтролера.

Следует особо подчеркнуть, что руководитель проекта, консультанты и нормоконтролер помогают студенту в достижении требуемого уровня проекта, не давая при этом готовых решений. Они не несут ответственности за график выполнения и качество проекта. Студент является единоличным автором проекта и несет всю ответственность за технический уровень и качество проекта.

Готовый проект студент представляет для проверки руководителю: курсовой – за одну неделю до защиты, дипломный (с подписями консультантов и нормоконтролера) – за две недели до предварительной защиты, на которой определяется степень готовности проекта и дипломника. После предварительной защиты дипломный проект 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 дипломному проекту, заведующий кафедрой подписывает чертежи, РПЗ, дает письменное заключение по представленным материалам и направляет проект на рецензию.

Студент, не вышедший по уважительной причине на защиту дипломного проекта, может быть допущен к защите до конца текущего календарного года.

Студент, не допущенный к защите по неуважительной причине и отчисленный из университета, должен восстановиться в число студентов следующего учебного года и повторить заново весь цикл дипломного проектирования.

Для проведения защиты проектов создаются комиссии: курсовой проект защищается перед комиссией из числа преподавателей кафедры. Для защиты дипломных проектов создается и утверждается приказом ректора Государственная аттестационная комиссия (ГАК), в состав которой входят ведущие специалисты промышленных предприятий, а также профессора и доценты выпускающих и общеинженерных кафедр высших учебных заведений.

Графики выполнения и защиты проектов составляются заранее и вывешиваются на доске объявлений выпускающей кафедры.

Защита 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 проекте технических решений. Продолжительность доклада должна быть не более 10 минут. Рекомендуется следующая структура доклада:

- раскрытие актуальности и целесообразности темы проектирования, постановка задач, решаемых в ходе проектирования (1 мин);
- краткое изложение технологии производства (2 мин);
- изложение решений принятых при компоновке оборудования (1 мин);
- изложение конструкции и принципа действия технологического объекта (машины, аппарата, установки и т.д.), освещение конкретных технических решений по модернизации оборудования (5 мин);
- оценка эффективности проекта (0,5 мин);
- выводы по результатам проектирования (0,5 мин).

Доклад должен быть неразрывно связан с графической частью проекта, несущей наглядную информацию о технических разработках и сопровождаться ссылками на соответствующие 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 (при защите дипломного проекта) зачитывается рецензия на проект и предоставляется слово дипломнику для ответа на замечания рецензента.

6.2. СТРУКТУРА, ОБЪЕМ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНЫХ ЗАПИСОК И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТОВ

Студенты *дневной формы обучения* в период подготовки курсового проекта по специальности параллельно выполняют курсовую работу по дисциплине "Проектирование технологических установок и производств. САПР". Она должна состоять из пояснительной записки, чертежей принципиальной технологической схемы и компоновки оборудования. Поскольку курсовые работа и проект органически взаимосвязаны, считаем целесообразным для них оформлять общую расчетно-пояснительную записку и защищать их одновременно.

Студенты *заочной формы обучения* выполняют курсовой проект по специальности.

Состав РПЗ определяется стандартом предприятия.

Ниже приведены рекомендации по структуре и объему РПЗ и графической части типовых проектов, т.е. разработанных по материалам, собранным при прохождении практики студентами на предприятиях, связанных с выпуском продукции не машиностроительного профиля.

6.2.1. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Титульный лист (прил. 1.А).

Задание на проектирование (на бланке).

Аннотация.

Ведомость проекта (прил. 1.Б).

Содержание.

Введение.

Литературно-патентный обзор по способам производства продукта и основному технологическому оборудованию (результаты патентного поиска составить в виде кратких описаний технических решений, а затем следует привести критический анализ и выводы по патентному поиску).

Курсовая работа по автоматизированному проектированию

1. Разработка технического задания на проектирование.
 - 1.1. Обоснование выбранного метода производства.
 - 1.2. Свойства исходного сырья и готовой продукции.
 - 1.3. Составление и краткое описание по стадиям эскизной технологической схемы производства.
 - 1.4. Расчет материальных и тепловых балансов по стадиям производства.
2. Расчет и выбор технологического оборудования.
 - 2.1. Выбор типа основного оборудования.
 - 2.2. Приближенный расчет основного оборудования (кроме аппарата данного на спецразработку).
 - 2.3. Подбор основного оборудования (при подборе аппарата, данного на спецразработку, дать ссылку на пункт 5.4).
3. Разработка принципиальной технологической схемы производства.
 - 3.1. Выбор вспомогательного оборудования.
 - 3.2. Полное описание технологической схемы по стадиям производства.
4. Компоновка оборудования.

Курсовой проект по машинам и аппаратам

5. Расчет и конструктивная разработка основного аппарата.
 - 5.1. Технологический расчет аппарата (машины).
 - 5.2. Обоснование выбора конструкционного материала для аппарата.
 - 5.3. Механический расчет основного аппарата.
 - 5.4. Подбор основного аппарата по каталогам или его разработка.
 - 5.5. Описание модернизации основного технологического оборудования.
6. Прогрессивные методы ремонта и монтажа оборудования.

Выводы.

Список используемых источников.

Приложение.

Объединенная расчетно-пояснительная записка должна иметь объем около 60 страниц, причем объем расчетной части должен быть не менее 50 % от общего.

Объем графической части: схема технологическая – 1 лист; компоновочный чертеж – 1 лист (эти чертежи выполняются на формате А1 или на формате А2); чертеж основного аппарата и его узлов – 3 листа формата А1. Не менее двух листов графической части должно быть выполнено на ЭВМ.

Структура курсового проекта с исследовательской частью отличается от типового заменой раздела четыре (компоновка) на исследовательскую часть.

Исследовательская часть:

1. Постановка задачи исследования.
2. Выбор методики проведения исследования.
3. Описание экспериментальной установки.
4. Результаты исследования и их анализ.

Графическая часть курсового проекта с исследовательской частью отличается от типового заменой компоновочного чертежа на лист результатов исследований.

6.2.2. ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

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 в пояснительной записке проекта.

Структура и объем дипломного проекта для студентов всех форм обучения одинаковы. Объем расчетно-пояснительной записки (РПЗ или далее ПЗ) дипломного проекта, как правило, около 100 страниц формата А4, графической части – 10 листов формата А1. Оформление ПЗ и графического материала должно соответствовать стандартам и настоящему пособию. Состав ПЗ дипломного проекта следующий:

Титульный лист (на бланке).

Задание на дипломный проект (на бланке).

Аннотация.

Ведомость проекта (прил. 1.Б).

Содержание (прил. 1.В).

Введение.

1. Разработка технического задания на проектирование.
 - 1.1. Литературно-патентный обзор способов производства и оборудования.
 - 1.2. Анализ исходных данных. Выбор способа производства. Составление и описание по стадиям эскизной технологической схемы производства. Выбор типа технологического оборудования.
 - 1.3. Характеристика исходного сырья и готовой продукции.
 - 1.4. Расчет материальных и тепловых балансов по стадиям производства.
2. Расчет и подбор технологического оборудования по стадиям производства.
 - 2.1. Технологический расчет основного оборудования.
 - 2.2. Выбор конструкционного материала и механический расчет оборудования.
 - 2.3. Подбор технологического оборудования по каталогам или его разработка.
3. Разработка принципиальной технологической схемы.
 - 3.1. Оформление основных, вспомогательных стадий производства, отгрузки готовой продукции, обезвреживания и утилизации отходов и т.д.
 - 3.2. Автоматизация и механизация отдельного технологического узла.
 - 3.3. Полное описание технологической схемы по стадиям производства.
4. Компоновка оборудования.
5. Разработка способов монтажа и ремонта оборудования.
6. Решение задач промышленной экологии.
7. Мероприятия по безопасности жизнедеятельности и производственной санитарии.
8. Экономическое обоснование проекта.

Выводы.

Список используемых источников.

Приложение.

Проект с исследовательской частью включает специальный раздел, в котором описывается методика проведения экспериментальных исследований (на пилотной или промышленной установках, вычислительный эксперимент на ЭВМ с использованием математической модели и т.п.), планирование, проведение и обработка результатов эксперимента, анализ полученных результатов. В зависимости от объема исследовательской части проекта может быть изменен состав пояснительной записки и сокращен объем обязательной графической части проекта.

Исследовательская 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 специальностей кафедры. Базой практики при этом для студентов исследователей может быть выпускающая кафедра, НИИ, КБ и т.п.

6.3. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Пояснительная записка (ПЗ) проекта (работы) должна быть сброшюрована в папке формата А4, на которую наклеивается этикетка размером 65×100 мм с указанием аббревиатуры университета (ТГТУ), вида документа и его обозначение, темы проекта, 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.

Иллюстрации (рисунки, схемы, графики и т.д.) должны быть выполнены в соответствии с действующим стандартом вуза и располагаться по тексту 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 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 быть разделены 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 точку не ставят.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов.

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 ПЗ 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 ПЗ должны иметься 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 ПЗ 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 ПЗ. 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/(м²К); F – поверхность теплообмена, м²; Δt – 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 α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²К); λ_i – теплопроводность i -го слоя (стенки, отложений на стенке и т.п.), Вт/(мК); δ_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 ПЗ не допускается применение машинописных и рукописных символов в одной формуле.

В тексте ПЗ 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 ПЗ и нумеровать арабскими цифрами с точкой. Список используемых источников необходимо оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1–84.

Пример – Список используемых источников

1) Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн., М.: Химия, 1981. 812 с.

2) Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник для вузов. В 2 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.

3) Дворецкий С.И., Кормильцин Г.С., Королькова Е.М. Основы проектирования химических производств: Учеб. пособие / Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. 184 с.

Графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описание аппаратов, описание алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, т.е. материал, дополняющий текст ПЗ, допускается помещать в приложениях.

На все приложения в тексте ПЗ должны быть ссылки. Приложения необходимо располагать в порядке ссылок на них в тексте ПЗ. 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, Ь, Ы, Ъ. 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 ПЗ сквозную нумерацию страниц.

Все приложения следует перечислять в содержании ПЗ с указанием их номеров и заголовков.

6.3.1. АННОТАЦИЯ, ВЕДОМОСТЬ ПРОЕКТА, ВВЕДЕНИЕ

Аннотация в пояснительной записке располагается перед содержанием. Аннотация содержит общие сведения и краткую характеристику проекта (работы): название темы, фамилию студента и руководителя, год защиты, название объекта конструктивной разработки, перечень основных проектных решений с краткими комментариями, характеризующими их новизну и эффективность. В аннотации также указываются объемы пояснительной записки (в страницах) и графической части проекта (в листах). Рекомендуемый объем аннотации – одна 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.

6.3.2. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

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) производства;
- архитектурно-строительным, объемно-планировочным и конструктивным решениям;
- к разработке природоохранных мер и мероприятий;
- режиму безопасности и гигиены труда;
- по перспективному расширению 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 производства и безопасности труда обслуживаемого персонала.

6.3.2.1. Литературно-патентный обзор

Литературно-патентный обзор составляется на базе общих сведений о проектируемом объекте. При этом студент анализирует собранные во время конструкторско-технологической и преддипломной практик материалы, изучает специализированную научно-техническую литературу (реферативные и научно-технические журналы, патенты, научно-технические отчеты НИИ, монографии и др.), при необходимости пользуется архивными документами кафедры.

На основании обследования производств-аналогов и литературно-патентного обзора составляются и анализируются исходные данные для проектирования (реконструкции) производства.

6.3.2.2. 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 процессов;
- описание химизма, физико-химических основ технологических процессов, в том числе по переработке отходов производства;
 - нормативно-техническую документацию на сырье, вспомогательные материалы и готовую продукцию;
 - физико-химические свойства исходных, промежуточных, побочных, конечных продуктов и отходов производства;
 - технико-экономическое обоснование выбранной технологии (способа) производства;
 - эскизную технологическую схему производства;
 - рекомендации по автоматизации и механизации 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 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; вопрос экологии; соблюдение санитарно-гигиенических условий труда на 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 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, и вспомогательные: транспортировка и складирование сырья и готового продукта, подготовка сырья, удаление отходов производства и т.д. При составлении структурной 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 производства.

Далее студент приступает к составлению и решению уравнений материального баланса по стадиям 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) 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 производства.

При выборе способа производства следует помнить, что непрерывные технологические процессы позволяют обеспечивать высокое и стабильное качество производимой продукции, обеспечить более высокий уровень энерго- и ресурсосбережения производства, обладают более высокой удельной производительностью и способствуют значительному улучшению условий труда обслуживающего персонала за счет комплексной автоматизации 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 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 аппарата, невыполнение дополнительных требований – к ухудшению технологических или технико-экономических показателей эффективности аппарата. Все требования можно оценивать коэффициентом значимости K_z , представляющим собой параметр, изменяющийся в диапазоне 1...5 и оценивающий 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 каталогам стандартного оборудования. Если стандартное оборудование, не удовлетворяет разработанным требованиям, то принимается решение о целесообразности разработки нестандартного оборудования.

6.3.3. РАСЧЕТ И ПОДБОР ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Руководствуясь эскизным вариантом технологической схемы, студент приступает к технологическому, энергетическому и механическому расчету оборудования.

6.3.3.1. Технологический расчет оборудования

На первом этапе расчета студент составляет материальный баланс каждой стадии технологического процесса с использованием уравнений материального баланса. Целью материального расчета является определение расходных коэффициентов по сырью, объемно-реакционной массы, количества отходов, сточных вод и газовой выделений 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 одну тонну готового продукта. При этом получают расходные коэффициенты по сырью, объемы реакционных масс, приходящиеся на одну тонну готового продукта. При проведении расчета первоначально определяют общий выход от теоретического для всего процесса

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_K \cdot \dots \cdot \eta_N,$$

где η_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.

Для движения потоков материалов (жидкости или газа) через аппарат

$$\frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta P}{R_1} = K_1 \Delta P,$$

где V – объем протекающей жидкости; S – площадь сечения аппарата; τ – время; R_1 – гидравлическое сопротивление; K_1 – коэффициент скорости процесса; ΔP – перепад давления в аппарате.

Для переноса тепла

$$\frac{dQ}{S d\tau} = \frac{\Delta t}{R_2} = K_2 \Delta t,$$

где Q – количество передаваемого тепла; S – поверхность теплообмена; R_2 – термическое сопротивление; $K_2 = 1/R_2$ – коэффициент теплопередачи; Δt – средняя разность температур между обменивающимися теплом средами (материалами).

Для переноса вещества из одной фазы в другую

$$\frac{dM}{S d\tau} = \frac{\Delta C}{R_3} = K_3 \Delta C,$$

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; ΔC – разность между равновесной и рабочей концентрациями вещества в фазах.

Для химических превращений

$$\frac{dM}{V d\tau} = K_4 \varphi(c),$$

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 Δf .
4. На основании законов кинетики определяют коэффициент скорости процесса K .
5. По полученным данным и рассчитывают основной конструктивный размер аппарата d :

$$d = \frac{G}{K \Delta f}.$$

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 не-

возможно. 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.

6.3.3.2. 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; φ_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 предприятием-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 Π – проницаемость материала, мм; τ_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

$$[p_p] = \{2[\sigma]\varphi_p(s-c)\} / [D+(s-c)]. \quad (1)$$

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

$$[p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D}{l} \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s-c)}{D}},$$

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.

6.3.3.3. 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 технологического оборудования принимают равной 330 суток в течение года. С учетом остановок на планово-предупредительные ремонты для непрерывных процессов продолжительность уменьшается до 300 сут.; 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 τ_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 Ганта. По заданной производительности B и известному фонду рабочего времени оборудования $T_{эфф} = 330$ сут. рассчитывают массовый размер партии выпускаемого продукта

$$b = \frac{B}{T_{эфф}} \tau_L,$$

где $\tau_L = \max_{j=1,m} \tau_j$, τ_j – продолжительность стадии j ; τ_L – длительность цикла технологической схемы производства.

Далее по известным значениям постадийных материальных индексов S_j определяют объемы V_j емкостных аппаратов по стадиям производства:

$$V_j = bS_j^{1+z_j} / \varphi_j, \quad j = \overline{1, m},$$

где S_j – объем реакционной массы, который требуется подвергнуть обработке на стадии j , чтобы на выходе технологической схемы получить единицу массы продукта; φ_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 τ_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:

$$\sum_{j=1}^m \tau_j + \tau_L \left(\frac{B}{b} - 1 \right) \leq T_{\text{эфф}};$$

$$\tau_L = \max_{j=1, m} \tau_j / N_j;$$

$$\frac{S_j^{(1+z_j)} b}{\overline{\varphi}_j} \leq V_j \leq \frac{S_j^{(1+z_j)} b}{\underline{\varphi}_j},$$

где α_j, β_j – коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов по данным преysкурантных 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.

6.3.4. 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. Ниже приведены эти рекомендации: 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 АСП 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.

6.3.5. 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 требования 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 т.п. 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, допустим 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 вызовет 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 постаментов. 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.

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.

6.3.6. 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.

6.3.7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОМЭКОЛОГИИ

Этот раздел включает анализ совместимости проектируемого объекта с экосистемой, мероприятия и технические решения задач промэкологии, расчет и выбор оборудования для очистки и переработки газовых, жидких и твердых отходов проектируемого производства.

6.3.8. 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 БЖД.

6.3.9. 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, кон-

кретный 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.

6.3.10. 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.

6.3.11. 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 7.1–84.

6.4. СОСТАВ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

6.4.1. 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 дипломного проекта являются материалы машиностроительных заводов, то чертеж технологической схемы и компоновочный чертеж могут отсутствовать, а объем чертежей на специальную разработку соответственно увеличивается.

6.4.2. 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.

6.4.3. 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 градусов, либо на 90 градусов относительно основной надписи в зависимости от расположения графы.

6.4.4. 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 выноска узла, масштаб которого отличается от масштаба основной надписи, обозначается следующим образом: А–А (1:2).

6.4.5. 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 НИИХИММАШ) 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 опреде-

ляемого 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.

6.4.6. 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 устанавливается на месте монтажа или присоединяют к другому изделию. Посадочными называются размеры, определяющие номинальную величину и предельные отклонения сопрягаемых деталей.

На чертежах узлов кроме вышеперечисленных 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.).

Надписи, техническую характеристику, технические требования и таблицы на чертеже следует выполнять в соответствии с ГОСТ 2.316–68. ЕСКД.

Техническая характеристика обязательно должны 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:

| Обозначение | Наименование | Кол. | Проход условный D_v , мм | Давление условное P_u , МПа |
|-------------|--------------|------|----------------------------|-------------------------------|
| | | | | |
| 12 | 90 | 10 | 18 | |

Размеры таблицы: ширина 148 мм, высота 20 мм, высота заголовка 8 мм.

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: "А₁", "Б₁" 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 дополнительного изображения (сечений, разрезов, дополнительных видов и выносных элементов). В этом случае на изображениях, где показано положение секущих плоскостей, стрелок, указывающих направление проекции, 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° против часовой стрелки, секущие плоскости которого показаны на листе 1: А–А(1:2) $\curvearrowright 50^\circ$ (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 следует 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:

| | | | | | | |
|----|-------|--------------------------|------|-------|---|------------------------------|
| 20 | № шва | Обозначение сварного шва | Кол. | Общая | Присадочный материал | Масса наплавленного металла, |
| | 1 | ГОСТ 14771-76-02 | 3 | 0,5 | Проволока 2.Осв-0,8Г20 ГОСТ 2246-76 | 1,2 |
| | 2 | ГОСТ 14771-76- | 6 | 0,75 | Электрод АНО6-5-2 ГОСТ 9466-75 | 1,8 |
| | 12 | 65 | 15 | 20 | 40 | |
| | 185 | | | | | |

6.4.7. 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 | 10 |
| | | | | | | 8 |
| 8 | 8 | 35 | 90 | 10 | | |
| 185 | | | | | | |

В экспликации принципиальной схемы следует указывать: в графе "Поз." – позиционное обозначение элементов схемы, "Обозначение" – обозначение разрабатываемого оборудования, "Наименование" – наименование оборудования согласно чертежу или каталогу, "Кол." – количество оборудования, имеющего одинаковую размерность, конструкцию и назначение, "Примечание" – основные технические характеристики оборудования (по необходимости).

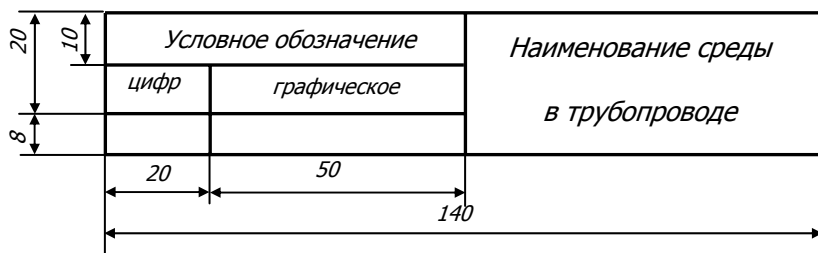
Все оборудование (аппараты, насосы, вентиляторы и др.) на схеме необходимо изображать сплошными тонкими линиями толщиной 0,3...0,5 мм, а трубопроводы и арматуру – сплошными основными линиями, т.е. в два раза толще, чем оборудование.

Аппараты, машины, трубопроводы и запорную арматуру на принципиальной технологической схеме следует изображать условно в соответствии со стандартами на изображение или по контурам оборудования 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.

6.4.8. 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, Ь, Ъ. 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").

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. М.: 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. Дворецкий С.И., Кормильцин Г.С., Королькова Е.М. Основы проектирования химических производств. Тамбов: ТГТУ, 1999. 183 с.
5. СНиП 11-01-95 "Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений".
6. Карпов В.С., Беленов Е.А., Новиков Ю.А. Структура и принципы проектирования объектов химической техники. М.: МИХМ, 1984. 136 с.
7. Тимофеев В.С., Серафимов Л.А. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Химия, 1992. 432 с.
8. Перевалов В.П., Колдобский Г.И. Основы проектирования и оборудование производств тонкого органического синтеза. М.: Химия, 1997. 288 с.
9. Новые технологии комплексной переработки метанола / М.Г. Макоренко, Т.В. Андрушкевич, Б.Г. Гришин и др. // Химическая промышленность, 1997. № 12. С. 789-794.
10. Задорский В.М. Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. Киев: Техника, 1989. 208 с.
11. Макаревич В.А. Строительное проектирование химических предприятий. М.: Высш. школа, 1977. 208 с.
12. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия. 1970. 430 с.
13. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия. 1984. 320 с.
14. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987. 496 с.
15. Процессы и аппараты химической технологии. Основы теории процессов химической технологии / Под ред. А.М. Кутепова. М.: Логос, 2000. Т. 1. 480 с.
16. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.А. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Химия, 1979. 320 с.

17. *Фильтры* для жидкостей: Каталог. 4I (фильтры непрерывного действия для жидкостей). М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. 1989.
18. *Фильтры* для жидкостей: Каталог. 4II (фильтры периодического действия, фильтры-прессы, патронные керамические фильтры). М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. 1991.
19. *Сушильные аппараты и установки*: Каталог. М.: ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ. 1988
20. *Эмалированное оборудование*: Каталог. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. 1991.
21. *Емкостные стальные сварные аппараты*: Каталог. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. 1982.
22. *Пластинчатые теплообменники*: Каталог. М.: ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ. 1980.
23. *Машины и оборудование для цехов и предприятий малой мощности по переработке сельскохозяйственного сырья*: Каталог. М.: НИИЦТЭИПИТОАГК, 1992. Ч. I, II. 256 с., 224 с.
24. *Проектирование систем автоматизации технологических процессов* / Под ред. А.С. Ключева. М.: Энергоатомиздат. 1990. 464 с.
25. *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.
26. *Гринберг Я.И.* Проектирование химических производств. М.: Химия, 1970. 268 с.
27. *Тимонин А.С.* Конструирование и расчет химико-технологического и природоохранного оборудования: Справочник. Калуга, 2002. Т. 2. 1028 с.
28. *Halemane K.P., Grossmann I.E.* Optimal process design under uncertainty // A.I.Ch.E. Journal. 1983. Vol. 29, N. 3. P. 425–433.
29. *Grossmann I.E., Floudas C.A.* Active constraint strategy for flexibility analysis in chemical engineering // Comp&Chem. Eng. 1987. Vol. 11, N 6. P. 675–693.
30. *Swaney R.E., Grossmann I.E.* An index for operational flexibility in chemical process design. Part 1: formulation and theory // A.I.Ch.E. Journal. 1985. Vol. 31, N. 4. P. 621–641.
31. *Базара М., Шетму К.* Нелинейное программирование. М.: Мир, 1982. 583 с.
32. *Floudas C.A.* Nonlinear and mixed-integer optimization. New York-Oxford University press, 1995. 462 p.
33. *Duran M.A., Grossmann I.E.* An outer approximation algorithm for a special class of mixed-integer nonlinear programs // Math. Prog., 1986. Vol. 36, N. 7. P. 307–316.
34. *Biegler L.T., Grossmann I.E., Westerberg A.W.* Systematic methods of chemical process design. New Jersey: Carnegie Mellon University, 1997. 796 p.
35. *Бодров В.И., Дворецкий С.И.* Стратегия синтеза гибких автоматизированных химико-технологических систем // ТОХТ, 1991. Т. 25, № 5. С. 716–730.
36. *Вязгин В.А., Федоров В.В.* Математические методы автоматизированного проектирования. М.: Высш. школа, 1989. 184 с.
37. *Девятков Б.Н.* Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления. Новосибирск: Редакционно-издательский отдел сибирского отделения АН СССР, 1964. 324 с.
38. *Калман Р., Фалб П., Арбиб М.* Очерки по математической теории систем. М., 1972. 576 с.
39. *Ли Э.Б., Маркус Л.* Основы теории оптимального управления. М., 1972. 576 с.
40. *Shields R.W., Pearson J.B.* Structural controllability of multinput systems // IEEE Trans. Autom. Contr. 1976. Vol. AC-21. P. 203.
41. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.* Оптимизация в технике: в 2 кн. М.: Мир, 1986. 667 с.
42. *Гилл Ф., Моррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
43. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с.
44. *Химельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. Мир, 1975. 534 с.
45. *Schittkowski K.* Nonlinear programming codes: information, tests, performance, lecture notes in economics and mathematical systems. Springer-Verlag, New York, 1980. Vol. 183.
46. *Archetti F., Szego G.P.* Global optimization algorithms of nonlinear optimization: Theoty and Algorithms. Birkhauser, Boston, 1980.
47. *Westerberg A.W., Shah J.V.* Assuring a global optimum by the user of an Upper Bound on the lower (dual) bound // Comp.&Chem. Eng. 1978. Vol. 2. P. 83–92.

48. *Cabot A.V., Francis R.L.* Solving nonconvex quadratic minimization problems by rankiny extreme points // *Oper. Res.*, 1970. Vol. 18. P. 82–86.
49. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование: Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
50. *Моисеев Н.Н.* Математика ставит эксперимент. М.: Наука, 1979. 224 с.
51. *Дворецкий Д.С., Ермаков А.А., Пешкова Е.В.* Расчет и оптимизация процессов и аппаратов химических и пищевых производств в среде MatLab: Учебное пособие / Под ред. проф. С.И. Дворецкого. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 80 с.
52. *Гухман А.А.* Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 295 с.
53. *Цирлин А.М., Миронова В.А., Крылов Ю.М.* Сегрегированные процессы в химической промышленности. М.: Химия, 1986. 232 с.
54. *Фарлоу С.* Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1985. 384 с.
55. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. Учебное пособие для университетов. М.: Наука, 1972. 736 с.
56. *Бояринов А.И., Кафаров В.В.* Методы оптимизации в химической технологии. М.: Химия, 1975. 576 с.
57. *Анисимов И.В., Бодров В.И., Покровский В.Б.* Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок. М.: Химия, 1975. 216 с.
58. *Касаткин А.Г., Плановский А.Н., Чехов О.С.* Расчет тарельчатых ректификационных и абсорбционных аппаратов. М.: Стандартгиз, 1961. 81 с.
59. *Фролов В.Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов. М.: Химия, 1987. 208 с.
60. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 360 с.
61. *Соловов А.В.* Информационные технологии обучения в профессиональной подготовке // *Высшее образование в России*. 1995. № 2. С. 31.
62. *Соловов А.В.* Компьютерная графика в инженерном образовании // *Высшее образование в России*. 1998. № 2. С. 90.
63. *Зенкин А.А.* Когнитивная компьютерная графика / Под ред. А.А. Поспелова. М.: Наука, 1991. 261 с.
64. *Курдюмов Г.М., Курдюмова А.Г.* Использование гуманитарной оболочки в компьютерной технологии обучения // *Высшее образование в России*. 1996. № 1. С. 126.
65. *Кроль В.Н., Мордвинов В.М., Трифонов Н.А.* Психологическое обеспечение технологий образования // *Высшее образование в России*. 1998. № 2. С. 34.
66. *Ларичев О.И.* и др. Новые возможности компьютерного обучения // *Вестник РАН*. 1999. Т. 69. № 2. С. 106–119.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Приложение 1.А

| |
|--|
| Министерство образования и науки РФ <hr/> (название высшего учебного заведения) Кафедра _____ ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА КП – 201.000.00.000.000 ПЗ К курсовому проекту по наименование учебной дисциплины <hr/> на тему: <hr/> подпись, дата, инициалы, фамилия |
|--|

Приложение 1.Б

| № п/п | Обозначение | Наименование | Листы |
|-------------------------|-------------|---|---------|
| | | СОДЕРЖАНИЕ | |
| | | Аннотация | 3 |
| | | Ведомость проекта | 4 |
| | | Введение | 5 |
| | | 1 Разработка технического задания на проектирование | 6 |
| | | 1.1 Литературно-патентный обзор | 17 |
| | | • | |
| | | • | |
| | | • | |
| | | Список используемых источников | 97 |
| | | • | |
| 185 | | | |
| ДП-201.000.00.00.000 ПЗ | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись |
| Разраб. | Иванов | | |
| Проверил | Петров | | |
| Н.контр. | Сидоров | | |
| Утв. | Попов | | |
| | | Литера | Лист |
| | | 5, 5, 5 | 17, 19 |
| | | ТГТУ гр. М-51 | |

Приложение 1.В

| Формат | Зона | Паз. | Обозначение | Наименование | Кол. лист. | Прим. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|----------|-------------------------|--|------------|----------|-------------------------|--|--|--|--|--------|-------|---------|-----|-------|----------|---------|------|--------|----------|--------------|---------|--|--------|--|--|----------|--|--------|--|--|--|--|--|----------|--|--|--|--|--|--|--|------|--|--|--|--|--|--|--|----------|--|---------|--|--|--|--|--|------|--|-------|--|--|--|--|--|
| | | | | <i>Сборочные единицы</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A4 | 1 | | ДП-201.131.00.01.000 ВО | Барaban | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | Камера загрузочная | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Детали</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | ДП-201.131.00.00.005 | Крышка | 2 | Ст.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | | | Ролик | 4 | Сталь45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Стандартные изделия</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | | | Болт М10×50.02 ГОСТ18125-72 | 20 | Сталь45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Прочие изделия</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 37 | | | Двигатель АОП 2- 32-2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | <i>Материалы</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Уголок 75×50×5 ГОСТ 8510-86/ Ст.3 Гост 380-88 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 6 | 8 | 70 | 63 | 10 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">ДП-201.131.00.00.000 ВО</th> <th>Литера</th> <th>Масса</th> <th>Масштаб</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Изм</td> <td>Улист</td> <td>№ докум.</td> <td>Подпись</td> <td>Дата</td> <td rowspan="2">Лист 1</td> <td rowspan="2">Листов 2</td> <td rowspan="2">ТТУ гр. М-51</td> </tr> <tr> <td>Разраб.</td> <td></td> <td>Иванов</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Проверил</td> <td></td> <td>Петров</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Т.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Рук.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Н.контр.</td> <td></td> <td>Сидоров</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Утв.</td> <td></td> <td>Попов</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | | ДП-201.131.00.00.000 ВО | | | | | Литера | Масса | Масштаб | Изм | Улист | № докум. | Подпись | Дата | Лист 1 | Листов 2 | ТТУ гр. М-51 | Разраб. | | Иванов | | | Проверил | | Петров | | | | | | Т.контр. | | | | | | | | Рук. | | | | | | | | Н.контр. | | Сидоров | | | | | | Утв. | | Попов | | | | | |
| ДП-201.131.00.00.000 ВО | | | | | Литера | Масса | Масштаб | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Изм | Улист | № докум. | Подпись | Дата | Лист 1 | Листов 2 | ТТУ гр. М-51 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Разраб. | | Иванов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Проверил | | Петров | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Т.контр. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Рук. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | Сидоров | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Утв. | | Попов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

2. Режимно-технологические методы интенсификации

| Метод интенсификации | Используемый физический эффект | Приемы использования метода в процессах и аппаратах |
|-------------------------------------|---|--|
| Импульсная обработка контактирующих | Нестационарности, пульсационный, кавитационный, кумулятивного воздействия, термодеконпрессии, электрогидравлический Юткина, Джоуля- | Циклическая подача фаз. Создание колебаний рабочей зоны внешними устройствами. Создание автоколебаний потоков контактирующих |

| | | |
|--|---|--|
| фаз | Томпсона, Ранка, ударных волн | фаз. Импульсное изменение температуры, концентрации, давления |
| Совмещение технологических процессов | Электрические явления при фазовых превращениях, Марангони, Рэля, Соре, Дюфура, термодиффузии, диффузиофорез | Совмещение процессов: химических, массообменных, теплообменных, тепло- и массообменных |
| Введение дополнительного вещества в рабочую зону | Гетерогенизация, адсорбция, трибоэффект, кавитация, эффект ударных волн, диффузиофорез | Дополнительное вещество: катализатор, стабилизатор, инициатор. Поверхность образующий 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. Аппаратурно-конструктивные методы интенсификации

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

| | | |
|--|---|--|
| Использование энергии контактирующих фаз | Жуковского, Бернулли | Турбулизация. Закручивание. Взаимное эжектирование. Осциллирование. Автоколебательные режимы |
| Использование внешних источников энергии | Двойной электрический слой, электрофорез, термофорез, кавитация | Поля: магнитное, электрическое. Перемешивающие устройства. Пульсаторы |
| 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 |

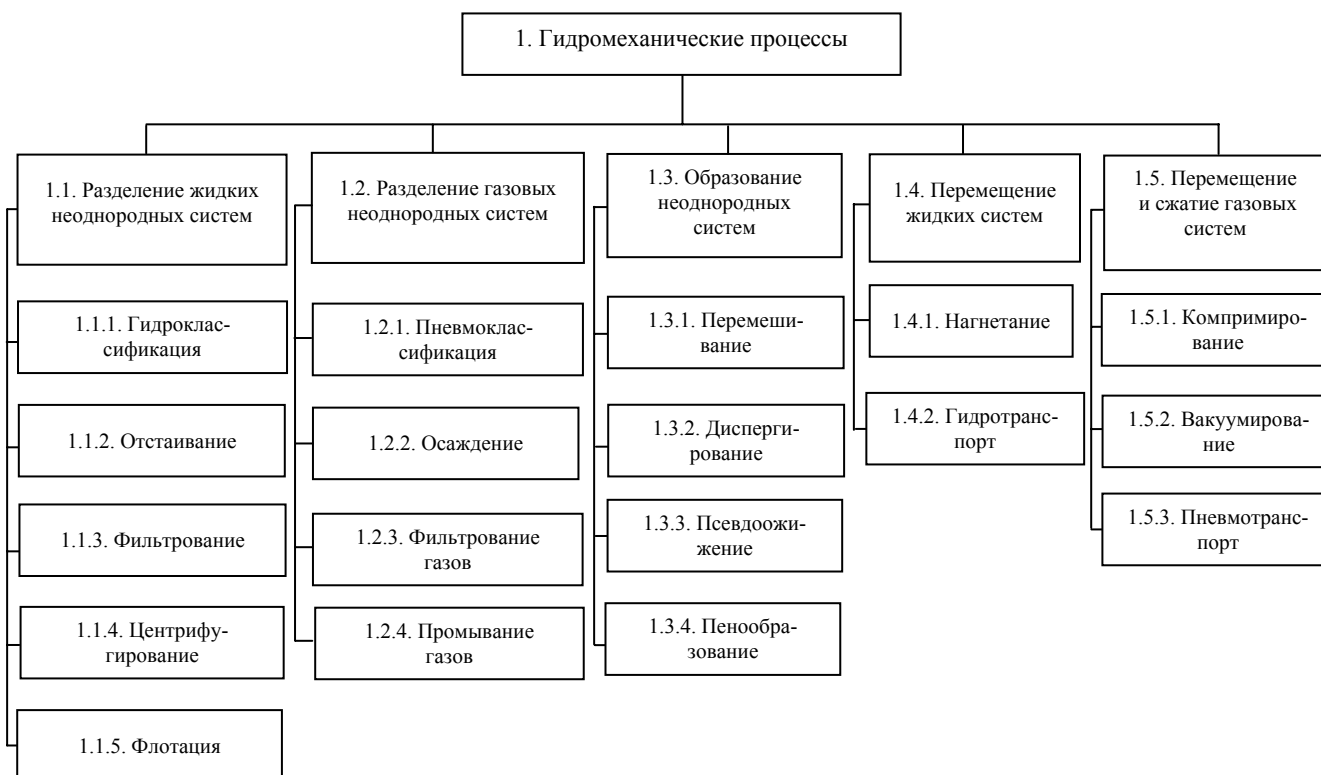


Рис. 10. Классификация гидромеханических процессов

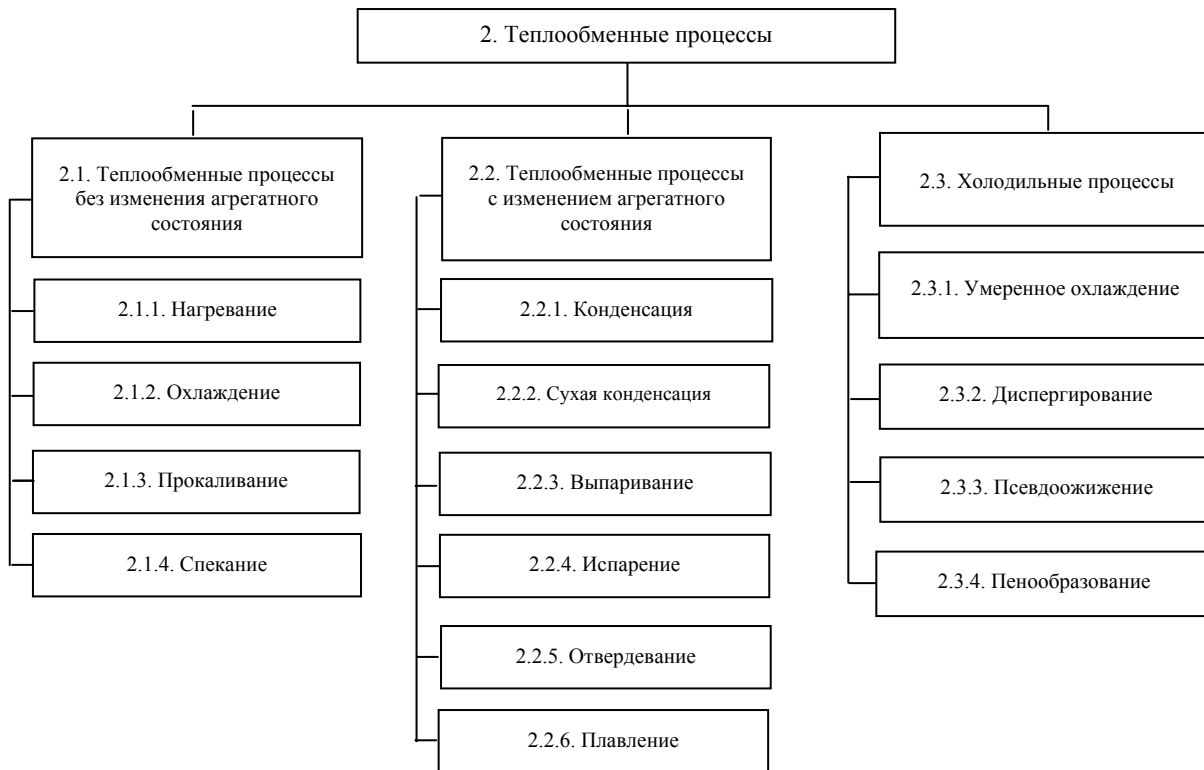
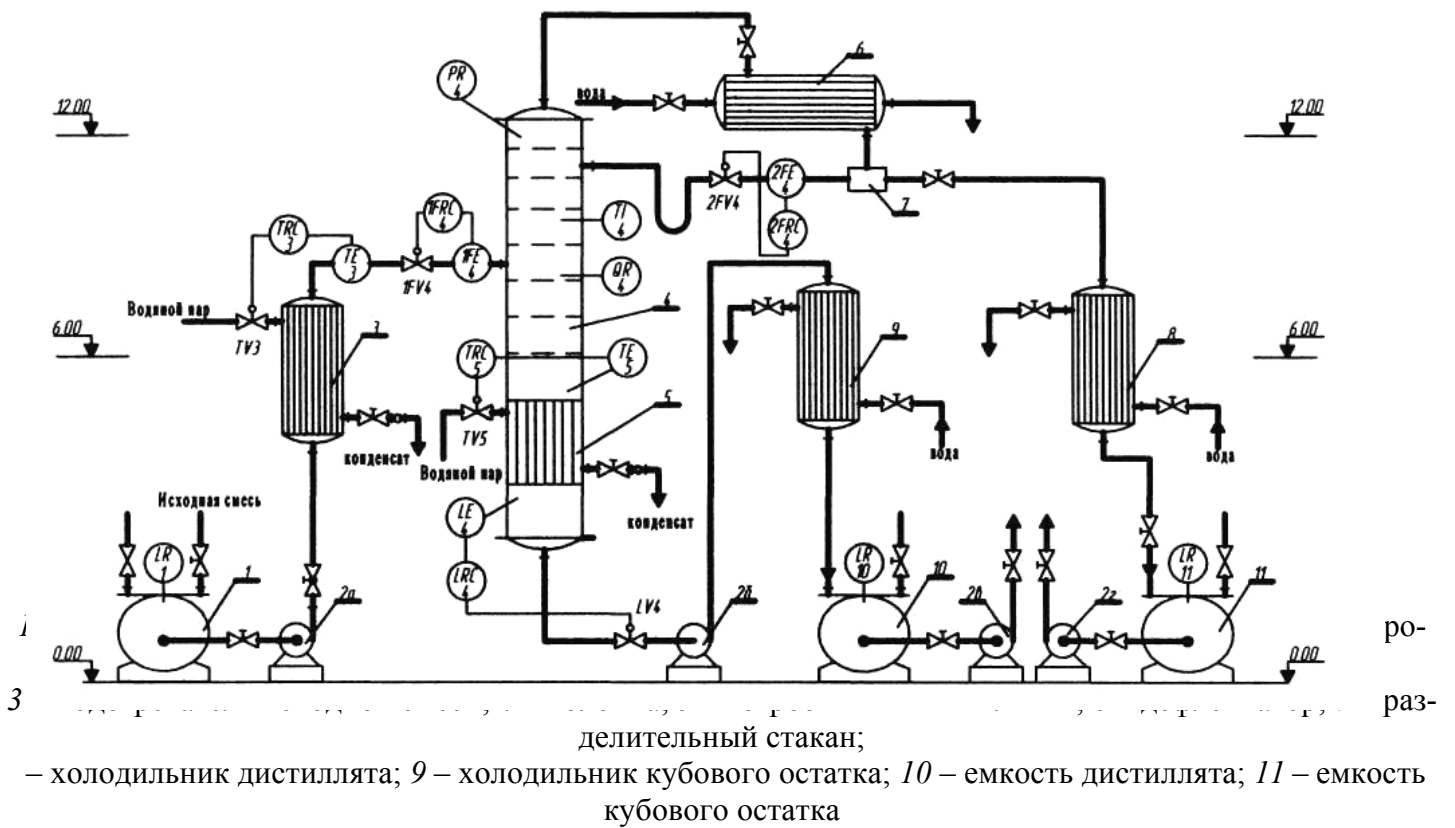


Рис. 11. Классификация теплообменных процессов

Рис. 12. Классификация массообменных процессов



Рис. 13. Классификация механических процессов



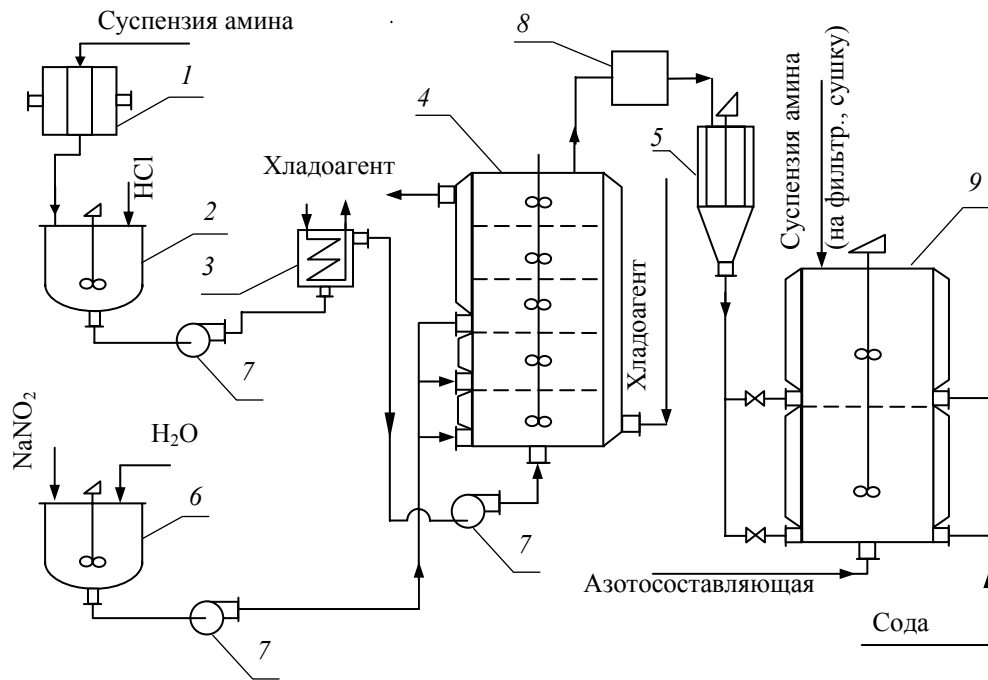


Рис. 16. Схема непрерывного производства азопигментов:

1 – активатор; 2, 3 – емкости; 4 – диазотатор; 5 – центрифуга; 6 – растворитель; 7 – насос; 8 – анализатор;
9 – реактор азосочетания

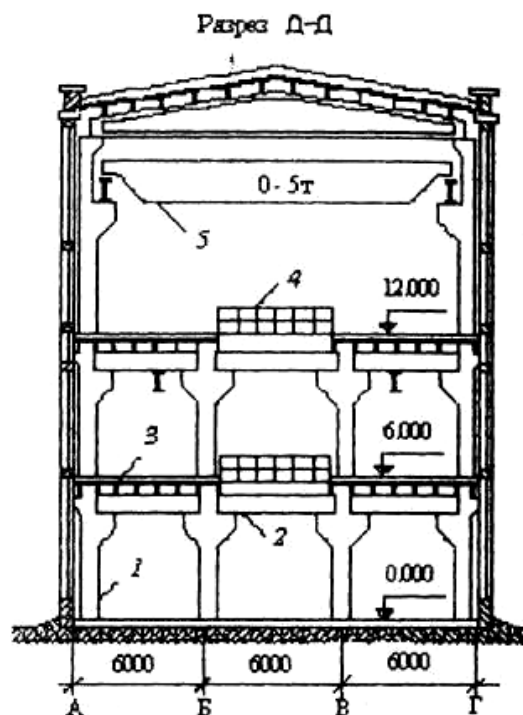
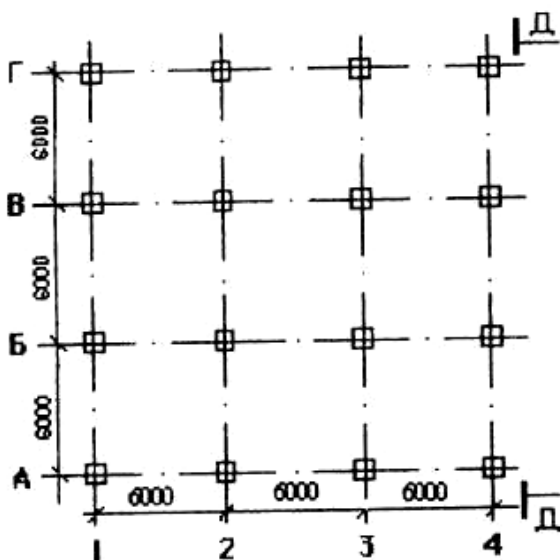


Рис. 29. Строительный план и разрез промышленного здания:

1 – колонна; 2 – ригель; 3 – плита перекрытия; 4 – ограждение; 5 – мостовой кран; 6 – балка

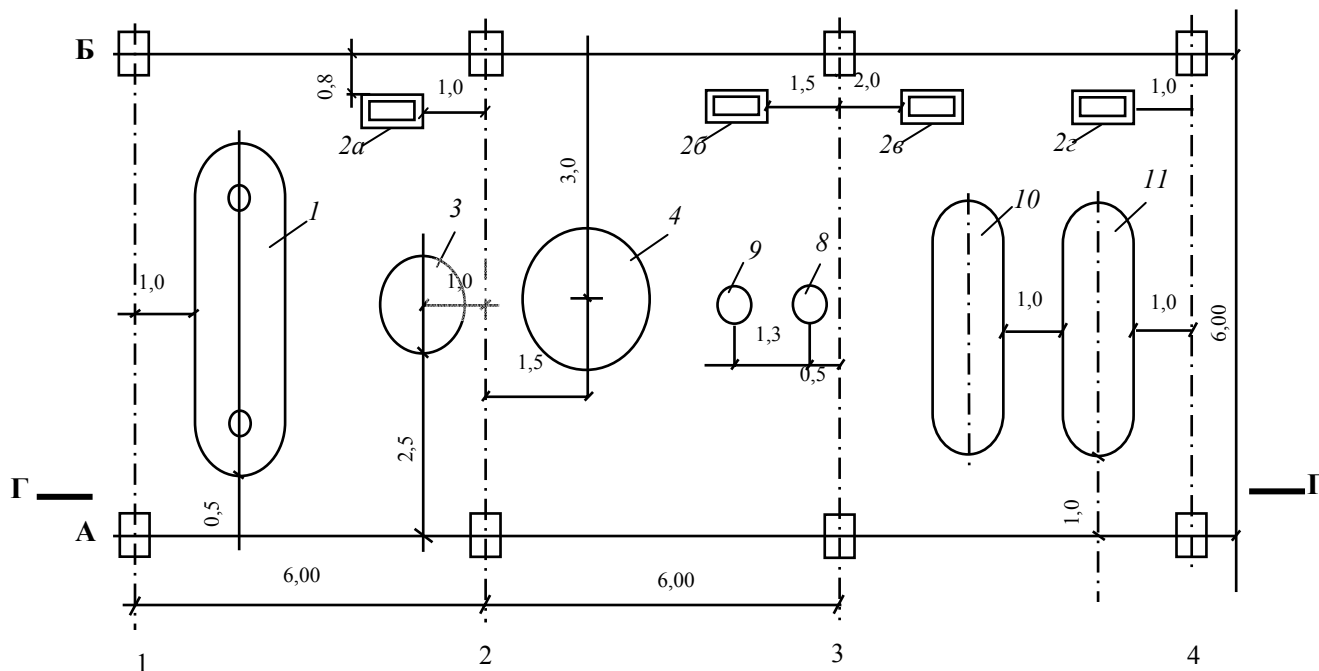


Рис. 30. Фрагмент плана на отметке 0.000:

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

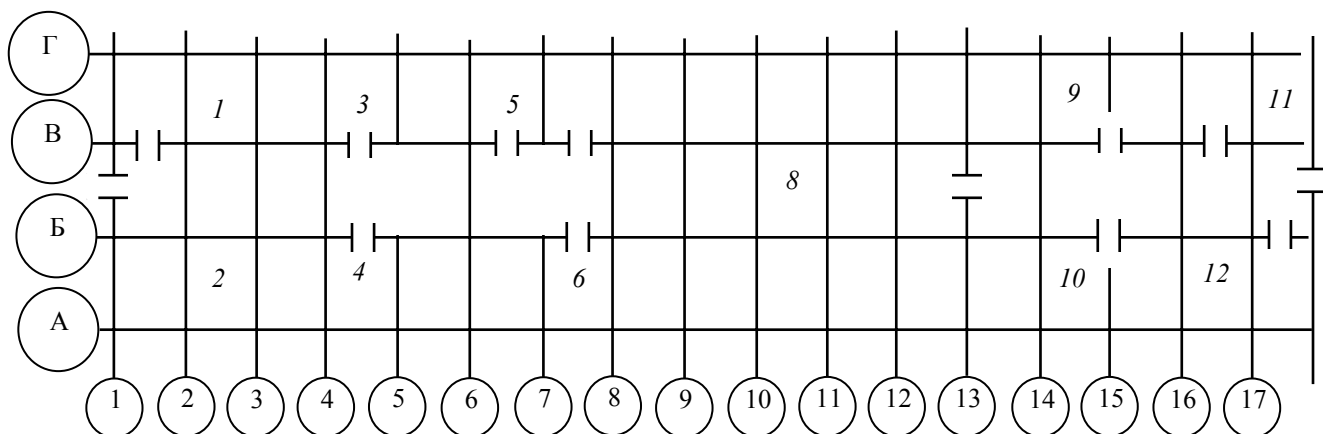


Рис. 33. Схема распределения площади цеха по помещениям:

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

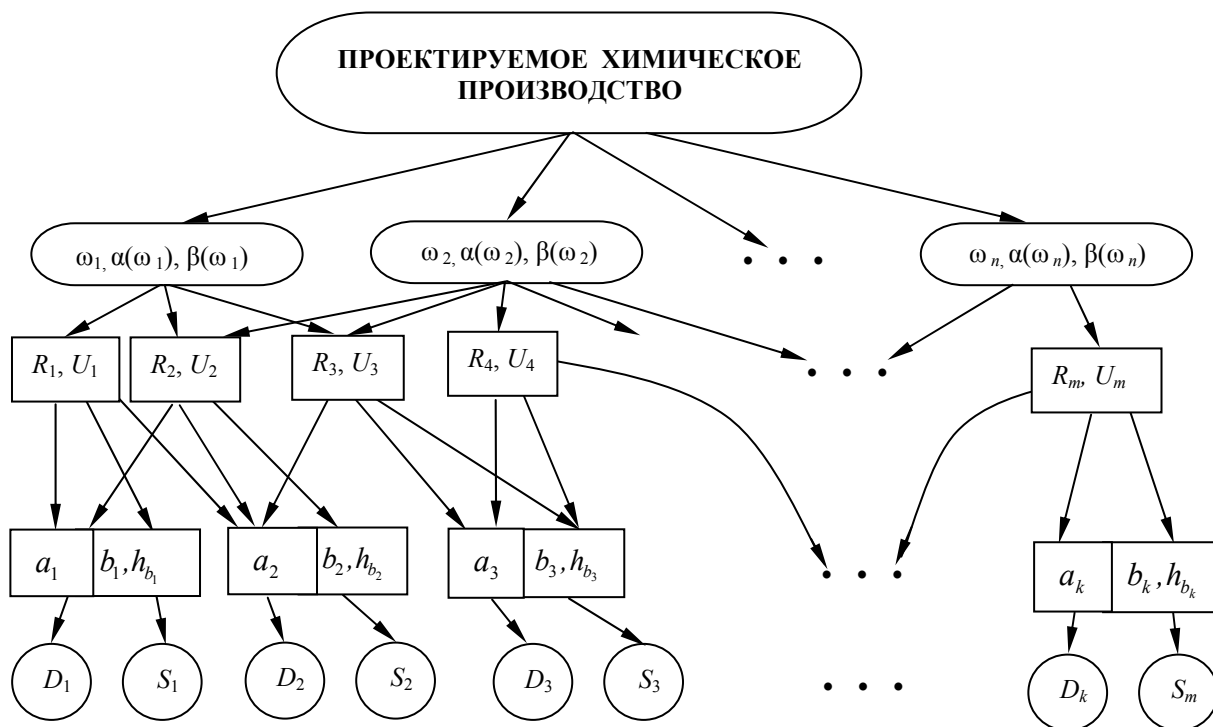


Рис. 41. Структурно-параметрическое описание химического производства

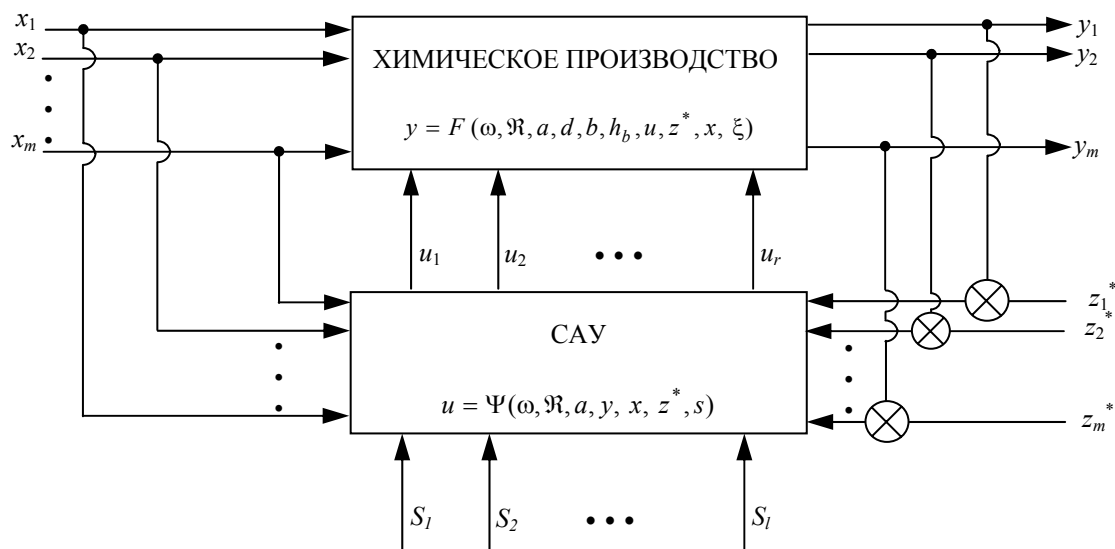


Рис. 42. Структурная схема химического производства:

x, y – векторы входных и выходных переменных (переменных состояния); u – вектор управляющих переменных;
 z^* – вектор оптимальных режимов (оптимальных заданий регуляторам АСР)

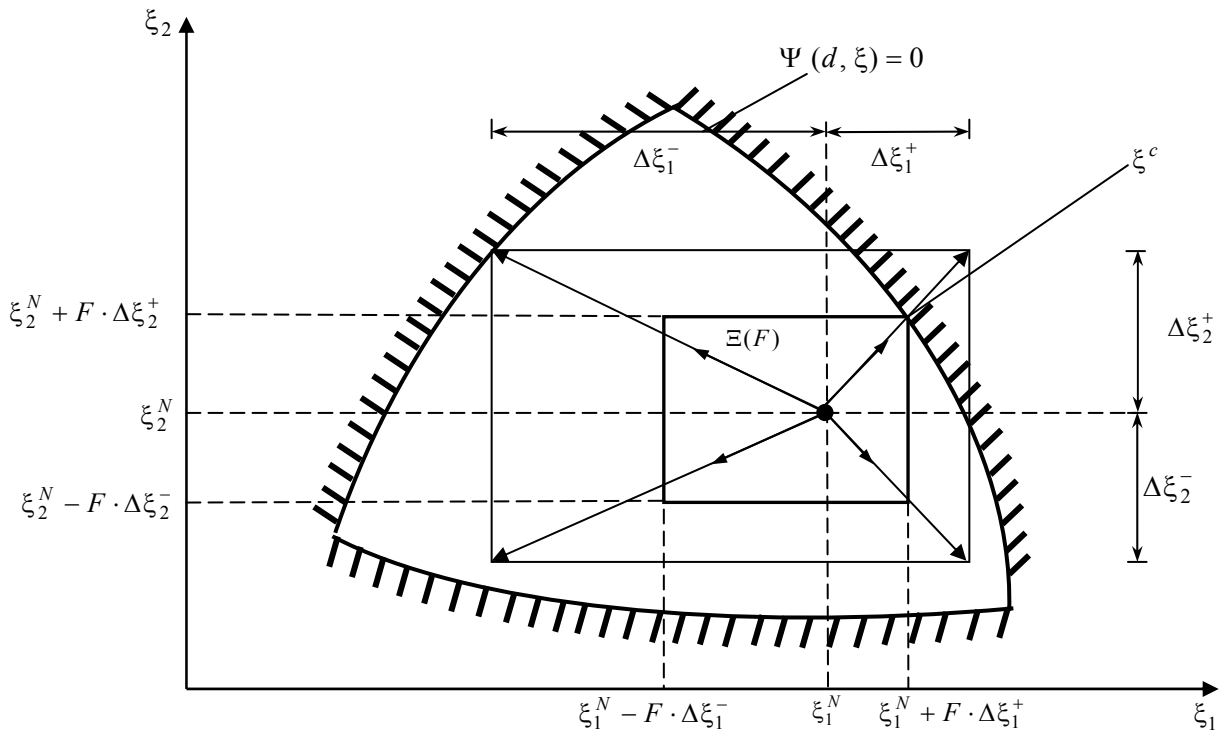


Рис. 44. Наибольшая допустимая область изменения параметров ξ

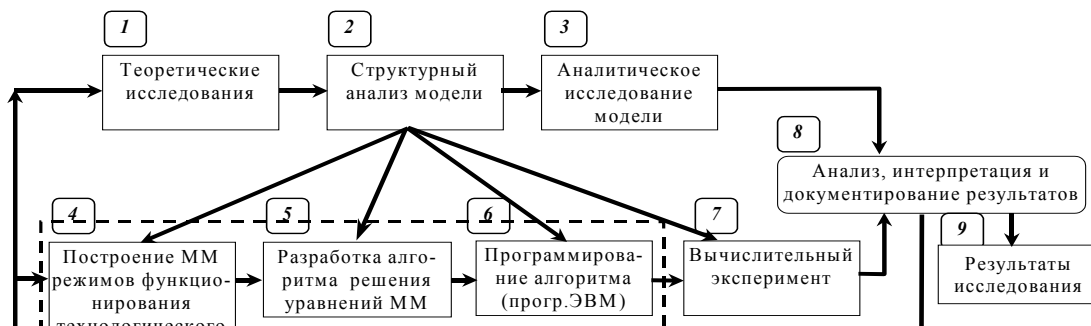


Рис. 46. Схема организации процесса компьютерного моделирования

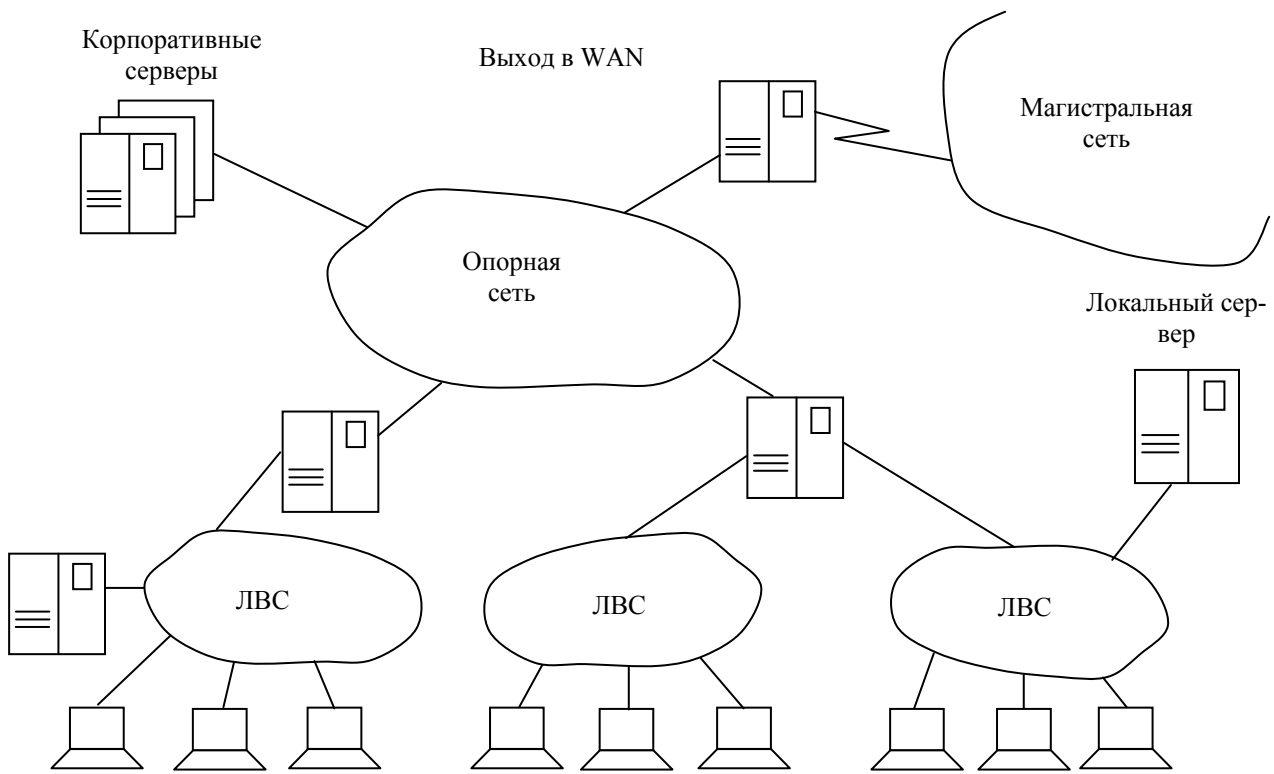


Рис. 55. Структура корпоративной сети САПР

Copy out

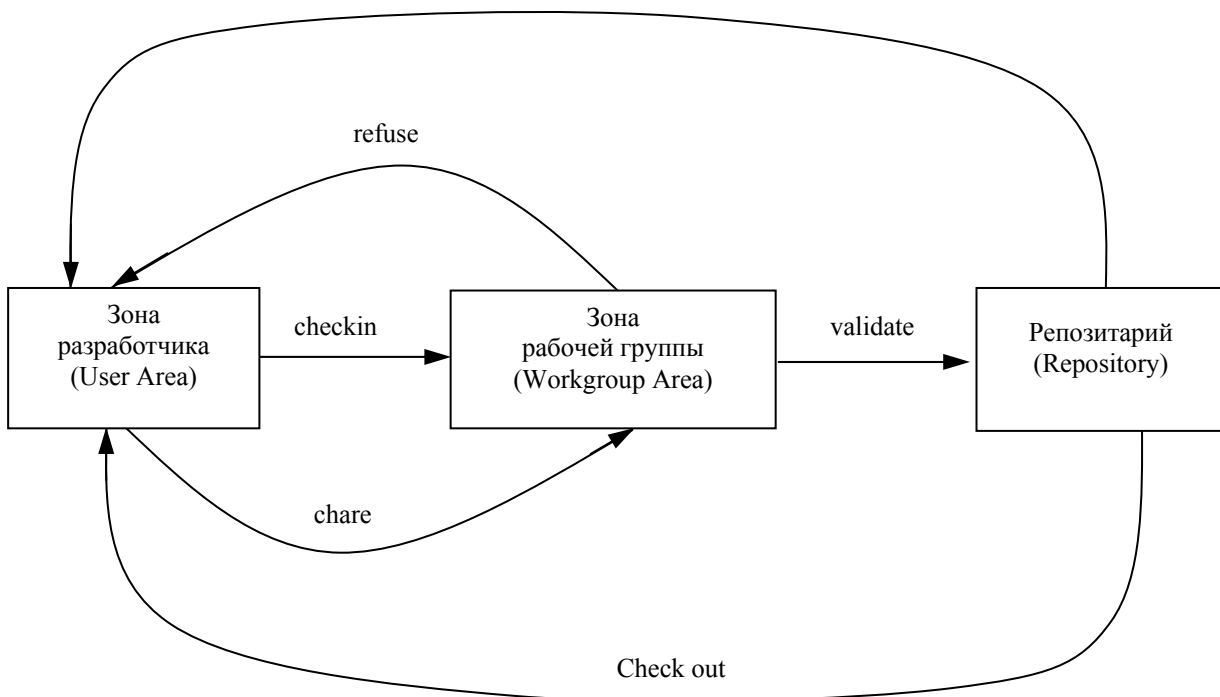


Рис. 56. Поток данных в PDM Desing Manager (САПР Euclid Quantum)

Приложение 1.Г

