

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Ивановский государственный химико-технологический университет

**АНАЛИЗ РАБОТЫ И УПРАВЛЕНИЕ ХТС**  
**( НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ)**

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Общая химическая технология»

**Составители: Б.Т. Кунин**  
**Г.И. Репкин**

Иваново 2006

УДК 66.01. (07)

Составители: Б.Т.Кунин, Г.И.Репкин

Анализ работы и управление ХТС: Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Общая химическая технология»/ Сост. Б.Т.Кунин, Г.И.Репкин; ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, Иваново, 2006, 44с.

В методических указаниях по выполнению лабораторной работы приведен теоретический материал по разделу курса ОХТ «Анализ, синтез и оптимизация ХТС». Даны пояснения по методике выполнения лабораторной работы и использованию программы управления производством на ЭВМ.

Предназначены для студентов дневного и заочного обучения, изучающих курс «Общая химическая технология».

*Авторы методических указаний выражают глубокую благодарность профессору Бескову С.В. за предоставленную программу выполнения данной лабораторной работы.*

Рецензент

доктор технических наук А.П.Ильин (Ивановский государственный химико-технологический университет)

Подписано в печать 14.03.2006. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага газетная.

Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,84. Тираж 500 экз. Заказ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ивановский государственный химико-технологический университет.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и финансов ГОУ ВПО «ИГХТУ».

153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Целью работы является изучение основных понятий и свойств ХТС. На примере производства азотной кислоты определение причин, вызвавших нарушение технологического режима производства и восстановление регламентного режима химико-технологического процесса (управление технологическим режимом химико-технологической системы).

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Химическая технология** – наука о наиболее экономичных и экологически обоснованных методах химической переработки сырья в предметы потребления и средства производства.

Как наука химическая технология имеет: предмет изучения – химическое производство; цель изучения – создание целесообразного способа производства необходимых человеку продуктов; метод исследования - экспериментальный, моделирование и системный анализ.

**Химическое производство** – совокупность процессов и операций, осуществляемых в машинах и аппаратах, предназначенных для переработки сырья путем химических превращений в необходимые продукты.

Современное химическое предприятие рассматривается как сложная химико-технологическая система (ХТС), состоящая из большого числа аппаратов, взаимосвязанных как одно целое, предназначенная для переработки исходных веществ (сырья) в продукты.

В основе разработки ХТС лежит системный подход.

**Система** – объект, взаимодействующий с внешней средой, обладающий сложным внутренним строением. Условно системы делятся на малые и большие. Малые системы обычно ограничены одним типовым процессом, большие системы представляют собой совокупность малых.

Подход к химико-технологическому производству как к *системе* предполагает наличие в ней *элементов* и *связей* между ними.

Под *элементом* понимают самостоятельную и условно неделимую единицу. В химическом производстве – это машины, аппараты и другие устройства. Элементы различаются по их назначению.

*Механические и гидромеханические элементы* производят изменение формы и размера материала, его перемещение, объединение и разделение потоков. К ним относятся: дробилки, классификаторы, смесители, фильтры, насосы и т.д.

*Теплообменные элементы* изменяют температуру потока, его теплосодержание, переводят вещества в другое фазовое состояние. Эти операции осуществляются в теплообменниках, испарителях, конденсаторах, сублиматорах.

*Массообменные элементы* осуществляют межфазный перенос компонентов, изменение компонентного состава потоков без появления новых веществ. Эти операции проводятся в дистилляторах, абсорберах, адсорберах, ректификационных колоннах, экстракторах, кристаллизаторах, сушилках.

*Реакционные элементы* осуществляют химические превращения, кардинально меняя компонентный состав потоков и материалов. Эти процессы проходят в химических реакторах.

*Энергетические элементы* осуществляют преобразование энергии и получение энергоносителей. К ним относятся турбины, генераторы, приводы для выработки механической энергии, котлы-утилизаторы тепла и т.д.

*Элементы контроля и управления* позволяют измерять параметры состояния потоков, машин и аппаратов, а также управлять процессами, меняя условия их протекания.

В каждом из перечисленных элементов могут протекать разнообразные процессы, один и тот же элемент может иметь разное назначение. Котел-утилизатор тепла охлаждает поток в технологическом процессе, он - теплообменный элемент. С другой стороны, котел-утилизатор тепла вырабатывает пар, он – энергетический элемент. В реакционный узел кроме реактора входят теплообменные аппараты и гидромеханические устройства (мешалки).

Между элементами системы всегда существуют функциональные связи в виде технологических потоков.

**Технологический поток** – это перемещение в пространстве массы и энергии. Потоки между элементами ХТС передают вещество,

энергию, информацию для управления процессом. В связи с этим различают:

*материальные потоки*, переносящие вещества и материалы;

*энергетические потоки*, переносящие энергию в любом её проявлении – тепловую, механическую, электрическую, топливо;

*информационные потоки*, используемые в системах контроля и управления процессами и производством.

## 2.2. СВЯЗИ ХТС

Последовательность прохождения потоков через элементы ХТС определяет структуру связей и обеспечивает необходимые условия работы элементов системы. В зависимости от характера соединения элементов в схему существуют следующие виды связей.

- *Последовательная связь* (рис.1-а). Последовательное соединение аппаратов предполагает, что технологический поток проходит все аппараты схемы только один раз. Такие схемы часто называют “схемы с открытой цепью”.

Последовательная переработка сырья дает возможность осуществить его более глубокую переработку. Ряд последовательно соединенных реакторов вытеснения позволяют проводить процесс при разных температурах, что приводит к увеличению степени превращения сырья по сравнению с использованием одного реактора, общий объем которого равен суммарному объёму каскада.

Последовательное соединение реакторов смешения (каскад реакторов смешения) приводит к уменьшению суммарного объёма каскада по сравнению с объёмом одного аппарата при достижении одинаковой степени превращения реагента.

- *Разветвлённая связь* (рис.1-б). Этот вид соединения аппаратов предполагает, что после некоторой операции поток разветвляется и далее отдельные потоки перерабатываются различными способами для получения разных продуктов.

- *Параллельная связь* (рис.1-в). Этот вид связи предполагает, что на каком-то этапе производства поток разделяется, и отдельные части его проходят через разные аппараты, после чего потоки объединяются. Например, если мощность некоторых аппаратов ограничена, устанавливают несколько аппаратов параллельно, обеспечивая требуемую производительность всей системы. Другое применение такой

связи – использование периодических стадий в непрерывном процессе. В этом случае поочередно работает один из параллельных аппаратов. После завершения рабочего цикла одного аппарата поток переключают на другой аппарат, а отключенный подготавливают к очередному рабочему циклу. Ещё одно назначение параллельной схемы – резервирование на случай выхода из строя одного из аппаратов, когда такое нарушение может привести к резкому ухудшению работы всей системы и даже к аварийному состоянию. Такое резервирование называют “холодным”, в отличие от резервирования, обусловленного периодичностью процесса, - “горячего”.

- *Обводная связь или байпас* (рис.1–г, д). Этот вид связи предполагает, что на какой-то стадии производства поток разделяется на несколько потоков, один из которых (главный) проходит все аппараты последовательно, а другой или другие (побочные) обходят в прямом направлении один или несколько аппаратов и затем соединяются с главным потоком. При обводном соединении аппаратов из-за уменьшения главного потока, идущего через реактор, увеличивается время пребывания реагентов в реакторе и повышается степень их превращения. Байпас широко применяют для создания оптимального температурного режима при проведении обратимых экзотермических реакций. В этом случае, главный поток, проходящий через реактор, нагревается там в результате протекания экзотермической реакции и выходит из реактора с высокой температурой. Для получения оптимальной температуры на входе в следующий реактор горячий главный поток смешивают с побочным холодным потоком. Такой характер проведения процесса позволяет получить не только оптимальную температуру в каждом реакторе, но и получить высокую концентрацию исходного реагента при оптимальных условиях.

*Обратная связь или рецикл* (рис.1–е, ж, з). Этот вид связи предполагает, что часть потока после какого-то аппарата возвращается в один из предыдущих. Так, через аппарат, в который направляется обратный поток  $V_p$ , проходит поток  $V_0$  больший, чем  $V$ , так что  $V_0 = V + V_p$ . Поток  $V$ , поступающий в циркуляционный контур, называют прямым. Поток  $V_0$ , проходящий через аппараты и определяющий режим их работы, называют главным, а идущий в рецикл поток  $V_p$ , - побочным.

Количественно величину рецикла характеризуют двумя величинами: степенью рециркуляции (или отношением рециркуляции)

$R = V_p/V_0$  и кратностью циркуляции (коэффициентом рециркуляции)  $K_p = V_0/V$ . Очевидно, что  $R = (K_p - 1)/K_p$ . Применение рецикла позволяет решить ряд важных технологических задач, повышающих эффективность функционирования ХТС, таких как более полная переработка сырья, поддержание высокой концентрации одного из реагентов и т.д.

Различают рециклы: полный, фракционный, простой, сопряженный (сложный).

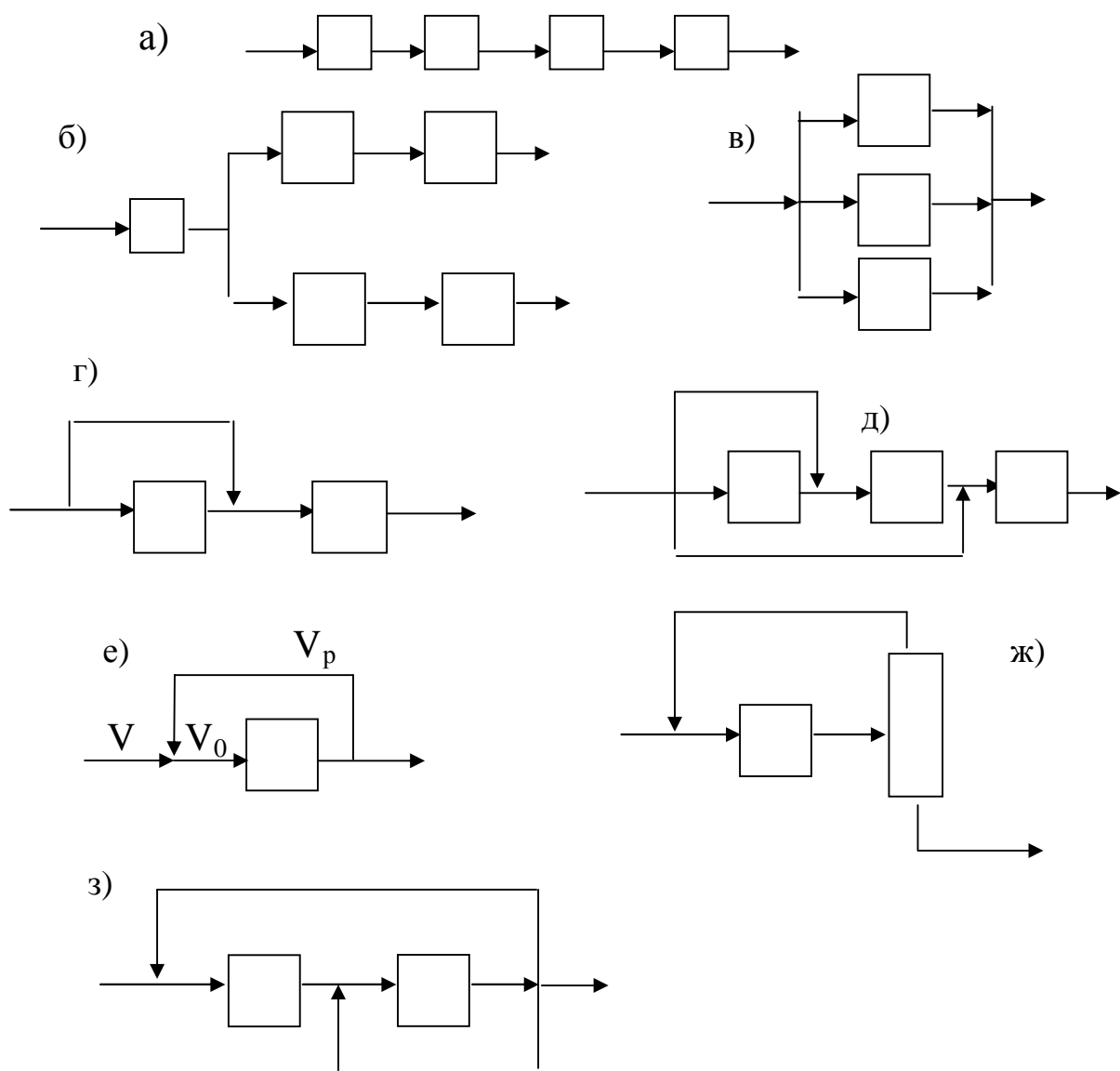


Рис.1. Связи в химико–технологической системе:

а – последовательная; б – разветвленная; в – параллельная; г, д – обводная (байпас) простая (г) и сложная (д); е, ж, з – обратная (рециркуляционная) – рецикл полный (е, з) и фракционный (ж) и сопряженный (сложный) (з).

Если выходящий из аппарата поток разветвляется, и одна его часть образует обратную связь (рис.1 – е, з), при этом составы выходящего потока и циркулирующего одинаковы, то такая связь образует полный рецикл. Такую схему используют для создания благоприятных условий протекания процесса.

Например, в цепных реакциях скорость превращения возрастает по мере накопления промежуточных активных радикалов. Если на вход реактора вернуть часть выходного потока, содержащего активные радикалы, то превращение будет эффективным с самого начала.

Фракционный рецикл (рис. 1 – ж) предполагает разделение потока на различные фракции и возврат одной из них в предыдущие аппараты.

Функционирование ХТС характеризуют состоянием ХТС, т.е. показателями всех потоков и аппаратов. Показателями потоков называют параметры, которые разделяются на параметры состояния и параметры свойства. К первым относятся: расход и концентрация компонентов в потоке, температура, давление и т.д. Ко вторым – теплоёмкость, вязкость, плотность и др.

Показателями аппаратов (элементов) являются параметры входящих и выходящих потоков, показатели управляющих воздействий, некоторые параметры состояния рассматриваемого элемента (активность катализатора, максимальная и минимальная температура в аппарате и др.).

### 2.3. СТРУКТУРА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Химическое производство состоит из множества аппаратов и устройств, связанных между собой разнообразными потоками. Исследовать его в целом при огромном многообразии составных частей – задача не только сложная, но и малоэффективная. Значительно проще заниматься изучением и исследованием не всей ХТС в целом, а последовательно отдельных её составляющих - подсистем.

Совокупность элементов, которая является самостоятельно функционирующей частью системы, рассматривают как подсистему. Подсистемы можно выделять по двум признакам – функциональному и масштабному.

*Функциональные подсистемы* обеспечивают выполнение функций производства и его функционирование в целом. Совокупность



функциональных подсистем образует структуру химического производства (рис. 2.).

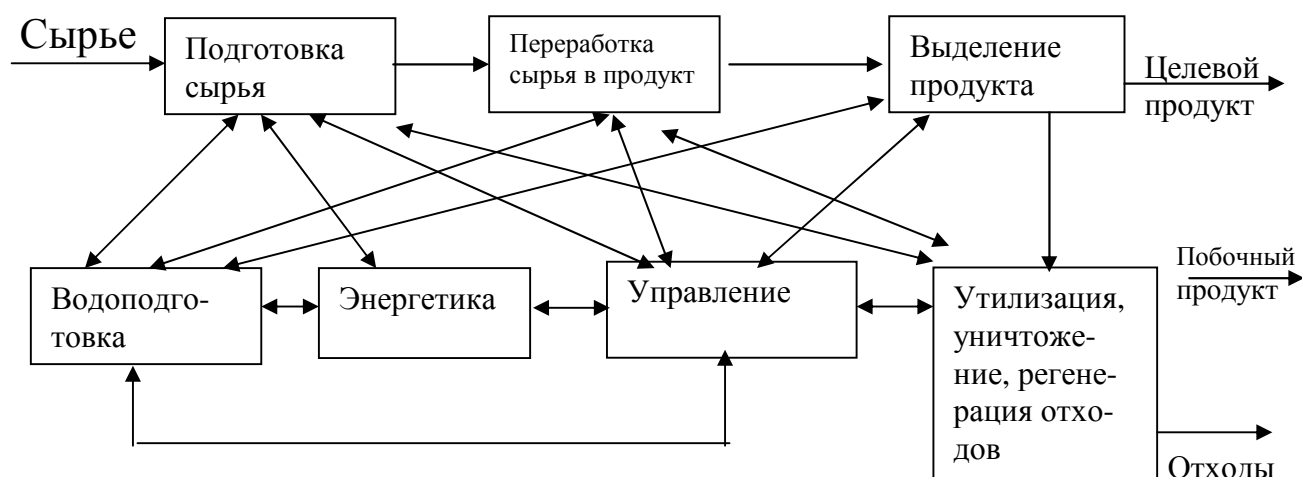


Рис. 2. Общая структура и функциональные подсистемы химического производства

Масштабные подсистемы ХТС можно систематизировать в виде их иерархической последовательности. *Иерархическая структура ХТС* приведена на рис. 3.

Первую, низшую ступень иерархической структуры ХТС составляют типовые процессы (гидродинамические, массообменные, тепловые, механические, химические), а также локальные системы управления ими, в основном системы автоматического регулирования (САР). Процесс – это явления воздействия на вещество.

Вторая ступень иерархии – это аппараты. Аппарат - это устройство для проведения процесса.

Третья - это агрегаты и комплексы, в которых осуществляются как отдельные типовые процессы, так и совокупность их, представляемая отдельными участками производства. Агрегат включает в себя несколько аппаратов.

Четвертая ступень иерархии представляет химико-технологический процесс, чаще всего это цеха, а также автоматические системы управления технологическим процессом (АСУТП).

Пятая ступень иерархии включает химические производства, состоящие из нескольких взаимосвязанных цехов, представляющих, как

правило, целое производство и автоматизированную систему его управления (АСУП).

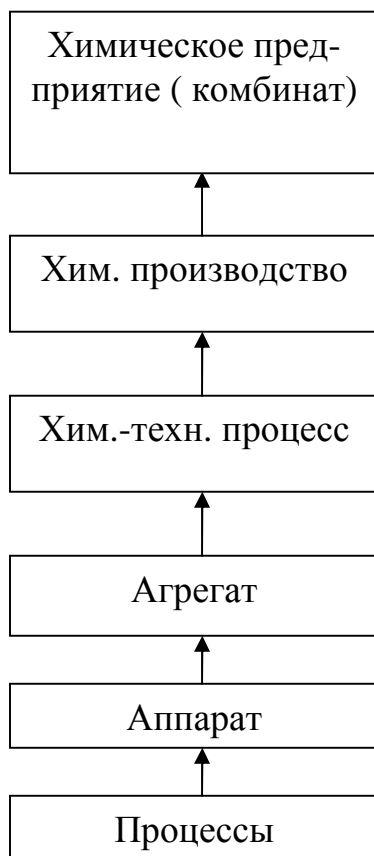


Рис.3. Иерархическая структура химико-технологической системы.

Шестая ступень – химическое предприятие в целом или несколько родственных предприятий, объединенных в комбинат (производственное объединение).

Особенностью иерархической структуры химического предприятия является не только наличие соподчинённости между уровнями (подсистемами) иерархии, но и существование взаимосвязи между подсистемами одного и того же уровня.

## 2.4. МОДЕЛИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Исследование ХТС подразумевает, что она будет представлена какой-то моделью. Уже определение системы как совокупности элементов и связей между ними говорит о целесообразности представить её графически в виде схемы. С другой стороны, качественные и количественные показатели её функционирования могут быть отражены

словесным и математическим описаниями (моделями) происходящих в них процессов.

Все модели ХТС можно разделить на два вида: качественные и количественные (рис.4).

Качественные (обобщённые) модели существуют двух видов: операционно – описательные и иконографические.

*Операционно – описательные модели* – это словесное описание процесса функционирования системы. В нем приводятся основные химические реакции, по которым осуществляется получение целевого продукта (химическая схема процесса), даётся описание процессов, происходящих в аппаратах системы, приводятся сведения о составе сырья, значениях параметров технологического режима и т.д.



Рис. 4. Классификация моделей химико-технологической системы

На практике операционно – описательная модель – это различные виды проектно-конструкторской документации, технологические регламенты.

*Иконографические модели (схемы)* всегда связаны с наглядным графическим изображением, чертежом. Существует несколько разновидностей таких схем: технологическая, функциональная, структурная, операторная.

**Технологическая схема** показывает элементы системы, порядок их соединения и последовательность технологических операций. В технологической схеме каждый элемент (аппарат) имеет общепринятое изображение, соответствующее его внешнему виду. Связи обычно изображены линиями со стрелками или даже в виде трубопроводов. Нередко расположение аппаратов соответствует их примерной расстановке в цехе. На технологической схеме кратко могут быть приведены данные о параметрах процесса. Технологические схемы используют как при эксплуатации производства, так и при его проектировании. Они входят в проектную и техническую документацию каждого производства.

**Функциональная схема** предполагает перечисление операций осуществляемых на данном производстве, каждая из которых представляется в виде прямоугольника с указанием направленности материальных потоков показанных в виде стрелок.

Представление основных операций химико-технологического процесса в виде функциональной схемы весьма удобно для его понимания. Она дает общее представление о функционировании ХТС и служит предпосылкой для аппаратурного оформления и более детальной разработки ХТС.

**Структурная схема** ХТС дает изображение всех элементов в виде блоков с указанием и обозначением всех входных и выходных потоков и технологических связей между блоками (элементами ХТС). Структурные схемы, как правило, используются для анализа и последующего расчета материальных и энергетических балансов ХТС.

**Операторная схема**, в отличие от двух предыдущих, даёт наглядное представление о физико-химической сущности технологических процессов системы. Для этого каждый элемент ХТС изображают в виде типового технологического оператора, характеризующего изменение физических параметров потоков в каждом элементе ХТС.

Технологические операторы обычно делят на основные и вспомогательные (рис. 5).

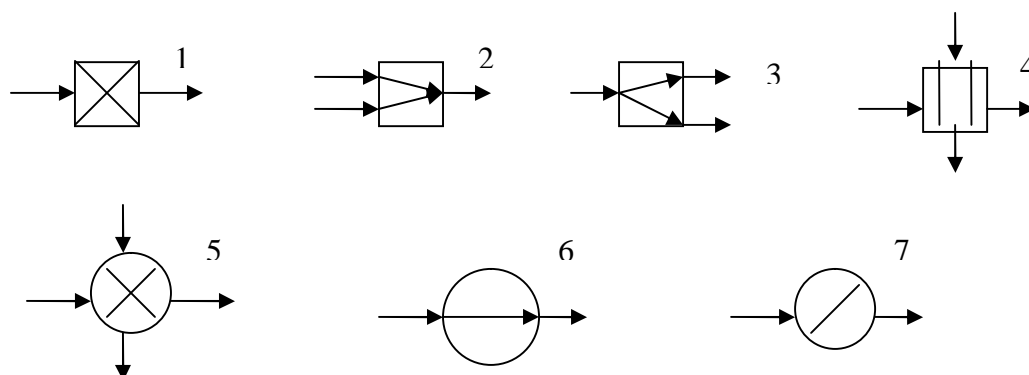


Рис.5. Технологические операторы:

**основные:** 1 - химического превращения; 2 - смешения; 3 – разделения; 4 – массообмена;

**вспомогательные:** 5 – теплообмена; 6 – сжатия или расширения; 7 – изменение агрегатного состояния

*Количественные (математические) модели* можно разделить на символические и иконографические.

*Символическая (аналитическая) модель* – это совокупность математических соотношений – формул, уравнений, неравенств. Эти соотношения позволяют определить физические параметры состояния технологических потоков на выходе системы в зависимости от факторов, воздействующих на систему: параметров входных технологических потоков ( $X$ ), параметров окружающей среды ( $V$ ), технологических ( $D$ ), и конструкционных ( $K$ ) параметров элементов системы.

Математическая модель процесса в элементе устанавливает связь параметров выходящих потоков  $Y_k$   $k$ -го элемента и входящих в него  $X_k$ . Показатели потока – это его величина, состав (концентрации), температура, давление, теплосодержание и другие параметры.

$$Y_k = F(X_k, D_k, K_k, V_k) \quad (2.1)$$

Уравнения типа (2.1) – это математические модели реактора, абсорбера, компрессора, ректификационной колонны и других аппаратов и машин.

Связи ХТС характеризуют передачу потока от элемента к элементу и в общем виде представляются уравнениями типа:

$$X_k = a_{l-k} Y_l \quad (2.2)$$

где  $a_{l-k}$  - коэффициент передачи потока из элемента  $l$  к элементу  $k$ .

В реальном производстве, как правило, существуют ограничения по каким-либо технологическим параметрам. Поэтому в математическую модель входят и выражения вида:

$$H_k(X_k, D_k, K_k, V_k) \geq 0 \quad (2.3)$$

где  $H_k$  – вектор-функция технологических ограничений параметров состояния потоков и элементов ХТС.

*Иконографические математические модели* – наглядное графическое отображение таких качественных свойств технологической структуры ХТС, по которым можно определить количественные характеристики системы.

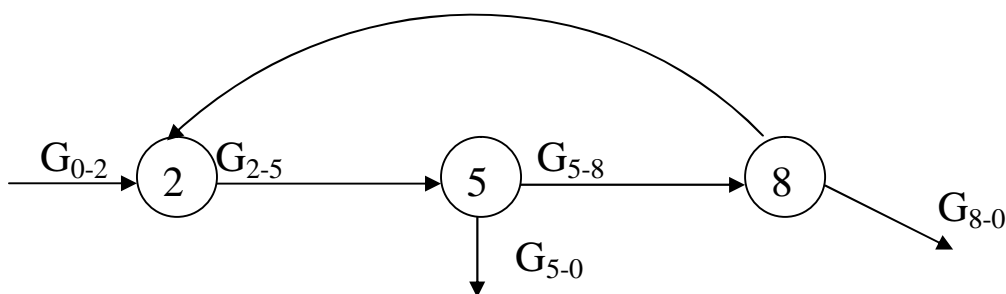


Рис. 6. Материальный потоковый граф по общим расходам

Они подразделяются на три группы: топологические модели (графы), структурные блок-схемы и сетевые модели.

**Топологические модели** представляют в виде графов. Граф – это фигура или конфигурация, образованная совокупностью некоторых точек (вершин или узлов), соединенных отрезками прямых, ломаных или кривых линий. Линии могут иметь направления (тогда они называются дугами) или не иметь его (рёбра). Для химико-технологического процесса обычно вершинами графа являются его элементы, а дуги показывают связь между элементами. На рис. 6 приведён материальный потоковый граф по общим расходам для процесса синтеза аммиака. Здесь 2,5,8 – номера вершин, соответствующих номерам аппаратов на технологической схеме, в которых изменяется общая масса веществ [2, стр.334].  $G_{i-j}$  – общий массовый расход физического потока, передаваемый из  $i$ -го аппарата в  $j$ -ый. Для входящих в ХТС и выходящих из неё потоков используют обычно индекс «0» как обозначение внешней среды.

Существует несколько типов топологических моделей ХТС, представленных в виде графов. Все зависит от того, для каких элементов системы составляется граф, какие свойства элементов и какие связи между элементами рассматриваются [4].

**Структурная блок-схема** – это иконографическая математическая модель, соответствующая определённой символической математической модели. На структурной блок-схеме каждая операция изображается в виде блока (рис.7).

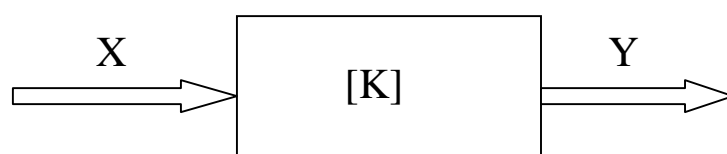


Рис. 7. Блок структурной блок-схемы

$X$  и  $Y$  – векторы параметров состояния входного и выходного технологических потоков;  $[K]$  – набор коэффициентов передачи, представленный в виде матрицы.

Каждый блок представляет набор коэффициентов передачи и передаточных функций и связывает вектор входных, для данного блока, параметров с вектором выходных параметров. Блок-схема всей ХТС представляет совокупность таких отдельных блоков.

**Сетевые модели** – это иконографические модели, отображающие организационные процессы проектирования, эксплуатации и проектирования ХТС.

## 2.5. ОБЩАЯ СТРАТЕГИЯ СИСТЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АНАЛИЗ, СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХТС

Задача создания новых производств или повышения эффективности функционирования уже существующих решается в несколько этапов, совершающихся либо одновременно, либо последовательно.

Первым уровнем решения общей задачи создания ХТС на основе анализа химической схемы процесса, кинетики и термодинамики отдельных этапов, физических свойств исходных реагентов и продуктов реакций является: построение первоначальной топологии, выбор основных аппаратов, создание математических моделей отдельных элементов и всей схемы производства.

Задачи второго и последующих уровней разработки ХТС - анализ, синтез и оптимизация - решаются в несколько этапов, совершающихся либо одновременно, либо последовательно.

Чтобы представить, как связаны этапы синтеза, анализа и оптимизации ХТС, попытаемся рассмотреть это в самых общих чертах.

Сначала создаётся (синтезируется) первоначальный вариант ХТС на основе анализа выбранной химической схемы производства. Далее производится полный расчёт этого варианта по её модели (т.е. производится анализ первоначального варианта). При этом наряду с расчётом выходных параметров ХТС определяются и значения критериев эффективности функционирования системы. В качестве критериев эффективности работы ХТС используют технологические [5], экономические, эксплуатационные и социальные критерии.

Как правило, определяющими критериями эффективности производства являются *экономические критерии*. Рассмотрим некоторые из них.

*Экономическая эффективность ХТС* определяется различными экономическими показателями, такими как: приведённые затраты, себестоимость продукта, прибыль, рентабельность и др.

*Приведённые затраты* – это затраты на сырьё, энергию и производство конкретного продукта, состоящие из полных текущих расходов на его производство и части капитальных затрат.

*Себестоимость продукта* включает в себя приведённые затраты, оплату труда и дополнительные (непроизводственные) цеховые и общезаводские расходы, т.е. полные затраты предприятия на производство продукта.

Разность между ценой продукта (после его продажи) и себестоимостью есть *прибыль* – важнейший показатель эффективности производства. *Отношение прибыли к себестоимости это рентабельность производства*. Для оценки экономической эффективности производства используются и другие показатели.

*Эксплуатационные критерии* оценки эффективности функционирования ХТС характеризуют совершенство созданного производства как промышленного объекта. К ним относятся:

- *надёжность аппаратов и производства в целом*. Надёжность характеризуют средним временем безаварийной работы либо числом аварийных остановов оборудования и производства в целом за опре-



деленный отрезок времени. Этот показатель зависит от качества используемого оборудования и правильности его эксплуатации.

- *безопасность функционирования* – это вероятность нарушений, приводящих к нанесению вреда или ущерба обслуживающему персоналу, оборудованию, а также окружающей среде, населению.

- *чувствительность к нарушениям режима и изменению условий эксплуатации* - определяется отношением изменения показателей процесса к этим отклонениям.

- *управляемость и регулируемость* - характеризуют возможность поддерживать показатели процесса в доступных пределах, определяют величину допустимых изменений условий процесса, управляющие параметры и их взаимовлияние.

*Социальные критерии* определяют условия работы обслуживающего персонала и влияние производства на окружающую среду. К ним относятся:

- *безвредность обслуживания* – следует из сопоставления санитарно-гигиенических условий для обслуживающего персонала с соответствующими нормами по загазованности помещений, запыленности, освещенности, уровню шума, температуре и т. д.

- *степень автоматизации и механизации* – определяют долю ручного и тяжелого труда в эксплуатации производства.

- *экологическая безопасность* – это степень воздействия производства на окружающую среду и экологическую обстановку в регионе.

Синтез и анализ первоначального варианта составляют первый этап оптимизации ХТС.

Результаты анализа являются основой для принятия решений на втором этапе – при повторном синтезе ХТС, но уже на более высоком уровне. Новый усовершенствованный вариант ХТС вновь анализируется, и принимаются решения о действиях на третьем этапе при создании ещё более совершенной схемы и т.д.

Для всех вариантов ХТС сопоставляются значения критериев эффективности функционирования системы. Многократное поочерёдное повторение синтеза и анализа ХТС проводится до тех пор, пока не будет получено оптимальное значение критериев эффективности функционирования ХТС, т.е. одновременно с синтезом и анализом проводится оптимизация ХТС.

Применение системного анализа при рассмотрении химического производства позволяет установить примерную последовательность исследования и анализа ХТС:

1. *Выделение элементов, которые определяют интересующие или необходимые свойства ХТС.*

2. *Установление зависимостей выходных потоков от входных для каждого элемента. Поскольку в элементах ХТС происходит превращение потоков, то их описание основывается главным образом на физико-химических и физических закономерностях протекающих в них процессов.*

3. *Определение технологической топологии системы, т.е. выбор характера связей между аппаратами и установление оптимального порядка их соединения в схеме.*

4. *Установление значений технологических параметров ХТС (степени превращения сырья, степени разделения химических компонентов, констант скоростей химических реакций, коэффициентов массо - и теплопередачи и т.д.)*

5. *Выбор параметров технологических режимов в аппаратах (элементах) ХТС (температуры, давления, активности применяемого катализатора и т.д.), которые влияют на скорость технологического процесса, выход и качество получаемого продукта.*

6. *Определение параметров технологических потоков, обеспечивающих работу системы в заданном режиме (массовый расход, концентрация веществ в потоке, их температура и давление и т.д.)*

Таким образом, определяется структура системы (ХТС) - совокупность элементов и связей, математические описания которых создают основу количественных расчетов при исследовании системы.

## **2.6. АНАЛИЗ ХТС**

### **2.6.1. ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ХТС**

Анализ ХТС заключается в получении сведений о состоянии ХТС, показателях её эффективности и функционирования системы, а также о влиянии на эти данные химической схемы, структуры технологических связей, свойств и состояния элементов и подсистем, условий эксплуатации.

Состояние или режим ХТС определяется параметрами (показателями) потоков (связей) и состоянием аппаратов (элементов).

Первым шагом в анализе ХТС является определение параметров потоков ХТС заданной структуры и заданного состояния её элементов на основе расчётов материальных и тепловых балансов. Имея результаты балансовых расчётов, можно провести и другие расчёты – эффективности использования сырья и энергии, технологических показателей, экономических показателей, некоторых социальных показателей. Эксплуатационные показатели определяются в основном из реакции системы на те или иные возмущения в процессе (изменение состава и количества сырья, энергетического обеспечения, состояния аппаратов, включая выход из строя некоторого оборудования, а также воздействия на режимы отдельных аппаратов и узлов). При этом надо учитывать, что ХТС может обладать свойствами, не присущими отдельным её элементам. Рассмотрим некоторые из них.

### 2.6.2. СВОЙСТВА ХТС

*Зависимость режима одного аппарата (элемента)  
от режимов других.*

Очевидно, что изменение режима работы аппарата, т.е. изменение состояния потоков, выходящих из него и входящих в последующий, изменяет условия работы последнего, а, следовательно, и всей схемы.

Режим аппарата может зависеть от режимов не только в предыдущем, но и в последующем аппаратах. Это возможно, например, при наличии рециклов, когда поток согласно схеме передаётся в предыдущий аппарат.

*Оптимальный режим работы одиночного аппарата и в схеме  
могут отличаться.*

В производстве азотной кислоты первая стадия – окисление аммиака  $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 = 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$  идёт в газовой фазе с большой скоростью и с небольшим увеличением объёма. Повышение давления в этом случае казалось бы нецелесообразно. Однако следующая стадия  $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$  протекает значительно медленнее и с уменьшением объёма. Для её ускорения и более глубокого превращения NO в NO<sub>2</sub> повышение давления явно целесообразно. Поэтому реальное производство часто проводят при повышенном давлении для интен-

сификации наиболее медленной стадии процесса и всего процесса в целом.

*Неоднозначность режимов и их устойчивость.*

Обратные связи, имеющиеся в системе, могут привести к появлению неоднозначности режимов и неустойчивости некоторых из них. Рассмотрим систему – реактор с внешним теплообменником (рис. 8). Исходная реакционная смесь нагревается в теплообменнике и поступает в реактор, где проводится экзотермическая реакция. Выходящий из реактора более горячий поток охлаждается, отдавая своё тепло исходной реакционной смеси. Пусть по каким-то причинам температура на выходе из реактора  $T_K$  повысилась. Это может произойти из за увеличения концентрации, или увеличения входной температуры  $T_0$ , или другой внешней причины. Источник возмущения может быть кратковременный, и условия процесса быстро восстанавливаются.

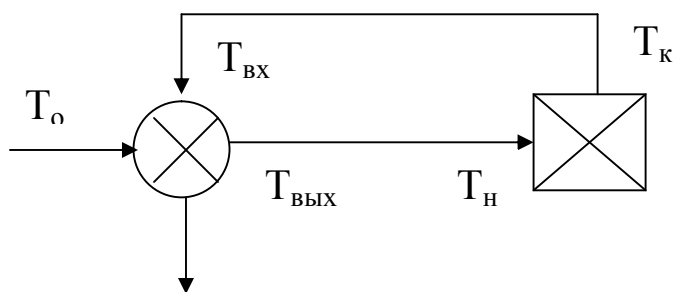


Рис. 8. Схема реактора с внешним теплообменником

Тем не менее, увеличение  $T_K$  приведёт к дополнительному нагреву исходной реакционной смеси, и температура на входе в реактор  $T_H$  возрастет. Последнее приведёт к увеличению скорости реакции, тепловыделения в реакторе и дальнейшему возрастанию  $T_K$ , что ещё больше усилит нагрев исходной смеси, и  $T_H$  станет ещё выше. Температура на выходе  $T_K$  увеличится дополнительно, и такая круговая последовательность взаимного нагрева входного и выходного потоков может продолжаться далее со значительным нарастанием температуры, даже если источник первоначального возмущения убран. Если же возмущение режима привело к понижению температуры  $T_K$ , то будет происходить охлаждение системы. Описанная круговая последовательность взаимного нагрева или охлаждения обусловлена связью входящего и выходящего потоков – обратной связью между ними, т.е. обусловлена внутренней структурой схемы и является её свойством.

*Возможность возникновения нестационарных режимов.*

Наличие обратных связей в ХТС может привести к тому, что некоторые режимы невозможно осуществить. Это характерно, в частности, для схемы с фракционным рециклом, состоящей из реактора и аппарата выделения продукта (например, ректификационной колонны, рис.9).

На вход подаётся исходное вещество в количестве  $G_H$ . После реактора продукты полностью отделяются, а непрореагировавшее вещество возвращается в реактор  $G_{\text{рец}}$ . Общее массовое количество вещества на входе  $G_0 = G_H + G_{\text{рец}}$ , суммарный объёмный расход  $V_0 = V_H + V_{\text{рец}}$ , а степень превращения в реакторе  $X$ . Схема будет работать в стационарном режиме в том случае, если  $V_0$  – постоянно, а  $C_0 = C_H = C_{\text{рец}}$ . В противном случае стационарного режима существовать не будет.

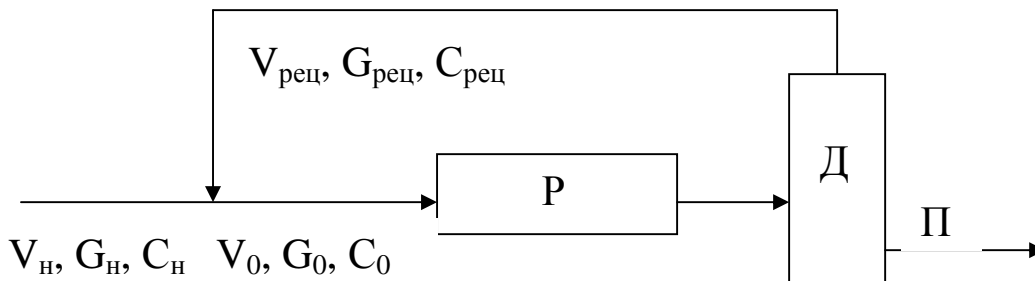


Рис. 9. Система с фракционным рециклом:  
Р – реактор; Д – система выделения продукта; П – продукт

Например, в РИС-Н протекает реакция первого порядка, идущая без изменения объёма. Тогда  $t = \frac{V_p}{V_o} = \frac{C_0 X}{k C_0 (1-X)}$ , откуда  $X = \frac{kt}{1+kt}$ , т.е. при  $V_o = \text{const}$ , степень превращения реагента в реакторе определённого объёма постоянна.

а) Если на стадии разделения продукта и исходного вещества в рецикл уходит поток с концентрацией реагента меньше, чем в прямом потоке  $C_{\text{рец}} < C_H$ , то  $C_0$  на входе в реактор понижается, что при известном значении степени превращения приводит к понижению концентрации реагента на выходе из реактора, а, следовательно, и на стадии

разделения, т.е.  $C_{\text{рец}}$  понижается еще больше, и т.д. Все это приводит к затуханию процесса.

б) Если в результате разгонки продукта и реагента, состоящего из дисперсной и дисперсионной среды, концентрация реагирующего компонента  $C_{\text{рец}}$  возрастет (это может произойти в результате удаления с продуктом значительной части дисперсной среды - растворителя или инертного компонента), то после смешения потоков  $C_{\text{н}}$  и  $C_{\text{рец}}$ , концентрация  $C_0$  – возрастет. При постоянном значении  $X$  это приведет к росту концентрации реагента на выходе из реактора, а, затем, и к очередному росту  $C_{\text{рец}}$ , и т.д. Схема будет работать в нестационарном режиме. При этом надо учитывать сложность получения и стационарного теплового режима работы схемы.

Рассмотренные случаи взаимодействия элементов в схеме, приводящих к появлению качественно новых свойств ХТС, свидетельствуют о необходимости анализа функционирования ХТС.

#### *Эффективность использования материальных ресурсов.*

Одним из основных показателей использования сырья (а также энергии, энергоносителей, вспомогательных материалов) является **расходный коэффициент**, показывающий количество затраченного сырья (энергии, энергоносителей, вспомогательных материалов) на производство единицы продукции. Различают теоретический расходный коэффициент, определяемый из стехиометрического уравнения реакции образования продукта из исходных веществ при полном их превращении, и практический (или просто «расходный коэффициент»), т.е. реально достигнутый в производстве. Отношение их показывает *степень использования сырья*.

Основные причины различия теоретического и реального расходных коэффициентов: неполнота превращения исходного вещества в продукт, образование побочных веществ, неполнота выделения продукта, потери промежуточных компонентов и продукта, наличие примесей в сырье, использование части сырья на вспомогательные цели. Значения расходных коэффициентов, как правило, входят в техническую документацию на производстве.

#### *Эффективность организации процесса в ХТС*

Этот анализ в совокупности с оценками эффективности использования сырья и энергии является частью характеристики химического производства.

### *Предельная технологическая эффективность ХТС*

Это эффективность системы, в которой при принятой совокупности условий проведения химико-технологического процесса достигаются максимально возможные (предельные) значения конверсии сырья и селективности, основанные на данной конкретной химической схеме превращения исходного сырья. Для установления предельных показателей процесса можно определить равновесную (теоретически возможную) конверсию сырья, равновесные концентрации компонентов в продуктах превращения и селективность химического процесса, а также равновесные концентрации компонентов в контактирующих фазах. Они и определяют предельные показатели химико-технологического процесса. Степень приближения к этим предельным показателям является характеристикой совершенства разрабатываемой ХТС.

## **2.7. СИНТЕЗ ХТС**

Синтез, или построение, ХТС заключается в определении основных технологических операций и их последовательности, выборе аппаратов и установлении связей между ними, определении параметров технологических режимов отдельных аппаратов и системы в целом, обеспечивающих наилучшие условия функционирования ХТС.

При разработке научных основ создания химического производства используют несколько принципов синтеза ХТС.

*Декомпозиционный принцип* – заключается в том, что сложное химическое производство делят на ряд более простых подсистем, а затем каждая такая подсистема разделяется до уровня отдельных аппаратов (элементов). Вместо общей задачи синтеза ХТС решается ряд подзадач, для которых отыскиваются определённые технологические решения, соответствующие современному уровню аппаратного оформления химико-технологического процесса. Затем, используя выбранную технологическую топологию производства, осуществляется объединение аппаратов и подсистем в единое целое и оптимизация работы всей ХТС.

*Эвристический принцип* – заключается в использовании проектировщиками интуитивно-эвристического метода, который позволяет высококвалифицированным специалистам при технологическом проектировании химических производств интуитивно на основе собст-

венных знаний, мирового опыта и имеющихся стандартных разработок выбирать наиболее удачные варианты решения задачи, без полного перебора всех альтернативных вариантов.

*Интегрально-гипотетический принцип* – основан на последовательных разработке (синтезе), анализе и оптимизации гипотетической обобщённой структуры синтезируемой ХТС, представляющей собой функциональное объединение всех возможных альтернативных вариантов технологической топологии и аппаратурного оформления.

*Эволюционный принцип* – основан на создании сначала простейшего исходного варианта технологической топологии синтезируемой ХТС, который анализируется. Затем, с учетом результатов анализа, ХТС снова синтезируется на более высоком уровне, опять анализируется, синтезируется и оптимизируется и так до тех пор, пока не будут достигнуты оптимальные значения критериев эффективности разрабатываемой ХТС.

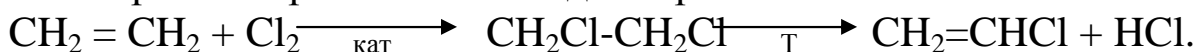
При синтезе ХТС для получения оптимальных значений используются некоторые наборы решений, обоснованных теорией химико-технологических процессов, созданных на основе инженерных проработок и проверенных практикой. Использование этих решений позволяет достичь лучших значений определённых показателей ХТС. К таким решениям (концепциям) относятся вопросы максимального использования сырьевых и энергетических ресурсов, минимизации отходов, эффективного использования оборудования.

### **2.7.1. Концепция оптимального использования сырьевых ресурсов**

В большинстве химических производств затраты на сырьё составляют значительную часть себестоимости продукции. Концепция оптимального использования сырьевых ресурсов направлена на максимальный выход целевого продукта, максимальное превращение сырья в используемые, полезные продукты.

Рассмотрим некоторые пути достижения этой цели.

*Выбор схемы процесса* – важнейший этап, на котором можно добиться улучшения использования сырьевых ресурсов. Например, винилхлорид получают в две стадии – хлорирование этилена и дальнейший пиролиз образовавшегося дихлорэтана:





Выход винилхлорида по этилену – 90%, по хлору – 50%. В результате проведения процесса в качестве отхода образуется HCl.

Перейдя к одностадийной схеме окислительного гидрохлорирования  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2 + \text{HCl} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{кат}} \text{CH}_2 = \text{CHCl} + \text{H}_2\text{O}$ , удалось разработать процесс с 95%-м выходом продукта по обоим исходным реагентам и значительно понизить количество отходов.

**Избыток одного из реагентов** – как правило, более дешевого и доступного или образованный путем возврата непрореагировавшего реагента в процесс. При этом рассматриваются два фактора влияния избытка реагента на увеличение выхода продукта.

Термодинамический фактор заключается в том, что избыток одного из реагентов увеличивает максимальное, равновесное превращение другого. Так, в паровой конверсии метана  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$  при соотношении реагентов  $\text{CH}_4: \text{H}_2\text{O} = 1:1$  равновесная степень превращения метана составляет 0,58. При соотношении  $\text{CH}_4: \text{H}_2\text{O} = 1:4$  равновесная степень превращения метана 0,96.

Кинетический фактор обусловлен особенностями механизма и кинетики протекающего процесса. При окислении аммиака согласно реакции  $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 = 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$  и стехиометрическом соотношении реагентов  $\text{O}_2: \text{NH}_3 = 1,25:1$  реакция протекает во внешнедиффузионной области и лимитируется переносом аммиака и наличием кислорода на поверхности катализатора, концентрация которого ( $\text{O}_2$ ) мала. В этих условиях  $\text{NH}_3$  окисляется в основном до азота. Необходим избыток кислорода, чтобы он вытеснил аммиак с поверхности катализатора, и тогда при соотношении  $\text{O}_2: \text{NH}_3 = 1,8:1$  реакция идет селективно с образованием NO.

**Регенерация с рециклом** – организуется с целью восстановления первоначальных свойств абсорбентов, адсорбентов или других веществ, которые могут использоваться многократно. Например, в схеме очистки азотоводородной смеси от  $\text{CO}_2$  в производстве аммиака используют поглотитель – моноэтаноламин (МЭА) (рис.10). После абсорбции  $\text{CO}_2$  раствором МЭА последний подогревают и направляют в десорбер. В нем выделяется  $\text{CO}_2$ , а регенерированный раствор возвращают на абсорбцию в колонну 1.

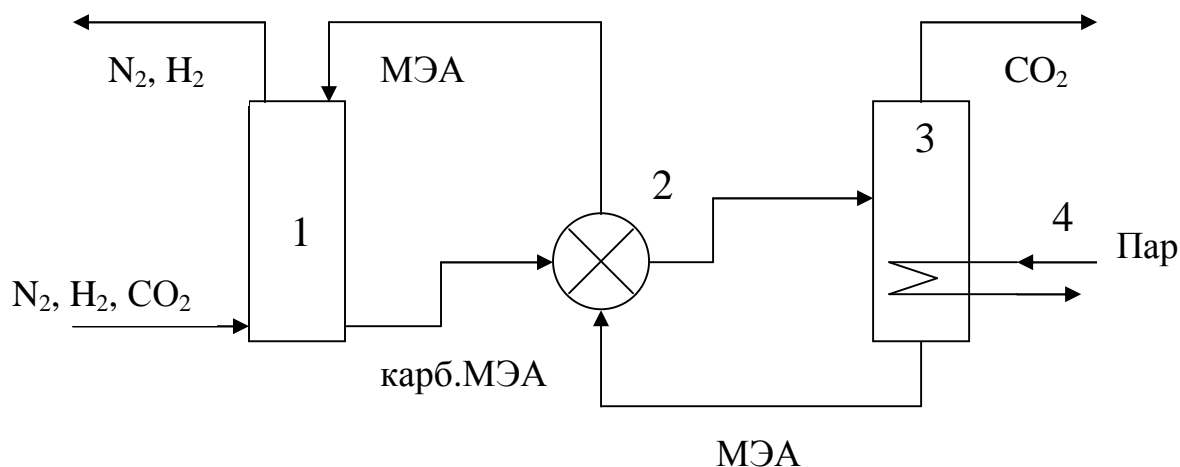


Рис. 10. Схема абсорбции  $\text{CO}_2$  из азотоводородной смеси:

1 – абсорбционная колонна; 2 – рекуперативный теплообменник; 3 – десорбционная колонна; 4 – подогреватель; МЭА – моноэтаноламин; карб.МЭА – карбонизированный моноэтаноламин

В процессах умягчения воды ионообменным методом после «проскока» солей жёсткости ионообменные смолы регенерируют с целью восстановления их обменной способности.

**Фракционный рецикл** – используют при неполном превращении исходных реагентов. Идея этого приёма заключается в том, что после реактора реакционная смесь отделяется от продуктов и снова направляется на переработку. Типичный пример – синтез аммиака, в котором после конденсации и выделения аммиака оставшуюся азотоводородную смесь снова направляют в реактор. В этих случаях при неполном превращении реагентов в реакторе общее превращение исходного компонента в системе будет полным.

**Противоточный контакт фаз** – решение, обеспечивающее максимальную движущую силу гетерогенных процессов в диффузионной области.

**Утилизация отходов** – позволяет получить дополнительные полезные продукты из побочных продуктов реакции, практически всегда образующихся вместе с целевым продуктом. Например, в производстве экстракционной фосфорной кислоты много отходов от минеральных составляющих апатита в виде сульфата кальция, называемого фосфогипсом. Его часто складировать в отвалы, занимающие большое пространство. Этот фосфогипс значительно загрязнён и имеет кристаллическую структуру, неудобную для его дальнейшего использования. Перекристаллизация и обработка паром этого отхода произ-

водства фосфорной кислоты позволяет получить различные строительные материалы.

**Альтернативное сырьё.** Использование невозобновляемого сырья заставляет искать не только способы его полного использования, но и другие сырьевые источники. Использование отходов других производств – одно из направлений расширения сырьевых источников. Другое направление – альтернативные источники первичного сырья.

Уголь является наиболее распространённым углесодержащим полезным ископаемым. Интерес к нему как к альтернативному источнику сырья за последние годы все возрастает. Наибольшее значение опять приобретают гидрогенизация и газификация угля с целью получения жидких углеводородов и синтез-газа.

**Комбинированное производство.** Важное значение при проектировании (синтезе) производств имеет комплексная переработка сырьевых ресурсов и возможность создания комбинированных химико-технологических схем (производств). Характерным примером является совместное производство карбамида  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  и аммиака  $\text{NH}_3$ . Исходным сырьем для обоих продуктов является природный газ и воздух. Целесообразно использовать комбинированные схемы в тех случаях, когда продукты одного производства являются сырьём для другого.

## 2.7.2. Концепция оптимального использования энергии

Концепция оптимального использования энергетических ресурсов направлена на минимизацию энергетических и тепловых затрат.

Рассмотрим некоторые способы решения этой концепции.

**Регенерация тепла и энергии.** В ряде случаев для проведения процесса в реакторе необходимо нагреть поток. При проведении экзотермических реакций входящий поток может быть нагрет теплом выходящего из реактора потока, т.е. в подобных случаях необходимо учитывать возможность использования перекрёстных схем (рис.11).

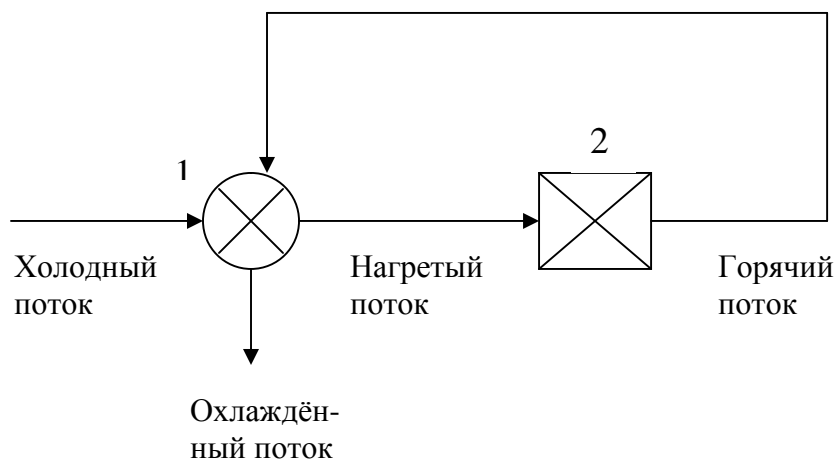


Рис. 11. Перекрёстная схема организации тепловых потоков:  
1 – теплообменник; 2 – реактор

Регенерацию энергии можно также осуществлять в процессах, протекающих под давлением. Оставшийся после проведения процесса газ под давлением сбрасывают на газовую турбину, находящуюся на одном валу с компрессором. Расходы энергии для привода компрессора в этом случае будут значительно уменьшены.

**Утилизация тепла и энергии.** Речь идёт о тепле или энергии потока используемых для выработки тепловых, электрических и других энергетических ресурсов, применяемых не в самом производстве.

Так, при проведении сильно экзотермических процессов (химических реакций), тепловую энергию потоков можно использовать для выработки пара высокого давления в котлах-утилизаторах, а потом и электрической энергии.

**Альтернативные источники энергии.** Традиционные источники энергии: пар, горячие теплоносители, электроэнергия, вырабатываемые при потреблении топливных ресурсов. Перспективными (альтернативными) являются легко возобновляемые и более дешёвые источники, такие, например, как тепло, вырабатываемое атомными станциями, солнечная энергия, энергия ветра и др.

**Энерготехнологические схемы.** Химико-технологическая схема, включающая энергетический узел, потребляющий топливо и вырабатывающий энергию для компенсации необратимых потерь с целью поддержания технологического режима и обеспечения функционирования ХТС, называется энерготехнологической схемой. Такая система не потребляет энергию извне, энергетически она автономна, потребляя необходимое количество топлива.

Так, в современном производстве азотной кислоты под давлением один из сырьевых компонентов – воздух – сжимается в компрессоре и направляется в технологические аппараты. После всех превращений остается практически только азот как отходящий газ под давлением. Потенциал отходящего газа недостаточен, чтобы полностью компенсировать затраты на сжатие исходного воздуха, хотя его можно использовать для частичного возмещения затрат. Увеличить энергию отходящего газа как рабочего тела турбины можно повышением его температуры. Для этого в линию отходящего газа подают топливо (природный газ) и сжигают его с остатками кислорода. Это и есть энергетический узел.

**Использование вторичных энергетических ресурсов.** Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) это энергетический потенциал продукции, отходов, промежуточных продуктов, который образуется в технологических агрегатах и не используется в этом же производстве, но может быть частично или полностью применен для **энергоснабжения** других производств. Вторичные энергетические ресурсы не уменьшают потребления энергии (теплоты) в самом производстве, однако экономия достигается в других энергопотребляющих установках.

В зависимости от вида запасенной потоком энергии выделяют следующие виды ВЭР:

**Горючие (топливные) ВЭР** – топливные вторичные продукты и отходы, получаемые в технологическом процессе, которые, как правило, содержат  $H_2$ ,  $CO$  и другие горючие компоненты. Примерами могут служить производства аммиака и метанола (продувочные газы содержат 70-85%  $H_2$ ), многие производства в нефтепереработке и нефтехимии (отходящие газы содержат углеводороды, водород).

Горючие ВЭР часто применяют как печное топливо, добавляемое к основному. Основные трудности возникают из-за наличия примесей, которые могут загрязнять окружающую среду, корродировать аппаратуру, осаждаться на поверхности водонагревательных труб.

**Тепловые ВЭР** – теплота отходящих газов, рабочих тел систем охлаждения, отработанного пара и горячей воды, а также теплота попутно вырабатываемого газа и нагреваемой воды (например, в котлах –утилизаторах и экономайзерах). Их **используют** для получения непосредственно теплоты, передавая её соответствующим теплоносителям

(подогревают потоки, вырабатывают пар). В зависимости от температуры их подразделяют на высоко- и низкопотенциальные.

Высокопотенциальные тепловые ВЭР с температурой выше 120°C применяют для выработки пара в котлах-утилизаторах.

Низкопотенциальные тепловые ВЭР с температурой 50-120°C используют в основном для работы энергетических установок (например, подогрев воды для котельных установок).

**ВЭР избыточного давления, или силовые** – газы и жидкости, покидающие тепловые агрегаты и обладающие потенциальной энергией (под давлением). Эти ВЭР как правило, используют в турбинах для привода рабочих машин и для выработки энергии.

### **2.7.3. Концепция эффективного использования оборудования**

Концепция направлена на минимизацию капитальных затрат на технологическое оборудование путём создания условий протекания в нем процессов с максимально возможной интенсивностью.

Для решения этой концепции используются различные решения.

**Выбор процесса**, т.е. из нескольких вариантов проведения процесса выбирается более интенсивный, протекающий с большей скоростью. Например, переход от алюмосиликатного катализатора гидрокрекинга углеводородов к цеолитному позволил повысить скорость процесса более чем в 300 раз. Вместо процесса в реакторе большого объема с псевдоожиженным слоем организован процесс в режиме вертикального пневмотранспорта катализатора реакционной смесью. Реактор представляет собой трубу диаметром 250мм и высотой несколько десятков метров.

**Оптимизация процесса** - приведёт к увеличению интенсивности работы аппаратов.

**Организация процесса в аппарате.** Речь идёт о выборе способа проведения процесса. Теплообмен и контакт фаз может быть организован в противотоке или прямотоке, гетерогенно-каталитическая реакция с неподвижным и движущимся слоем катализатора, разделение жидкостей ректификацией или дистилляцией и т.д.

**Конструктивные решения** аппаратов, позволяющие уменьшить объём их непроизводительных частей.

**Увеличение единичной мощности агрегата.** Практика показывает, что увеличение размеров оборудования при неизменной интенсивности его работы, приводящее к удвоению производительности, уменьшает удельные капитальные затраты примерно на 11%. Но бесконечно наращивать мощности невозможно. Появляются ограничения, диктуемые машиностроительными предприятиями, связанные с созданием и транспортировкой крупногабаритного оборудования. Временная остановка крупнотоннажного производства приводит к большим потерям продукции и затратам на восстановление режима. Крупное производство вносит значительное возмущение в экологическое равновесие региона. Тем не менее увеличение мощности до разумных пределов рационально для сокращения затрат на оборудование.

**Совмещение процессов.** Совмещение процессов это осуществление разного типа химико-технологических процессов в одном аппарате. Так, в производстве азотной кислоты, окисление аммиака осуществляется на платиновом катализаторе с очень большим выделением тепла, после чего реакционные газы охлаждаются в котле-утилизаторе. Поставив реактор непосредственно на котёл-утилизатор, можно уменьшить расходы на аппараты, что и используется в современном производстве.

**Перестраиваемая химико-технологическая система.** Такая система позволяет на одном и том же оборудовании после его перенастройки (изменении некоторых связей и режима процессов в аппаратах) реализовать различные химико-технологические процессы и перерабатывать несколько видов сырья, производить различные продукты.

#### **2.7.4. Концепция минимизации отходов**

Эта концепция направлена на защиту окружающей среды; она связана с экологической обстановкой в регионе, где расположено производство, и с санитарно гигиеническими условиями для обслуживающего персонала. Реализация этой концепции в первую очередь связана с улучшением использования сырьевых и энергетических ресурсов, а также включает в себя следующие специальные мероприятия.

**Санитарная очистка и обезвреживание выбросов** предполагает установку подсистем ХТС, в которых вредные (токсичные) примеси удаляются из выбрасываемых потоков или переводятся в нетоксичное состояние.

**Уменьшение или замена вспомогательных потоков.** Например, при охлаждении потоков до температуры окружающей среды используют водяные холодильники. Они подвержены коррозии, что приводит к возникновению аварийных ситуаций. Кроме того, для охлаждающего агента (воды) требуется сложная система очистки и отвода тепла от неё (утилизировать теплоту чуть теплой воды нерационально). Замена водяных холодильников на воздушные значительно упрощает схему охлаждения и уменьшает вредные выбросы.

**Замкнутый водооборот.** Вода в большом количестве используется как вспомогательный материал в химических производствах. Проходя через технологическую аппаратуру, трубопроводы, она загрязняется и требует дорогостоящей очистки. Используя замкнутый водооборот, исключают отходы загрязненной воды.

**Повышение надежности оборудования и элементов ХТС** позволяет исключить потери в виде утечек и выбросов любых компонентов.

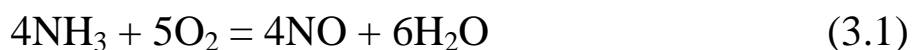
**Создание малоотходных производств.**

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### 3.1. ПРОИЗВОДСТВО РАЗБАВЛЕННОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ ПОД ДАВЛЕНИЕМ 0,73 МПа

В промышленности азотную кислоту получают из аммиака, кислорода и воды, используя следующие химические превращения

**Окисление аммиака**



Реакция - сложная необратимая экзотермическая, протекает на платиновом катализаторе при 850-920°C с избирательностью 94-98% (в зависимости от условий процесса) при полном превращении аммиака. В промышленности для окисления аммиака используют кислород воздуха.



## Окисление оксида азота



Реакция - обратимая экзотермическая гомогенная (газофазная). Снижение температуры благоприятствует сдвигу равновесия вправо.

**Образование азотной кислоты** (хемосорбция диоксида азота)



Реакция - гетерогенная газожидкостная экзотермическая. Понижение температуры способствует более полному превращению  $\text{NO}_2$ . Выделяющийся  $\text{NO}$  окисляется кислородом воздуха по реакции (3.3), так что происходит почти полное поглощение диоксида азота водой, и процесс можно описать следующим стехиометрическим уравнением



Наиболее распространенное в отечественной промышленности производство слабой азотной кислоты осуществляется под единым давлением 0,73 МПа в системе, называемой "универсальная комплектная линия под давлением 0,73 МПа" (УКЛ-0,73). Проведение процесса под повышенным давлением сокращает расходы на оборудование, особенно на стадии хемосорбции, и позволяет создать энерготехнологическую систему, не потребляющую энергию со стороны.

Функциональная схема такого производства представлена на рис.12.

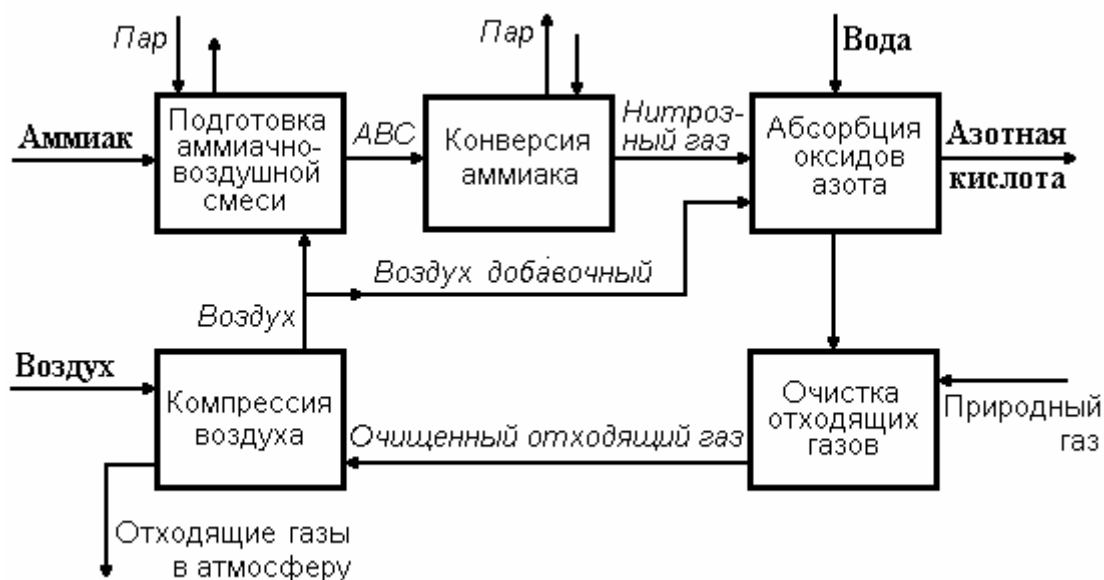


Рис.12. Функциональная схема производства азотной кислоты

Технологические процессы протекают под давлением, для чего в подсистеме компрессии воздух сжимается турбокомпрессором до давления 0,73 МПа. Отходящие газы после абсорбции имеют, естественно, меньшее давление. Их нагревают, сжигая природный газ. Это необходимо для каталитического восстановления оставшихся оксидов азота. Высокая температура (700°С) и повышенное остаточное давление (0.5 МПа) отходящих газов обеспечивают их необходимый энергетический потенциал, чтобы в газовой турбине превратить его в механическую энергию и полностью обеспечить привод воздушного турбокомпрессора. Такое самообеспечение энергией делает производство азотной кислоты энерготехнологической системой. В ней не потребляется энергия со стороны.

### 3.2. ОПИСАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

Технологическая схема производства азотной кислоты представлена на рис.13. В нее включены устройства, обеспечивающие задачи управления технологическим процессом, предусмотренные настоящей программой-тренажером.

Подсистемы, показанные на рис. 2.1, включают следующие аппараты технологической схемы на рис.13.

**Подготовка аммиачно-воздушной смеси:** испаритель аммиака 1, нагреватели аммиака 2 и воздуха 5, смеситель аммиака с воздухом 6.

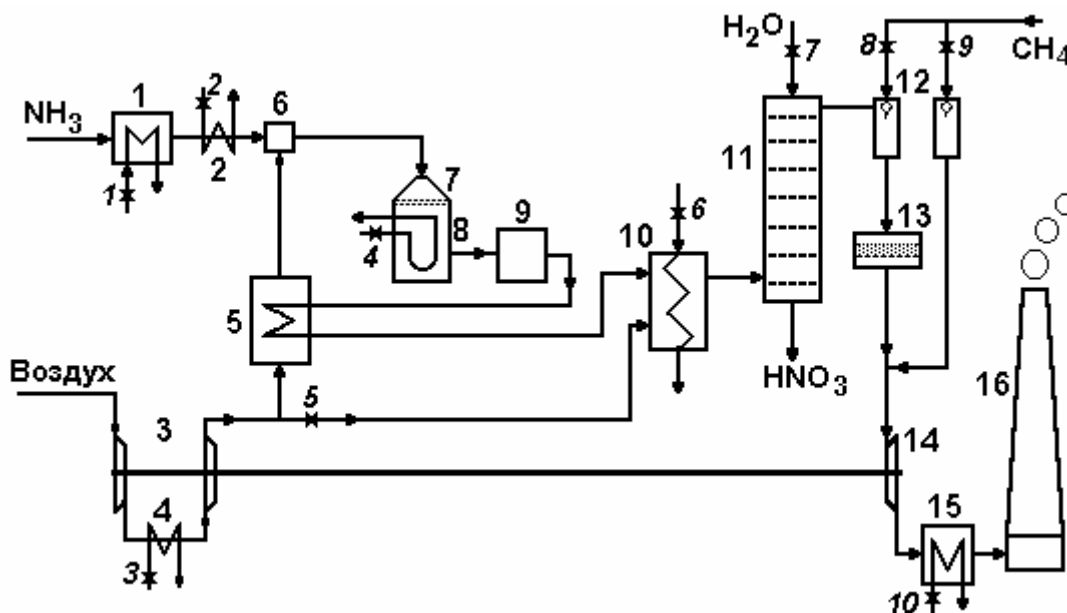
**Компрессия воздуха:** воздушный турбокомпрессор 3, газовая турбина 14, холодильник воздуха 4.

**Конверсия аммиака:** реактор 7, котел-утилизатор 8.

**Абсорбция оксидов азота:** холодильник-конденсатор 10, абсорбционная колонна 11.

**Очистка отходящих газов:** горелки природного газа 12, реактор каталитической очистки 13, экономайзер 15.

На этой же схеме показаны управляющие органы (вентили, задвижки), меняющие потоки технологические и теплоносителей и позволяющие воздействовать на режим работы отдельных аппаратов и ХТС в целом.



**Рис. 13.** Схема производства азотной кислоты

*Технологические аппараты:*

- 1 - испаритель  $\text{NH}_3$ ;
- 2 - нагреватель  $\text{NH}_3$ ;
- 3 - компрессор;
- 4 - холодильник воздуха;
- 5 - теплообменник;
- 6 - смеситель;
- 7 - реактор окисления  $\text{NH}_3$ ;
- 8 - котел-утилизатор;
- 9 - окислитель;
- 10 - конденсатор;
- 11 - абсорбционная колонна;
- 12 - горелки;
- 13 - реактор очистки газов;
- 14 - турбина;
- 15 - экономайзер

*Регуляторы ( $\times|$ ) и их действие*

- 1 - подача греющего пара на испарение аммиака;
- 2 - подача греющего пара на подогрев испаренного аммиака;
- 3 - подача воды на промежуточное охлаждение воздуха в компрессоре;
- 4 - подача химически очищенной воды в котел-утилизатор реакционного узла;
- 5 - подача добавочного количества воздуха на охлаждение нитрозных газов;
- 6 - подача охлажденной воды в холодильник-конденсатор;
- 7 - подача воды на орошение абсорбционной колонны;
- 8 - подача природного газа на нагрев отходящих газов перед реактором каталитической очистки;
- 9 - подача природного газа на подогрев отходящих газов перед турбиной;
- 10 - подача химически очищенной воды в экономайзер узла очистки нитрозных газов.

### 3.2.1. Подсистема подготовки аммиачно-воздушной смеси.

Жидкий аммиак, поступающий в систему, сначала испаряется за счет тепла водяного пара под давлением 0,6-1,6 МПа в испарителе 1, а затем таким же паром нагревается в подогревателе 2 до 140-180°C. Количество испаренного аммиака  $V_{NH_3}$  пропорционально количеству поступающего в испаритель водяного пара, то есть степени открытия клапана 1

$$V_{NH_3} = K_1$$

Здесь и далее  $a, b, c$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от мощности производства и характеристик аппаратов. В данной программе их значения определены для рассматриваемого производства мощностью 120 тыс. тонн в год 100%-й  $HNO_3$ . В некоторых формулах приведены численные значения коэффициентов.

$K_i$  - коэффициенты, определяющие степень открытия соответствующего регулирующего клапана на рис.13. Нормальное, "штатное" положение клапана всегда соответствует значению  $K_i = 1$ .

Температура аммиака перед смесителем  $T_{NH_3}$  зависит от количества аммиака и теплоносителя (водяного пара) в нагревателе 2:

$$T_{NH_3} = a + bK_2/V_{NH_3}$$

Аммиачно-воздушная смесь (АВС) образуется в смесителе 6 смешением аммиака с подогретым воздухом. Ее состояние рассчитывается из уравнений

$$T_{2B} = T_B + 95$$

$$T_{ABC} = (V_B C_{pB} T_{2B} + V_{NH_3} C_{p,NH_3} T_{NH_3}) / (V_B C_{pB} + V_{NH_3} C_{p,NH_3})$$

$$c_{NH_3} = V_{NH_3} / (V_{NH_3} + V_B),$$

где  $T_B, T_{2B}$  - температура воздуха перед и после теплообменника 5,

$T_{ABC}$  - температура АВС после смесителя,

$c_{NH_3}$  - концентрация  $NH_3$  в АВС,

$C_{p,B}, C_{p,NH_3}$  - теплоемкости воздуха и аммиака.

Концентрация аммиака после смесителя 9,5-11,5%. Увеличение концентрации аммиака свыше 15% может привести к взрыву. Для обеспечения оптимальных условий последующего окисления  $NH_3$  температура АВС должна быть не ниже 220°C.

### 3.2.2. Подсистема компрессии воздуха.

Турбокомпрессор 3 марки ГТТ-3 предназначен для сжатия воздуха и состоит из двух ступеней сжатия. В первой ступени воздух сжимается до 0,34 МПа и нагревается до 170°C. Превышение этой температуры приводит к недогрузке и преждевременному износу машины. Поэтому воздух охлаждают в промежуточном водяном холодильнике до 40°C. Во второй ступени достигается необходимое давление 0,73 МПа. Температура воздуха после компрессора  $T_B$  зависит от его промежуточного охлаждения

$$T_B = 260 - 130K_3$$

Давление компрессии  $P$  зависит от температуры окружающего воздуха  $T_B$

$$P = 0,73 \cdot 273 / (273 + T_B),$$

а от давления  $P$  - производительность компрессора по воздуху  $V$

$$V = 59000P / 0,73$$

Часть воздуха  $V_{\text{доб}}$  отбирается на доокисление NO, так что в смеситель поступает воздуха  $V_B$

$$V_B = V - V_{\text{доб}}$$

Турбокомпрессор 3 приводится в движение газовой турбиной 14, в которой остаточное давление отходящих нитрозных газов и их тепловая энергия преобразуется в механическую.

### 3.2.3. Подсистема конверсии аммиака.

Аммиачно-воздушная смесь (АВС) поступает в реактор окисления аммиака 7 с катализатором в виде сеток из платинородиевого сплава (платиноидный катализатор). Реактор содержит 12-14 катализаторных сеток. Процесс протекает адиабатически, и за счет тепла реакций (9.1)-(9.2) температура на катализаторных сетках устанавливается на уровне 850-910°C.

Температура процесса  $T_{\text{конв}}$  в реакторе составляет

$$T_{\text{конв}} = T_{\text{АВС}} + 0,96 [68 + 94(1 - X)] c_{\text{NH}_3},$$

где 0,96 - коэффициент, учитывающий тепловые потери;

$X$  - степень окисления  $\text{NH}_3$  до  $\text{NO}$ ; 68 и 94 - адиабатические разогревы реакционной смеси, содержащий 1% аммиака, по реакциям (3.1) и (3.2) соответственно;

$c_{\text{NH}_3}$  - концентрация аммиака в АВС.

Степень превращения аммиака  $X$  в оксид азота зависит от температуры исходной смеси  $T_{\text{АВС}}$ , температуры катализатора  $T_{\text{конв}}$ , давления  $P$ , концентрации аммиака  $c_{\text{NH}_3}$  и определяется эмпирическим уравнением

$$X = 102 - 0,01 c_{\text{NH}_3}^3 + 0,027 c_{\text{NH}_3}^2 + c_{\text{NH}_3} + 0,04(T_{\text{конв}} - 910) - 1,7P + 0,06P^2 - 0,02(T_{\text{АВС}} - 200)$$

Содержание оксида азота  $c_{\text{NO}}$  после реактора составит

$$c_{\text{NO}} = c_{\text{NH}_3} X$$

Высокая температура процесса приводит к термической потере платины. Величина безвозвратных потерь  $g$ , измеряемая в количестве  $\text{Pt}$  в г, теряемой при производстве 1 т  $\text{HNO}_3$ , зависит от температуры  $T_{\text{конв}}$  и давления  $P$  в зоне реакции:

$$g = -0,285 + 0,017P + 0,0004T_{\text{конв}}$$

Из приведенных формул следует, что снижение температуры уменьшает выход оксида азота, а ее повышение увеличивает безвозвратные потери платины. Поэтому температуру конверсии аммиака поддерживают в интервале 890-920°C. Очевидно, что показатели процесса окисления аммиака зависят от подготовки аммиачно-воздушной смеси.

Горячие нитрозные газы из реактора поступают в котел-утилизатор 8, где основная часть тепла химических реакций идет на получение пара высоких параметров ( $P_{\text{пар}} = 1,4-1,6$  МПа и  $T_{\text{пар}} = 250-260^\circ\text{C}$ ). Производительность по пару котла-утилизатора, или давление  $P_{\text{пар}}$  вырабатываемого пара, пропорционально количеству подаваемой воды:

$$P_{\text{пар}} = 0,7 + 0,8K_4$$

В окислителе протекает реакция (9.3) - газофазное окисление  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$ . Эта же реакция протекает и во всех последующих аппаратах и газоходах.

Дальнейшее охлаждение нитрозных газов происходит в теплообменнике-подогревателе воздуха 5 и холодильнике-конденсаторе 10. В холодильнике вследствие частичной конденсации водяного пара, образовавшегося при окислении аммиака, и взаимодействия  $H_2O$  с оксидами азота образуется кислый конденсат с концентрацией 30-40%  $HNO_3$ , который подается на соответствующую тарелку абсорбера 11. Охлаждение нитрозного газа регулируется подачей теплоносителей в соответствующие теплообменные аппараты так, что температура нитрозных газов  $T_{нг}$  перед абсорбцией

$$T_{нг} = T_{конв} - 800 - 45K_4K_6$$

В нормальном режиме температура нитрозных газов не ниже  $70^\circ C$ .

### 3.2.4. Подсистема абсорбции оксидов азота.

Окисленный и охлажденный нитрозный газ поступает в низ абсорбера 11, другой реагент -  $H_2O$  - подается сверху. В жидкой фазе протекает образование  $HNO_3$  - реакция (3.4). Выделяющийся  $NO$  окисляется в межтарельчатом пространстве. Этому же способствует и дополнительная подача воздуха перед абсорбером  $V_{доп}$ . Доокисление оксида азота и противоток реагирующих компонентов способствует более полному взаимодействию реагентов. Остаточное содержание оксидов азота в отходящем газе не превышает 0,15%. Продукционная азотная кислота содержит 58-60%  $HNO_3$ . Концентрации образующейся кислоты  $c_{HNO_3}$  и оксидов азота в отходящем газе  $c_{NO_x}$  зависят от концентрации нитрозного газа  $c_{NO}$ , величины орошения (количества подаваемой воды)  $L$ , давления  $P$  и средней температуры  $T_c$

$$T_c = (T_{нг} + T_{ов})/2$$

$$c_{HNO_3} = 64,6 + c_{NO} - aL + 10P - 0,2T_c$$

$$c_{NO_x} = 0,24 - bL - 0,2P + 0,001T_{ов}$$

Производительность системы  $G$  [тыс. т  $HNO_3$ /сут] определяется материальным балансом и зависит от расхода аммиака  $V_{NH_3}$ , степени его окисления в оксид азота  $x$  и потери оксидов азота с отходящим газом

$$G = [V_{NH_3} x - (V_B - 1,93V_{NH_3}) c_{NO_x}] \cdot 63 \cdot 24 / 22,4$$

Коэффициент 1,93 - стехиометрический расход кислорода с учетом средней избирательности реакции окисления аммиака. Поскольку в программе использованы объемные часовые расходы компонентов [м<sup>3</sup>/ч], то коэффициенты после квадратных скобок - переход к указанной размерности для  $G$ .

### 3.2.5. Подсистема очистки нитрозных газов.

Из абсорбционной колонны отходящий газ направляются в одну из горелок 12, где за счет сжигания природного газа температура повышается до 370-420°C. Концентрация кислорода поддерживается в пределах 3-3,5%, чтобы обеспечить температурный режим каталитической очистки. Здесь же добавляется природный газ в количестве, необходимом для восстановления оксидов азота по реакциям



Восстановление оксидов азота происходит в реакторе очистки 13 на платиновом катализаторе АПК-2. Остаточная концентрация оксидов азота составляет 0,004-0,01об.%. В результате протекания реакций каталитического горения и восстановления температура газовой смеси после реактора повышается, после чего газ направляется в газовую турбину 14. Температура перед ней стабилизируется в пределах 690-710°C другим потоком, нагреваемым во второй горелке 12. Температуры отходящего газа перед реактором очистки  $T_{ог}$  и перед турбиной  $T_{ког}$  регулируют расходами природного газа в горелки и  $V_{\text{CH}_4}'$  и  $V_{\text{CH}_4}''$ :

$$V_{\text{CH}_4}' = aK_8; \quad V_{\text{CH}_4}'' = bK_9;$$

$$T_{ог} = T_c + 350K_8; \quad T_{ког} = T_{ог} + 300K_9.$$

После газовой турбины очищенные газы при 400°C и давлении 0,106МПа направляются в котел-утилизатор с экономайзером 15 и выбрасываются в атмосферу через выхлопную трубу 16. Как и для котла-утилизатора 4 давление получаемого в экономайзере 15 пара  $P_{эк}$  зависит от его питания

$$P_{эк} = 3 + 10K_{10}$$



Представленные выше уравнения использованы для расчета технологического режима химико-технологической системы производства азотной кислоты. Расчет производится последовательно по подсистемам.

### 3.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

На рис.13 показана технологическая схема производства азотной кислоты и обозначены все технологические аппараты. Режимы аппаратов заранее определены как "нормальные". Запуск программы осуществляется из файла "Lab\_OXT". Пусковой файл ОХТ "Enter", затем стрелками на клавиатуре выбирается позиция 9 «Тренажер по производству азотной кислоты», нажатием клавиши "Enter" программа запущена. Далее при выполнении лабораторной работы руководствоваться текстом на экране монитора. При нормальной работе агрегата азотной кислоты на экране монитора появляется бегущая строка **"режим нормальный"**. Через некоторое время вносятся изменения в режим, и появляется сигнализация **"нарушение режима"** с информацией: в каком узле произошло нарушение, параметры процесса в этом узле и "нормальные" значения параметров. В реальных условиях производства управление процессом осуществляется (автоматически или вручную) поворотом штурвала задвижки, вентиля и т.д. по принципу "открывать-закрывать", или "больше-меньше". Производственный принцип управления процессом положен в основу управления моделью-тренажером.

На схеме указаны регуляторы некоторых потоков, с помощью которых можно изменять режим отдельных аппаратов и технологических узлов. В нормальном состоянии значение регулирующего воздействия равно 1, при ином значении происходит нарушение режима. Интервал изменения регулирующего параметра  $0 \leq 2$ .

### 3.4. КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

$U$  – общее количество поступающего воздуха, м<sup>3</sup>/ч

$U_B$  – количество поступающего в смеситель воздуха, м<sup>3</sup>/ч

$U_{амм}$  – количество поступающего в смеситель аммиака, м<sup>3</sup>/ч

$L$  – количество воды идущей на орошение абсорбера

$T_B$  – температура воздуха в холодильнике компрессора (140-180град)

$T_{в.см.}$  – температура воздуха на входе в смеситель

$T_{амм.}$  – температура аммиака после испарителя (140-180 град.)

$T_{авс.}$  – температура аммиачно-воздушной смеси (220-250 град.)

$T_{конв.}$  – температура конверсии аммиака (890-920 град.)

$T_{н.г.}$  – температура нитрозных газов перед абсорбером (40-70град.)

$T_{о.г.}$  – тем-ра отходящих газов на входе в реактор очистки (350-430°)

$T_{турб.}$  – тем-ра отходящих газов перед турбиной (690-71- град.)

$C_{амм.}$  – концентрация аммиака в смеси (10-11 об.%)

$C_{а.к.}$  – концентрация продукционной азотной кислоты (> 55%)

$C_{отх.}$  – концентрация нитрозных газов после абсорбера (< 0,15 об.%)

$P$  – давление воздуха, МПа

$P_{к.у.}$  – давление пара в котле-утилизаторе узла конверсии (12-14атм.)

$P_{экон.}$  – давление пара в экономайзере отходящих газов.

После сигнала о нарушении режима требуется определить регулятор (указать его номер) и провести корректировку его (ввести коэффициент его изменения). Возможно, потребуются корректировать режим не одним регулятором. После ввода воздействий устанавливается новый режим. Если он совпадает с нормальным с определенной точностью, то корректировка заканчивается. Иначе предлагается продолжить восстановление режима.

После завершения работы определяется число попыток и производится оценка действий. Допускается не более 10-ти попыток. На выполнение работы отводится до 10-ти минут.

#### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ «АНАЛИЗ, СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХТС»**

1. Состав и структура химического производства.
2. Основные понятия ХТС: элементы, связи, подсистемы.
3. Виды элементов ХТС.
4. Понятие технологического потока. Виды технологических потоков.
5. Модели ХТС: качественные и количественные.
6. Графические модели (схемы) ХТС на примере производства аммиака.
7. Связи ХТС.
8. Общая структура ХТС и её анализ.
9. Иерархическая структура ХТС. Её анализ.
10. Роль системного анализа в последовательности исследования и анализа ХТС.
11. Анализ ХТС. Задачи, решаемые на стадии анализа ХТС.
12. Синтез ХТС. Задачи, решаемые на стадии синтеза ХТС.
13. Синтез ХТС. Концепция оптимального использования сырья.
14. Синтез ХТС. Концепция оптимального использования энергии.
15. Синтез ХТС. Концепция эффективного использования оборудования.
16. Синтез ХТС. Концепция минимизации отходов.
17. Анализ технологической схемы производства азотной кислоты.
18. Критерии оценки эффективности функционирования ХТС.

#### **5. ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Бесков В.С. Общая химическая технология: Учебник для вузов.- М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. -452с.
2. Кутепов А.М. и др. Общая химическая технология: Учебник для техн. вузов. -М.: Высш. шк., 1990. -520 с.
3. Бесков В.С., Давидханова М.Г., Царев В.И. Автоматизированная система расчётных работ в общеинженерных курсах по химической технологии: Учебное пособие. -М.: Изд. центр РХТУ. 1997. -76с.
4. Кунин Б.Т. Расчет материальных балансов сложных химико-технологических систем: Метод. указания. ГОУ ВПО «ИГХТУ». –Иваново. 2004. -24с.
5. Михеев С.В., Кунин Б.Т. и др. Расчеты материальных балансов.: Сб. задач по курсу «Общая химическая технология». Ч. 1. ГОУ ВПО «ИГХТУ». –Иваново. 2004. -52с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	Цель работы	3
2.	Теоретические основы	3
2.1.	Общие понятия и определения	3
2.2.	Связи ХТС	5
2.3.	Структура химико-технологической системы	8
2.4.	Модели химико-технологической системы	10
2.5.	Общая стратегия системного исследования. Анализ, синтез и оптимизация ХТС	15
2.6.	Анализ ХТС	18
2.6.1.	Задачи анализа ХТС	18
2.6.2.	Свойства ХТС	19
2.7.	Синтез ХТС	23
2.7.1.	Концепция оптимального использования сырьевых ресурсов	24
2.7.2.	Концепция оптимального использования энергии	27
2.7.3.	Концепция эффективного использования оборудования	30
2.7.4.	Концепция минимизации отходов	31
3.	Лабораторная работа	32
3. 1.	Производство разбавленной азотной кислоты под давлением 0,73 МПа	32
3.2.	Описание химико-технологической схемы производства	34
3.2.1.	Подсистема подготовка аммиачно-воздушной смеси	36
3.2.2.	Подсистема компрессии воздуха	37
3.2.3.	Подсистема конверсии аммиака	37
3.2.4.	Подсистема абсорбции окислов азота	39
3.2.5.	Подсистема очистки нитрозных газов	40
3.3.	Постановка задачи управления	41
3.4.	Контролируемые параметры	42
4.	Контрольные вопросы по теме «Анализ, синтез и оптимизация ХТС».	43
5.	Использованная литература	43