

## **Лекция 9. Автоматизация процесса ректификации**

### **1. Характеристика объекта управления**

Процесс ректификации предназначен для разделения жидких многокомпонентных смесей на отдельные компоненты или фракции путём многократного испарения жидкости и конденсации паров в результате противоточного взаимодействия паровой и жидкой фаз.

Целью управления ректификации является обеспечение качества разделяемых компонентов при минимальных их потерях.

Рассмотрим колонну ректификации К-1 (Рис.1), которая предназначена для разделения бинарной смеси на дистиллят и кубовую жидкость (остаток). Перед подачей в колонну сырьё, которое содержит высококипящий и низкокипящий компоненты, необходимо нагреть до температуры кипения. Для этой цели предназначен теплообменник Т-1. В качестве теплоносителя для нагрева используют водяной насыщенный пар или другой энергоёмкий теплоноситель. В колонне сырьё разделяется на паровую фазу, которая содержит в основном низкокипящий компонент, и жидкую фазу, содержащую высококипящий компонент. С верха колонны отводится пар, который представляет собой низкокипящий компонент с некоторым содержанием высококипящего компонента. В теплообменнике Т-2 (дефлегматоре) происходит полная или частичная конденсация пара и образуется дистиллят. Выходящая из аппарата Т-2 жидкость делится на два потока: один возвращается на верхнюю тарелку колонны К-1 в качестве орошения (флегма), а второй – дистиллят является товарным продуктом. Для охлаждения дистиллята используется теплообменник Т-3, который по своему назначению является холодильником. Теплообменник Т-4 это кипятильник. Его задача – создать поток пара в колонне К-1. В колонне К-1 установлена так называемая «глухая тарелка», с которой стекающая по колонне флегма отводится в трубный пучок кипятильника Т-4. В его межтрубное пространство подаётся насыщенный водяной пар который передаёт свою теплоту конденсации жидкости. Жидкость начинает кипеть. В результате по трубам поднимается парожидкостная смесь, которая выходит из кипятильника Т-4 и возвращается под «глухую тарелку» колонны К-1. Под этой «глухой тарелкой» происходит сепарация жидкой и паровой фаз: жидкость стекает в низ колонны и отводится из неё в качестве кубового остатка, а пар идет вверх по колонне.

Теплообменник Т-5 холодильник кубового остатка. Нижний продукт колонны К-1 перед закачкой в резервуар необходимо охладить.

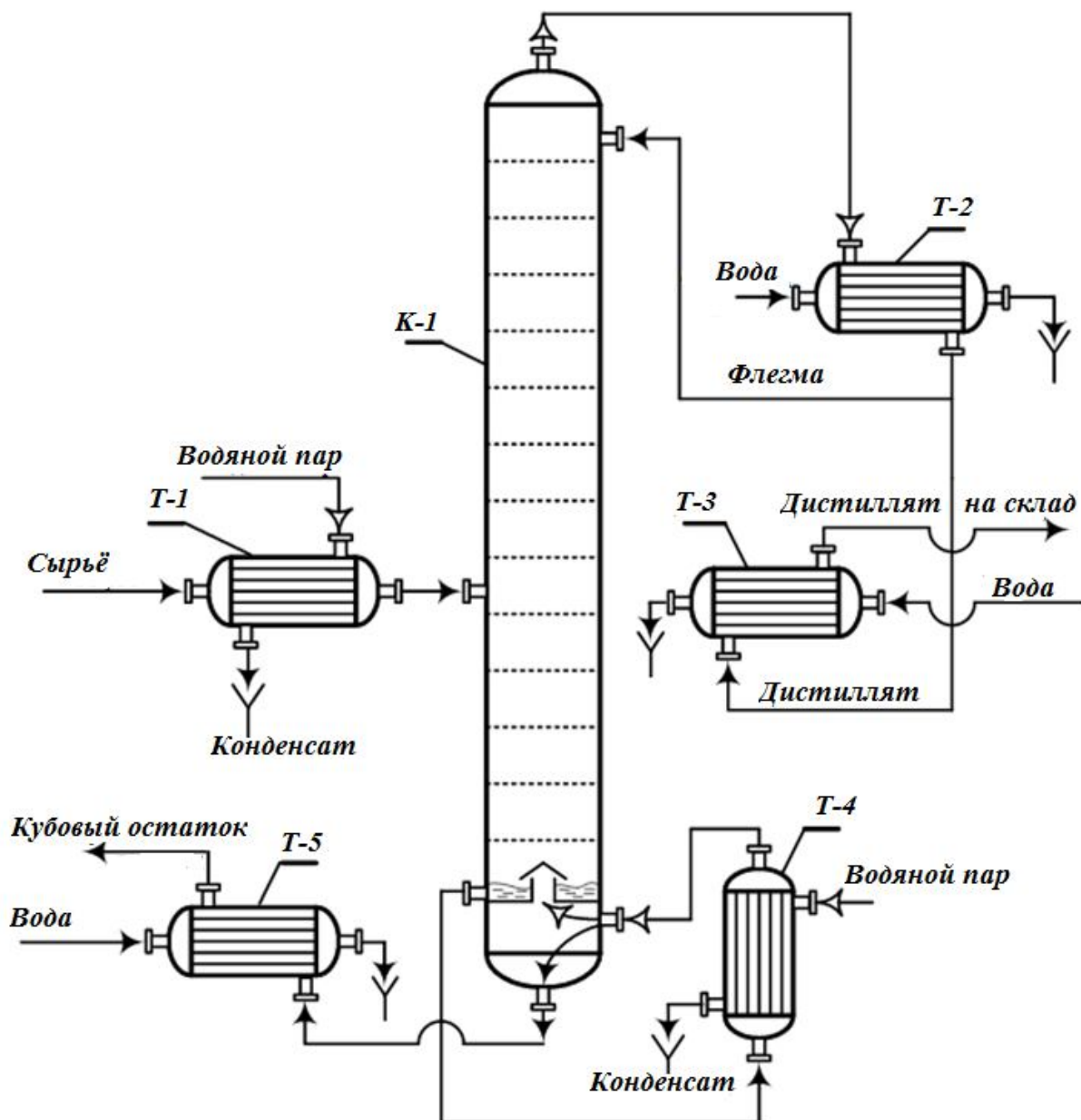


Рис. 1 Колонна ректификации бинарной ректификации

Т-1 –подогреватель сырья; К-1 –ректификационная колонна; Т-2 –конденсатор (дефлегматор); Т-3 –холодильник дистиллята; Т-4 –вертикальный термосифонный кипя-  
тильник; Т-5 –холодильник кубового остатка.

Проведём идентификацию всех параметров ректификационной колонны и возможные управляющих воздействий. Упрощенная схема материальных и тепловых потоков в колонне ректификации представлена на Рис.2.

$F, P, W, R$  — расходы питания, дистиллята, кубового остатка и расхода флегмы;

Материальный баланс: общий  $F = P + W$ ;

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P + W \cdot X_W \text{ — по НК}$$

$L_B, L_D$  — уровни в кубе-испарителе (нижней части) колонны, во флегмовой емкости;

$Q_F, Q_D, Q_B$  — тепловые нагрузки подогревателя питания (разделяемой исходной смеси), дефлегматора, кипятильника

Уравнение материального баланса колонны учитывает расходы сырья, дистиллята и кубового продукта, объемы жидкости в кубе и флегмовой емкости, запас жидкой фазы на тарелках.

Контрольно-измерительные приборы измеряют температуру и давление в колонне, уровни дистиллята во флегмовой емкости и кубового продукта в кубе-испарителе.

Изменение уровня дистиллята во флегмовой емкости и кубового продукта в кубе-испарителе свидетельствует о нарушении материального баланса или изменении запаса жидкой фазы на тарелках колонны, поэтому быстрой вычисления материального баланса колонны невозможно получить даже при использовании точных расходомеров.

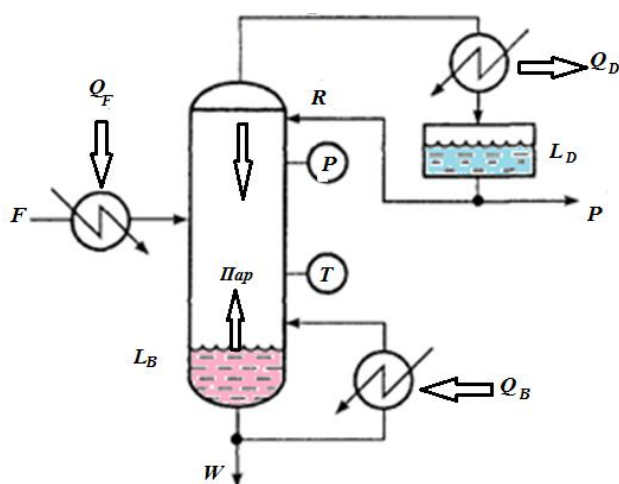


Рис.2 Параметры ректификационной колонны

Управляющими переменными служат: теплота, сообщаемая исходному сырью в подогревателе питания  $Q_F$ ; тепловая нагрузка кипятильника (ребойлера)  $Q_B$ ; теплота, отбираемая в дефлегматоре  $Q_D$ . Существенную роль играют температуры исходного и конечного продуктов.

Регулирование рабочего давления в колонне входит в функции контура регулирования теплового баланса.

Регулируя материальный баланс в колонне на основании показаний уровнемеров, а давление — по количеству теплоты, переданной в кипятильнике (ребойлере), можно реализовать схему регулирования температуры в колонне, определяющую тепловой баланс в колонне. Процесс является саморегулирующимся, так как количество переданной теплоты является функцией перепада температур в теплообменнике. Так с увеличением тепловой нагрузки подогревателя питания температура дистиллята начнет повышаться, но сама разница температур будет снижаться, вызывая уменьшение теплового потока, то есть возникнет обратная отрицательная связь, что и приводит к эффекту саморегулирования.

*Основным параметром обратной связи* системы регулирования является расход флегмы, тогда как тепловая нагрузка кипятильника позволяет регулировать расход паровой фазы в колонне.

*Контролируемые возмущающие воздействия:* изменения температуры питания  $t_F$ , расхода питания  $F$ , концентрации легколетучего компонента  $X_F$  в питании (исходной смеси).

*Неконтролируемые возмущающие воздействия:* изменения энтальпии греющего пара, теплоносителя, хладагента; потери теплоты в окружающую среду.

*Управляющие воздействия:* изменения расходов греющего пара  $F_n$ , теплоносителя  $F_T$ , хладагента  $F_x$ , флегмы  $R$  изменение отбора (расхода) дистиллята  $P$ , кубового продукта  $W$ .

*Регулируемые параметры* (выходные координаты): концентрация легколетучего компонента  $X_D$  в дистилляте, концентрация легколетучего компонента  $X_W$  в кубовом продукте, уровень жидкости в кубе колонны  $L_B$  и флегмовой емкости  $L_D$ , давление в колонне  $P_K$ .

## 2. Автоматизация колонны бинарной ректификации

Простейшая система управления ректификационной установкой, которая обеспечивает стабилизацию состава дистиллята и поддержание материального и теплового балансов в установке, включает шесть одноконтурных САР :

- Основным регулятором, стабилизирующим состав дистиллята (при разделении бинарной смеси при постоянном давлении), является регулятор температуры верха колонны, воздействующий на отбор (расход) дистиллята.
- Регулятор температуры 2 стабилизирует температуру питания.
- Регуляторы уровня 3 и 4 поддерживают материальный баланс в системе по жидкой фазе.
- Регулятор расхода 6 стабилизирует подачу греющего пара в кипятильник.
- Если задачей регулирования является стабилизация состава кубового продукта, то расход греющего пара задается регулятором температуры низа колонны *ба*, а расход дистиллята стабилизируется регулятором *1а*.
- При регулировании процесса бинарной ректификации в качестве косвенного показателя состава смеси используют ее температуру кипения, однозначно связанную с составом только при постоянном давлении. Поэтому в продуктовых ректификационных колоннах, предусмотрены специальные системы стабилизации давления, где в качестве управляющего воздействия используют изменение расхода не сконденсировавшихся газов, отводимых из верхней части колонны РС (контур 5)
- Регулирование составов (или температур) верха и низа колонны не применяют, так как они связаны между собой, и их одновременное регулирование по обратной связи может привести к снижению устойчивости системы регулирования.

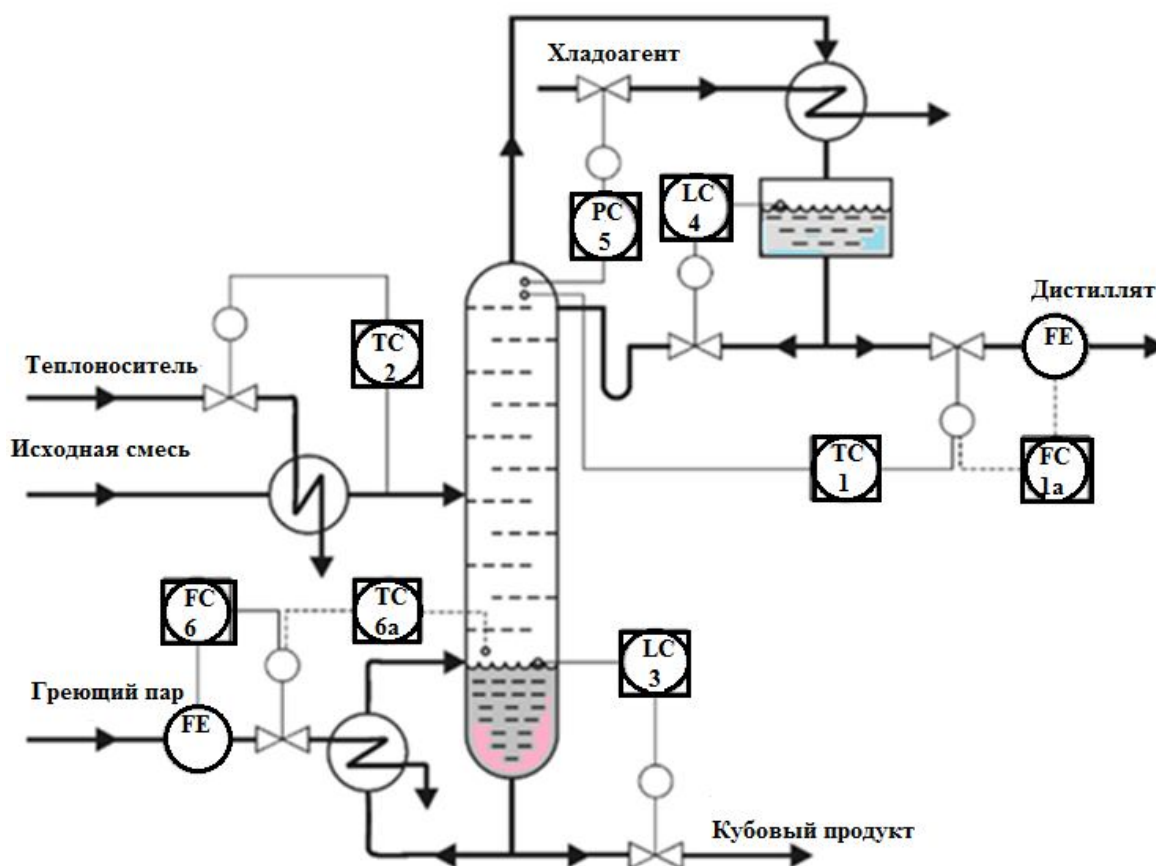


Рис.3. Система управления ректификационной колонной с помощью одноконтурных САР отдельных технологических параметров. 1 — регулятор температуры верха колонны; 1а — регулятор расхода дистиллята; 2 — регулятор температуры питания; 3 — регулятор уровня в кубе колонны; 4 — регулятор уровня во флегмовой емкости; 5 — регулятор давления в колонне; 6 — регулятор расхода греющего пара; 6а — регулятор температуры низа колонны

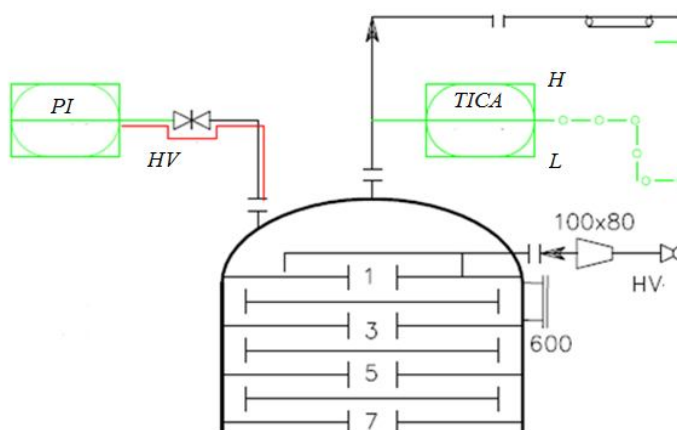


Рис.4. Система автоматического контроля давления верха колонны *PI* и регулирования температуры паров дистиллята *TICA* изменением расхода флегмы в колонну (контур регулирования на схеме не показан) с сигнализацией верхнего и нижнего допустимых пределов.

#### Типовые решения автоматизации процесса ректификации

##### 1. Регулирование.

- ✓ Регулирование температуры верха колонны изменением расхода подачи флегмы - косвенное регулирование показателя эффективности процесса  $s_d$ .
- ✓ Регулирование давления паров верха колонны изменением подачи хладагента в дефлегматор - обеспечивает материальный баланс по паровой фазе.
- ✓ Регулирование уровня флегмы по отбору флегмы для обеспечения материального баланса по жидкой фазе верха колонны.
- ✓ Регулирование уровня кубового продукта по отбору кубового продукта - обеспечивает материальный баланс по жидкой фазе низа колонны.
- ✓ Стабилизация расхода питания обеспечивает:
  - материальный баланс по всему веществу,
  - снятие наиболее существенных возмущений,
  - заданное положение рабочей области колонны;
  - стабилизацию производительности установки.
- ✓ Стабилизация расхода греющего пара обеспечивает:
  - тепловой баланс установки;
  - стабилизацию массового потока пара высококипящего компонента в кубе .
- ✓ Регулирование  $T_n^0$  по подаче  $G_m$  обеспечивает:
- ✓ заданное положение рабочей линии;
- ✓ эффективность процесса разделения;
- ✓ тепловой баланс

##### 2. Технологический контроль.

- ✓ Температур и расходов всех входящих и исходных потоков.
- ✓ Давлений верха и низа колонны
- ✓ Уровень флегмы куба колонны
- ✓ Концентрации низкокипящего компонента в дистилляте или кубовом продукте

##### 3. Сигнализация.

- существенные отклонения всех технологических показателей

### 3. Каскадные системы регулирования колонны ректификации

*Основным недостатком одноконтурной системы является стабилизация расхода греющего пара, что приводит к перерасходу пара. Регулятору расхода устанавливается завышенное задание с учетом возможных колебаний энтальпии греющего пара, переохлаждения флегмы и других возмущающих воздействий в процессе.*

Отсутствие компенсирующих воздействий по возмущениям со стороны питания приведет к динамическим ошибкам регулирования составов продуктов, так как регулятор состава (или температуры) на конце колонны получит сигнал об отклонении регулируемой координаты от заданного значения лишь после того, как изменится состав жидкости по всей высоте колонны. Использование температуры продукта для регулирования его состава имеет еще один существенный недостаток: колебания температуры при изменении состава соизмеримы с ее колебаниями при изменении давления в колонне и часто оказываются соизмеримы с погрешностью измерительных устройств.

При разделении близкокипящих компонентов существенные колебания температуры можно наблюдать только в средней части каждой секции колонны. Эту особенность следует учитывать при выборе измерительного устройства, а также места отбора импульса по температуре (регулирование по температуре на характерной тарелке).

Чтобы обеспечить минимизацию энергозатрат на разделение, применяют регулятор соотношения расходов греющего пара и питания (или расходов флегмы и питания) 6. Кроме того, для регулирования температуры продукта применяют каскадную САР с дополнительным импульсом по производной от температуры на контрольной тарелке (регуляторы 7 и 1а), что уменьшает максимальную ошибку регулирования.



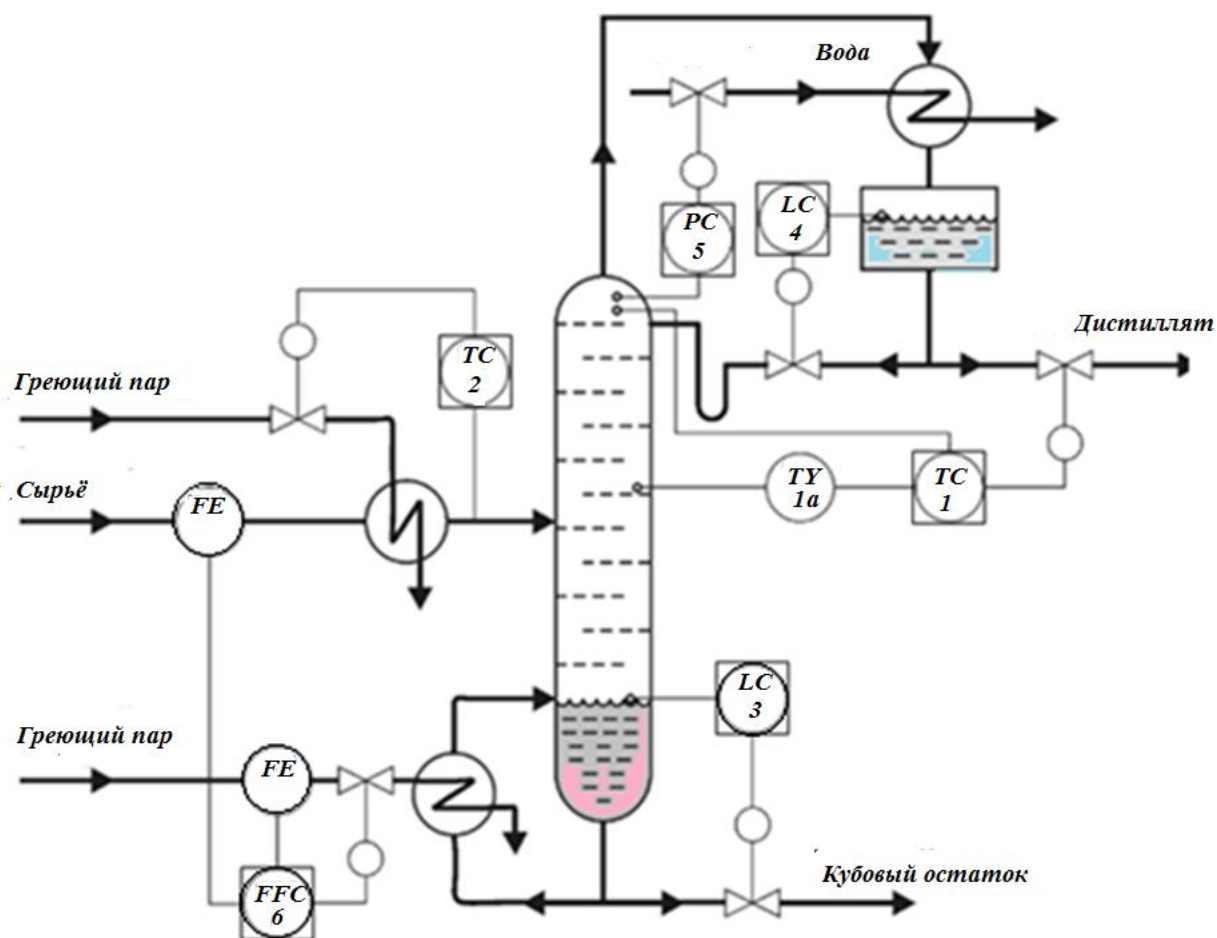


Рис.5. Система управления ректификационной колонной с компенсацией возмущений по расходу питания и каскадной САР температуры верха колонны

В схеме автоматического управления (Рис. 5) расходы дистиллята и греющего пара регулируются контроллерами 1 и 6, задания которым корректирует контроллер 7 в зависимости от расхода и состава питания и энтальпии греющего пара с учетом динамических характеристик каналов регулирования ректификационной колонны. Для реализации подобной системы необходима математическая модель процесса. САР должна обеспечить приближенную инвариантность системы по отношению к контролируемым возмущающим воздействиям.

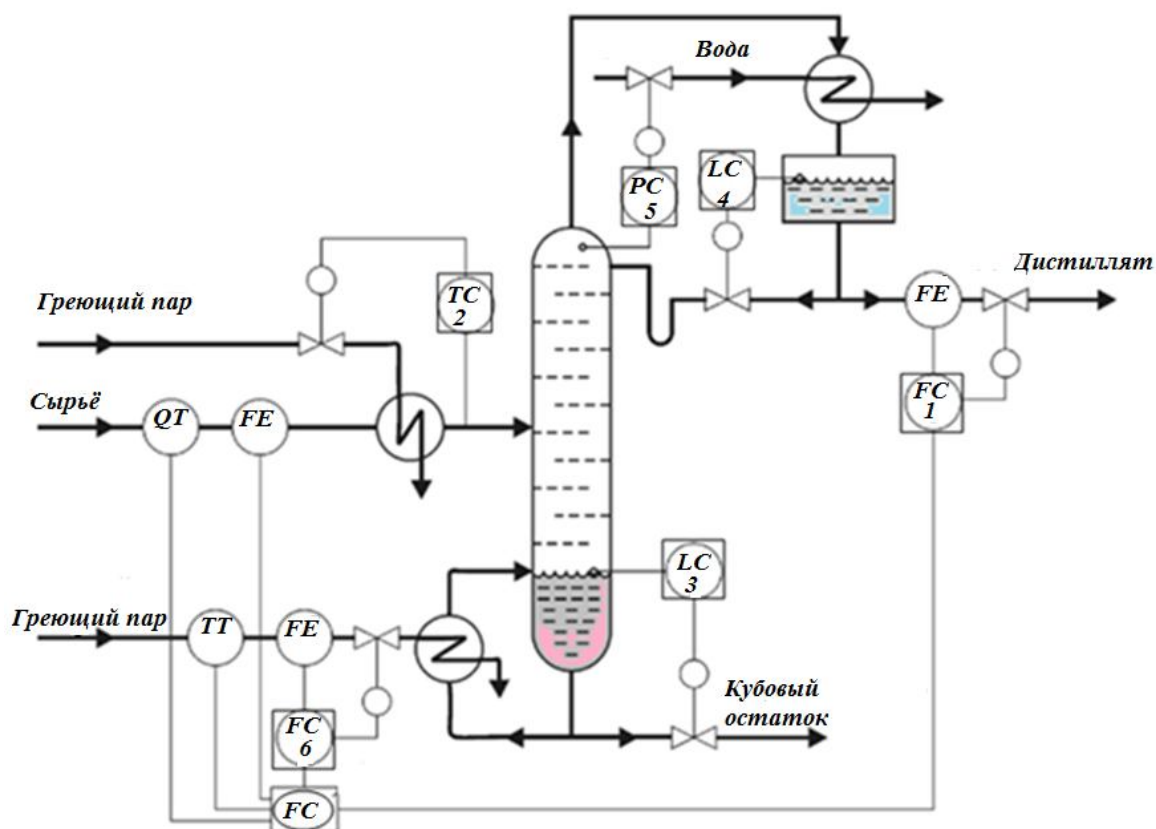


Рис.6 Система управления ректификационной колонной с компенсацией возмущений по расходу и составу питания и температуре греющего пара:

1 — регулятор расхода дистиллята; 2 — регулятор температуры теплоносителя; 3 — регулятор уровня в кубе колонны; 4 — регулятор уровня во флегмовой емкости; 5 — регулятор давления в колонне; 6 — регулятор расхода греющего пара; FC - контроллер

В насадочных ректификационных колоннах одним из основных регулируемых параметров является перепад давления, обеспечивающий заданный гидродинамический режим в аппарате. Обычно перепад давления регулируют изменением подачи греющего пара в кипятильник/

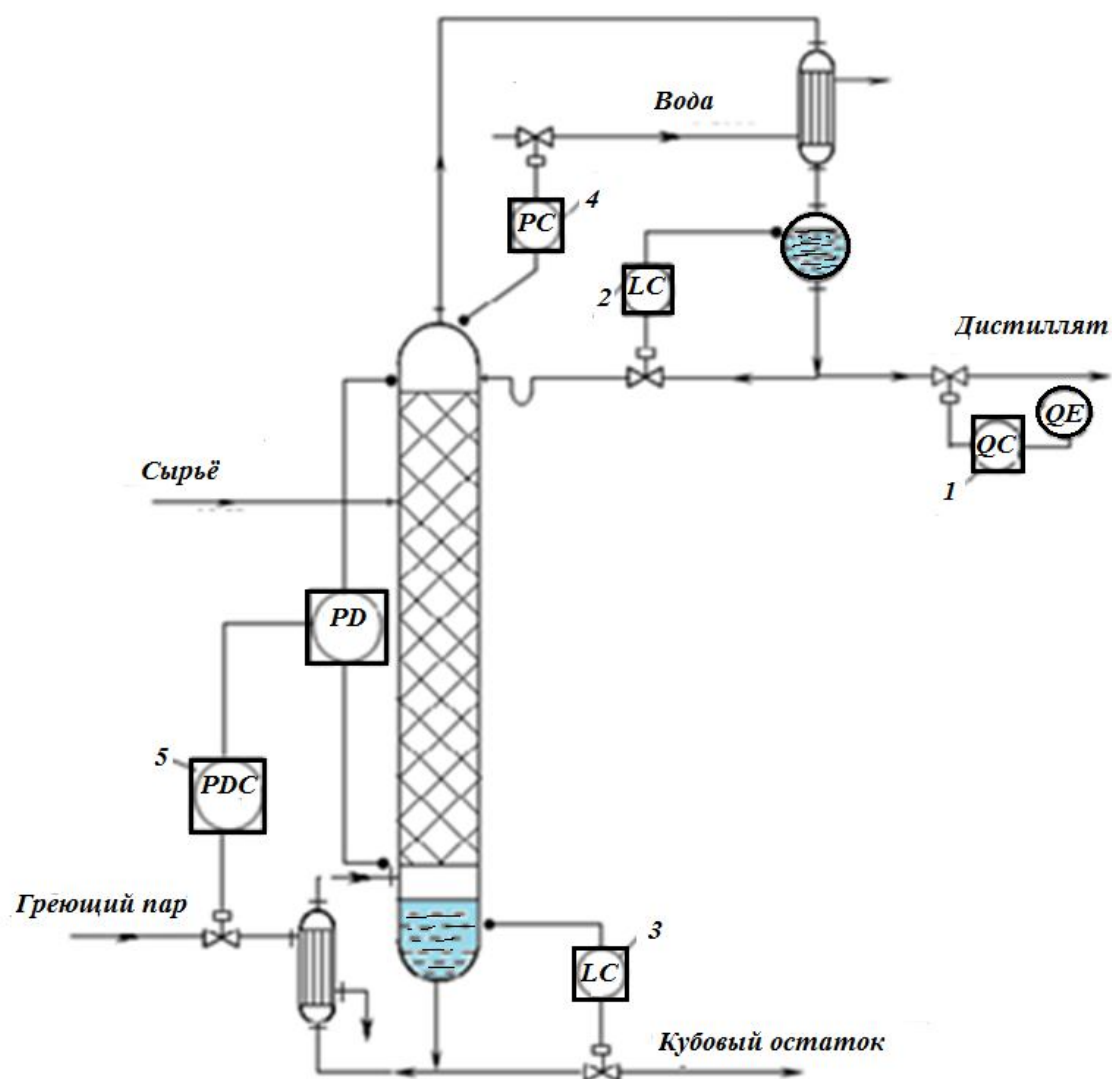


Рис.7. Принципиальная схема автоматического регулирования насадочной ректификационной колонны: 1 – регулятор состава; 2,3 – регуляторы уровня; 4 – регулятор давления; 5 – регулятор перепада давления.

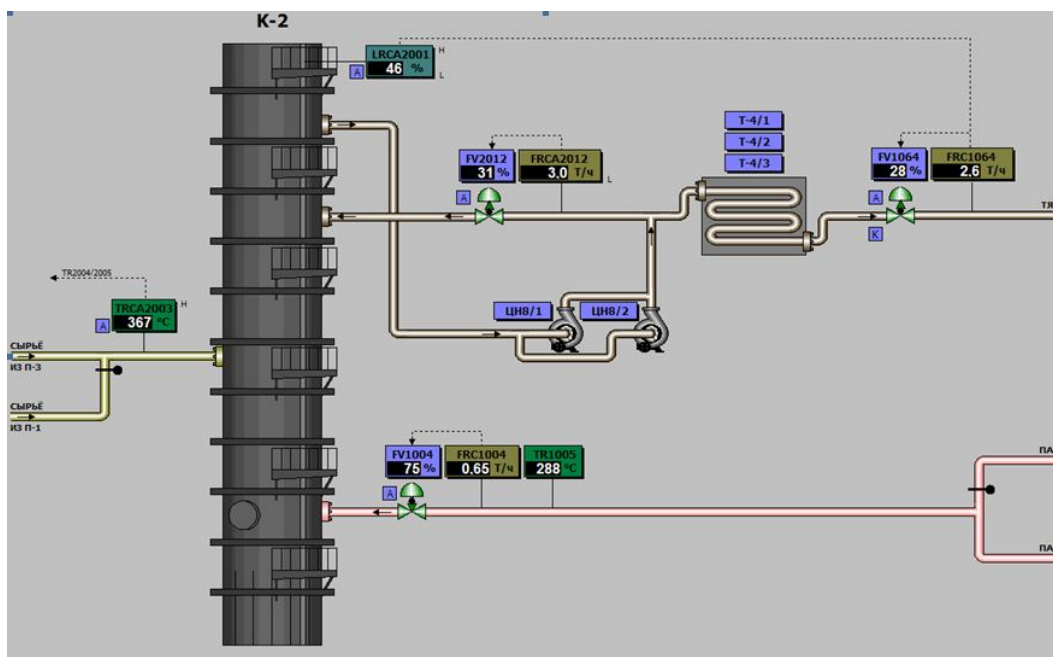


Рис.8. Визуализация системы автоматического регулирования колонной дистилляции сланцевой смолы

### Контрольные вопросы

1. В чём суть и назначение процесса ректификации?
2. Укажите основные технологические аппараты ректификационной установки.
3. Сформулируйте цель автоматического регулирования процессом ректификации.
4. Параметры контроля и регулирования колонны ректификации.
5. Укажите основные недостатки систем одноконтурного регулирования колонн.
6. Опишите контуры каскадного регулирования колонн ректификации.

### Литература.

1. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами. Учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 690 с.
2. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Задачник по системам управления химико-технологическими процессами. Учебное пособие для вузов. М: ИКЦ «Академкнига», 2005. 307 с.
3. [http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/posobie\\_po\\_teploobmenu.pdf](http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/posobie_po_teploobmenu.pdf)
4. <http://helpiks.org/8-98793.html>