

с барабана ножом. В случае необходимости толщина осадка регулируется путём изменения степени вакуумирования или скорости вращения барабана.

Центрифугирование жидких систем осуществляется в разнообразных по конструкции отстойных или фильтрующих центрифугах. На этот процесс воздействуют те же основные возмущения, что и на процесс фильтрации; цели регулирования так же одинаковы. Для достижения минимально возможной влажности осадка применяют центрифуги с высокой разделяющей способностью, обеспечивающей требуемое качество разделения при значительных колебаниях возмущений. При центрифугировании регулированию в основном подлежит расход исходной суспензии, что обеспечивает постоянную производительность аппарата. Фугат и осадок отводится путём свободного удаления.

Очистку газов от частиц пыли размером более 10 мкм проводят в циклонах. Циклоны чувствительны к колебаниям нагрузки по газу и рассчитываются на определённую производительность по газу с допустимым содержанием в нём пыли. Если технологические условия позволяют, то нагрузку циклонов по газу стабилизируют.

Процесс фильтрования газовых систем в фильтрах заключается в прохождении запылённого газа через пористые перегородки, задерживающие на своей поверхности твёрдые частицы. Регулирование такого процесса заключается в поддержании на минимально возможном значении концентрации частиц твёрдого вещества в газе на выходе из фильтра.

Регенерация фильтрующих поверхностей, например, в рукавных фильтрах, производится сжатым воздухом, периодически подаваемым через сопла в рукава с целью деформации фильтрующей ткани, приводящей к тому, что пыль с неё сбивается. Для этого регулируют перепад давления на фильтре. При достижении максимального значения позиционный регулятор выдаёт сигнал на продувку фильтра сжатым воздухом. Фильтр продувают до тех пор, пока перепад давления не снизится до минимального значения. Воздух на продувку должен поступать с давлением, значение которого устанавливается отдельным регулятором. В связи с трудностью измерения перепада давления на фильтре (засорение импульсных трубок пылью) регенерацию фильтрующих поверхностей проводят также по заранее заданной временной программе, в которой устанавливается определённая длительность периодов фильтрации и регенерации. Такая программа реализуется с помощью командного прибора.

5. Автоматизация тепловых процессов.

Тепловые процессы играют значительную роль в химической технологии. Химические реакции веществ с также их физические превращения сопровождаются, как правило, тепловыми эффектами. Тепловые явления часто составляют основу технологических процессов.

Передачу тепла от горячих теплоносителей к более холодным осуществляют в **теплообменниках**.

Различают теплообменники:

1. непосредственного смешения теплоносителей;
2. поверхностные теплообменники, в которых тепло передается через глухую разделительную стенку:
 - теплопередача может протекать без изменения агрегатного состояния теплоносителей (нагреватели, холодильники);
 - с изменением агрегатного состояния (испарители, конденсаторы).

Нагревание продуктов проводят также в трубчатых печах топочными газами.

5.1. Регулирование теплообменников смешения.

Регулирование теплообменников смешения заключается в поддержании постоянства температуры $T_{см}$ суммарного потока на выходе. Для создания необходимого температурного режима в химических аппаратах используют передачу энергии в результате смешения двух и более веществ с разными теплосодержаниями.

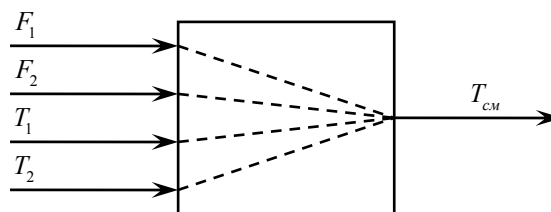


Рис. 5.1. Структурная схема регулирования теплообменника смешения.

Во многих задачах регулирования состава или температуры в резервуаре с мешалкой при определении передаточных функций принимают перемешивание идеальным. Тогда объект описывается дифференциальным уравнением первого порядка с постоянной времени, равной времени пребывания в резервуаре. Однако на практике отмечается запаздывание, по истечении которого изменение концентрации или температуры питания происходит на выходе из резервуара. Это запаздывание (запаздывание смешения) зависит от размеров резервуара, вязкости жидкости, конструкции и скорости вращения мешалки, определяющих интенсивность перемешивания.

Если $T_2 > T_{см} > T_1$, при этом теплоемкости и плотности жидкостей одинаковы, то

$$T_{см} = T_1 + \frac{F_2}{F_1 + F_2} (T_2 - T_1), \text{ (потери в окружающую среду пренебрегаем)}$$

Остановимся на особенностях статической характеристики собственно процесса смешения. Рассмотрим для примера аппарат непрерывного действия, в котором смешиваются два потока с расходами G_1 и G_2 , температурами θ_1 и θ_2 , удельными теплоемкостями c_{p1} и c_{p2} (рис. 5.2).

Пусть задача регулирования состоит в поддержании заданного значения θ^0 температуры выходного потока путём изменения расхода G_1 при условии, что основными источниками возмущений являются расход и температура второго потока G_2 и θ_2 , а температура θ_1 и удельные теплоемкости веществ постоянны и равны θ_1^0 , c_{p1} и c_{p2} . Найдем статические характеристики объекта по каналу регулирования $G_1 - \theta$ и каналам возмущения $G_2 - \theta$ и $\theta_2 - \theta$ (рис. 5.3). Для этого запишем уравнение теплового баланса:

$$G_1 \theta_1^0 c_{p1} + G_2 \theta_2 c_{p2} = (G_1 + G_2) \theta c_p,$$

где $c_p = (G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}) / (G_1 + G_2)$.

Отсюда

$$\theta = \frac{G_1 \theta_1^0 c_{p1}}{G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}} + \frac{G_2 \theta_2 c_{p2}}{G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}}. \quad (5.1)$$

Как видно из (5.1), характерной особенностью теплообменников смешения является нелинейность статических характеристик по температурным каналам, $\theta_1 - \theta$ и $\theta_2 - \theta$.

При условии малых отклонений координат объекта от их заданных значений можно провести линеаризацию зависимости (5.1) и найти приближенно коэффициенты усиления объекта по каждому каналу.

Обозначим заданные значения

входных и выходных координат через G_1^0 , G_2^0 , θ_2^0 и разложим функцию (5.1) в ряд Тейлора в малой окрестности G_1^0 , G_2^0 , θ_2^0 :

$$\theta = \theta^0 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_1} \right)^0 (G_1 - G_1^0) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_2} \right)^0 (G_2 - G_2^0) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \right)^0 (\theta_2 - \theta_2^0),$$

где

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_1} \right)^0 &= \frac{G_2^0 c_{p1} c_{p2} (\theta_1^0 - \theta_2^0)}{(G_1^0 c_{p1} + G_2^0 c_{p2})^2}; \\ \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_2} \right)^0 &= \frac{G_1^0 c_{p1} c_{p2} (\theta_2^0 - \theta_1^0)}{(G_1^0 c_{p1} + G_2^0 c_{p2})^2}; \\ \left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \right)^0 &= \frac{G_2^0 c_{p2}}{G_1^0 c_{p1} + G_2^0 c_{p2}}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Переходя к отклонениям $y = \theta - \theta^0$, $x_p = G_1 - G_1^0$, $x_{e1} = G_2 - G_2^0$, $x_{e2} = \theta_2 - \theta_2^0$, получим уравнение статической характеристики в виде:

$$y = k_p x_p + k_1 x_{e1} + k_2 x_{e2}, \quad (5.3)$$

где $k_p = \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_1} \right)^0$; $k_1 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_2} \right)^0$; $k_2 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \right)^0$.

Анализ зависимостей (5.3) показывает, что даже при обычных возмущениях, наблюдаемых на практике, ошибка в результате линеаризации может оказаться существенной. На-

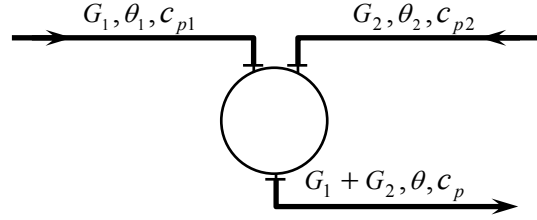


Рис. 5.2. Принципиальная схема теплообменника смешения.

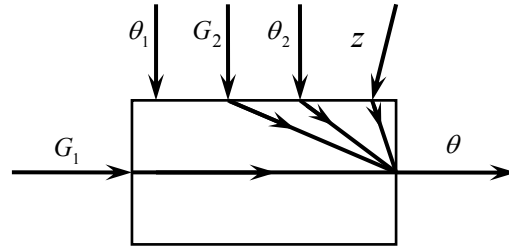


Рис. 5.3. Структурная схема теплообменника смешения.

пример, при увеличении расхода G_2 на 30 % по сравнению с заданным коэффициент усиления k_p может измениться на 5-20%, а k_1 – на 25-40% от расчетных, в зависимости от соотношения расходов G_1 и G_2 . Стабилизация отношения $G_1 / G_2 = \gamma^0$ позволяет уменьшить влияние этой нелинейности, так как

$$\theta = \frac{\theta_1^0 c_{p1}}{c_{p1} + \frac{G_2}{G_1} c_{p2}} + \frac{\theta_2^0 c_{p2}}{\frac{G_2}{G_1} c_{p1} + c_{p2}} = \frac{\theta_1^0 c_{p1}}{c_{p1} + \frac{1}{\gamma^0} c_{p2}} + \frac{\theta_2^0 c_{p2}}{\gamma^0 c_{p1} + c_{p2}}$$

и при отсутствии других возмущений, кроме G_2 , будет обеспечиваться постоянство выходной температуры.

Наличие других источников возмущения, кроме G_2 , потребует введение коррекции γ^0 , например, в зависимости от значения выходной температуры θ (см. пример каскадной АСР, рис. 5.7).

Рассмотрим несколько вариантов систем автоматизации теплообменников смешения и проведем их сравнительный анализ по качеству процессов регулирования.

Вариант 1. Задача стабилизации выходной температуры смеси θ решается применением одноконтурной замкнутой системы регулирования, в котором регулирующим воздействием является расход G_1 (рис. 5.4). Использование регулятора с интегральной составляющей и законе регулирования (ПИ- или ПИД-регулятор) гарантирует поддержание заданного значения θ в установившемся режиме, однако качество переходного процесса может оказаться неудовлетворительным при большой инерционности канала регулирования и сильных возмущениях.

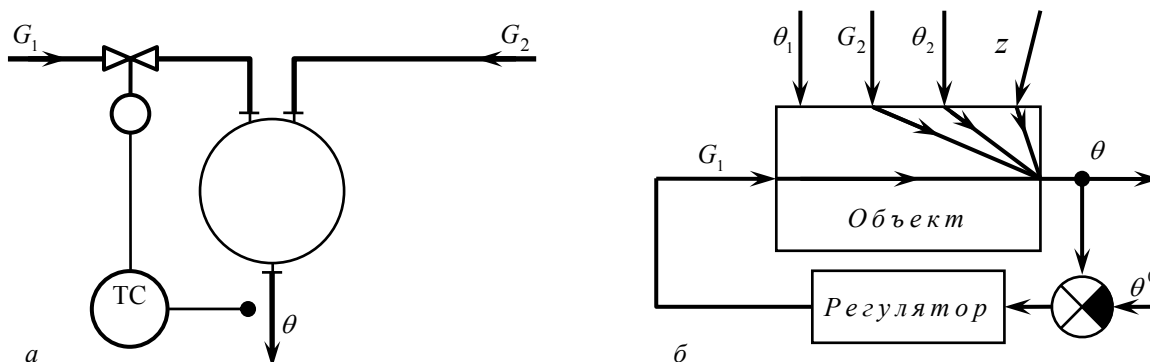


Рис. 5.4. Функциональная (а) и структурная (б) схемы замкнутой одноконтурной АСР температуры в теплообменнике смешения.

Вариант 2 включает систему регулирования соотношения расходов G_1 и G_2 (рис. 5.5). Это разомкнутая система регулирования, способность обеспечить инвариантность регулируемой температуры смеси θ к возмущениям по расходу G_2 , однако при наличии любого другого возмущения θ не будет равна заданной.

Вариант 3 (рис. 5,6) отличается компенсатором возмущения по θ_2 . Таким образом, данная система регулирования может обеспечить независимость выходной температуры от двух

основных возмущений G_2 и θ_2 . Однако при наличии других возмущений (например, изменение теплопотерь в окружающую среду) температура будет отклоняться от заданной.

Варианты 4 и 5 являются разновидностями комбинированных АСР, в которых обеспечивается компенсация основных возмущений и вводится обратная связь по регулируемой координате.

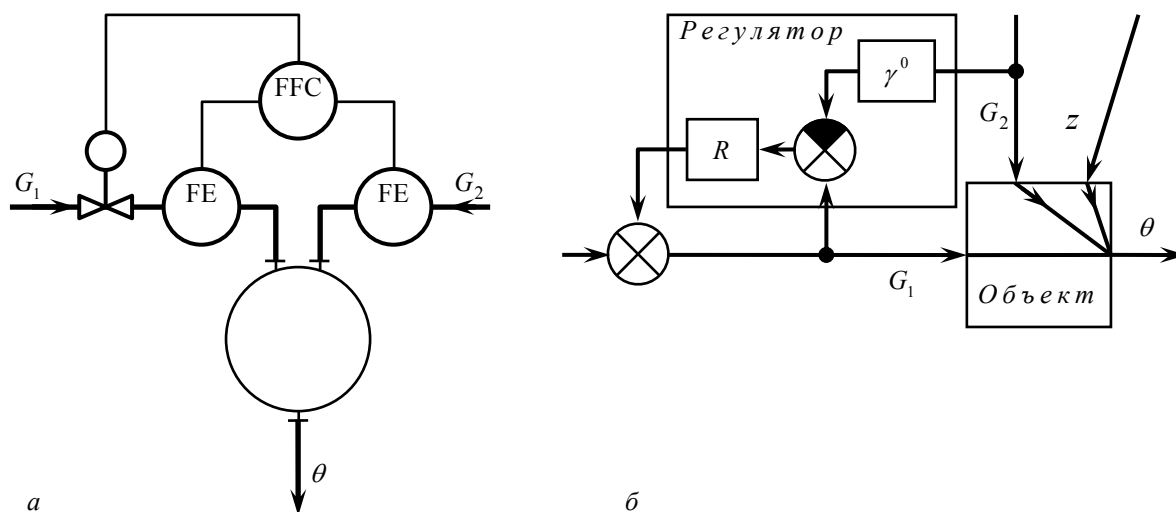


Рис. 5.5. Функциональная (а) и структурная (б) схемы разомкнутой одноконтурной АСР температуры в теплообменнике смешения.

Вариант 4 – система регулирования соотношения расходов G_1 и G_2 с коррекцией коэффициента по выходной температуре смеси θ (рис. 5,7), т.е. двухкаскадная АСР. Основным (внешним) регулятором является регулятор температуры 1 , а вспомогательным (внутренним) – регулятор соотношения 2 , осуществляющий компенсацию возмущения по расходу G_2 .

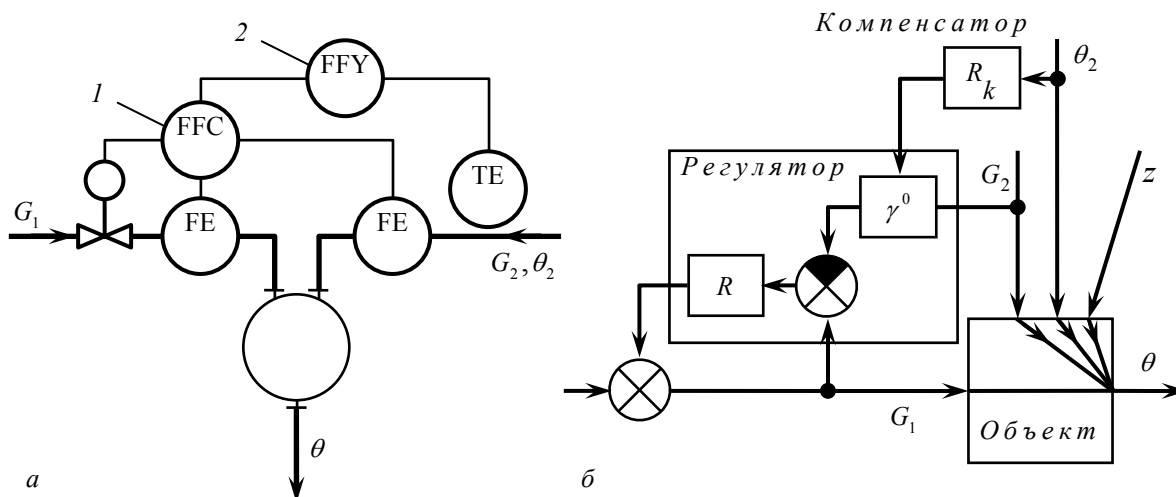


Рис. 5.6. Функциональная (а) и структурная (б) схемы разомкнутой АСР температуры в теплообменнике смешения с компенсацией двух возмущений: 1 – регулятор соотношения; 2 – компенсатор.

Вариант 5 – система регулирования температуры смеси с коррекцией по двум возмущениям G_2 и θ_2 , т.е. комбинированная АСР. Динамический компенсатор 2 (рис. 5,8) в данном случае должен содержать вычислительное устройство для расчёта корректирующей поправки

на задание по выходной температуре регулятору 1 в зависимости от температуры и расхода второго потока.

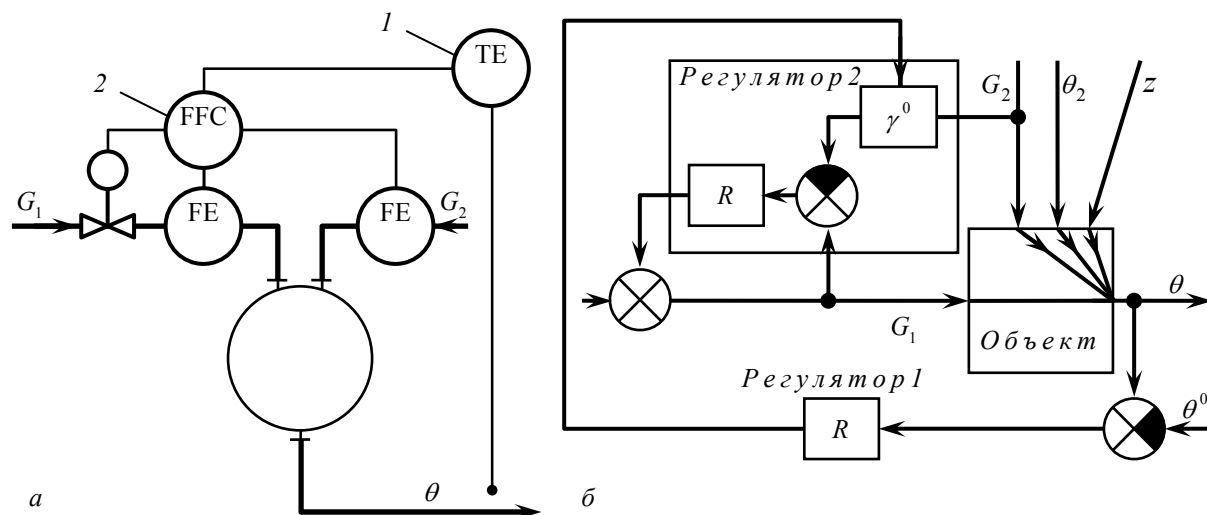


Рис. 5.7. Функциональная (а) и структурная (б) схемы каскадной АСР температуры в теплообменнике смешения:

1 – регулятор температуры; 2 – регулятор соотношения расходов.

Из рассмотренных примеров систем автоматизации наилучшее качество регулирования обеспечат два последних варианта. При этом в случае приборной реализации систем предпочтительнее четвертый вариант, который легко выполняется на серийных промышленных регуляторах. При использовании ЦВМ или микропроцессорной техники реализация любой из этих систем не представляет затруднений.

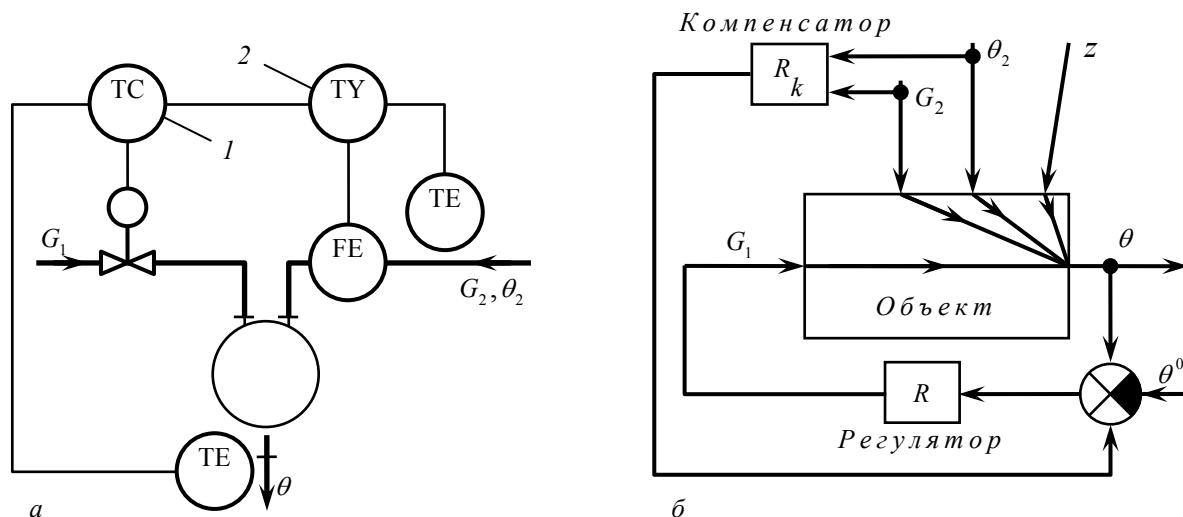


Рис. 5.8. Функциональная (а) и структурная (б) схемы комбинированной АСР температуры в теплообменнике смешения:

1 – регулятор температуры; 2 – компенсатор.

5.2. Регулирование поверхностных теплообменников.

Регулирование поверхностных теплообменников заключается в поддержании постоянства температуры одного из теплоносителей на выходе из теплообменника, например, T_{x2} .

Температура T_{x2} зависит от скорости передачи тепла или теплового потока q через стенку; в свою очередь эта температура определяется движущей силой процесса или средним температурным напором ΔT_{cp} . Величина ΔT_{cp} представляет собой логарифмическую разность температур

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{\ln \frac{T_{r1} - T_{x2}}{T_{r2} - T_{x1}}} \quad (5.4)$$

Величина ΔT_{cp} зависит от значений температур теплоносителей на входе и выходе теплообменника и, в частности, от температуры T_{x2} . С возрастанием T_{x2} движущая сила процесса уменьшается и наоборот. Это свидетельствует о том, что поверхностные теплообменники обладают свойством самовыравнивания.

Если отношение $\left(\frac{T_{r1} - T_{x2}}{T_{r2} - T_{x1}} \right) < 4$, то движущую

силу процесса при инженерных расчётах можно определить по среднеарифметической разности температур:

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{2} \quad (5.5)$$

Погрешность такой замены не превышает 10 %.

Основное уравнение теплообменника $q = KA\Delta T_{cp}$ в этом случае примет вид

$$q = KA \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{2}, \quad (5.6)$$

где K – коэффициент теплопередачи стенки; A – поверхность теплообменника.

Установим зависимость между температурой холодного теплоносителя на выходе T_{x2} и массовыми расходами теплоносителей и в случае, когда обменивающиеся теплом жидкости не изменяют своего агрегатного состояния.

Тепловой поток q через стенку выразим двумя следующими балансовыми уравнениями:

$$q = c_2 F_{m2} (T_{r1} - T_{r2}); \quad (5.7)$$

$$q = c_x F_{mx} (T_{x1} - T_{x2}), \quad (5.8)$$

где c_2 и c_x – удельные теплоёмкости теплоносителей, F_{m2} и F_{mx} – их массовые расходы.

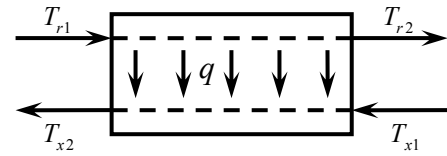


Рис. 5.9. Структурная схема поверхностного противотокового теплообменника.

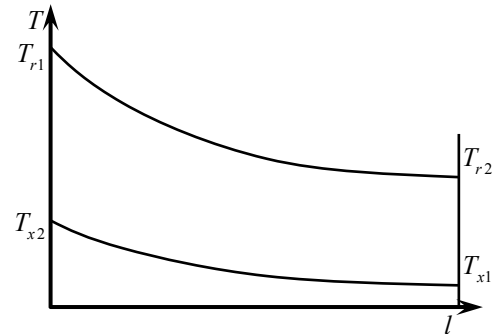


Рис. 5.10. График изменения температуры теплоносителей.

Из этих уравнений найдём температуры T_{x2} и $T_{г2}$ и подставим их в уравнение (5.6)

$$q = \frac{KA}{2} \left\{ T_{r1} - \left[T_{x1} + \frac{q}{c_x F_{mx}} \right] + \left[T_{r1} - \frac{q}{c_g F_{mг}} \right] - T_{x1} \right\}$$

Из последнего равенства определим тепловой поток

$$q = \frac{T_{r1} - T_{x1}}{\frac{1}{KA} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_x F_{mx}} + \frac{1}{c_g F_{mг}} \right)} \quad (5.9)$$

Разделив равенство (5.8) на (5.9), получим зависимость искомой относительной температуры от других величин процесса

$$\frac{T_{x2} - T_{x1}}{T_{r1} - T_{x1}} = \frac{1}{\frac{c_x F_{mx}}{KA} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c_x F_{mx}}{c_g F_{mг}} \right)} \quad (5.10)$$

Полученная зависимость в виде семейства кривых приведена на рис. 5.11, где показано влияние массовых расходов теплоносителей на температуру T_{x2} .

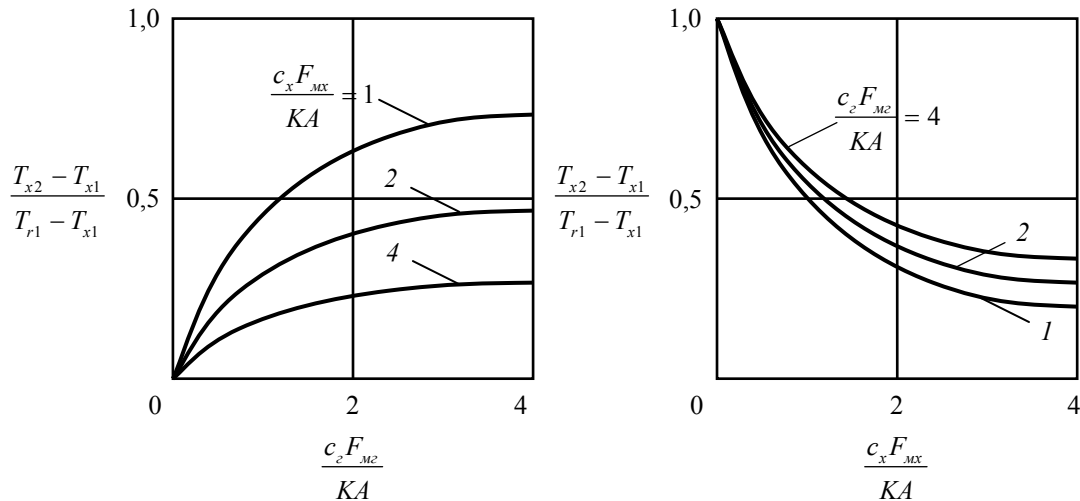


Рис. 5.11. Зависимость температуры на выходе теплообменника T_{x2} от массовых расходов холодного (х) и горячего (г) теплоносителей

Из этих зависимостей следует, что температура T_{x2} зависит от $F_{mг}$ и F_{mx} . Поскольку поток нагреваемого продукта представляет собой нагрузку объекта, для поддержания постоянства температуры T_{x2} может быть рекомендована схема регулирования, приведённая на рис. 41, а, по которой температуру продукта на выходе из теплообменника регулируют путём воздействия на расход другого теплоносителя $F_{mг}$.

Однако из зависимостей (рис. 5.11), следует, что температура T_{x2} более чувствительна к нагрузке холодного теплоносителя, чем к расходу горячего теплоносителя. В связи с этим затрудняется качественное регулирование теплообменников в широком интервале изменения расходов теплоносителей, и требуются регуляторы с дифференцирующей составляющей.

Если по условиям технологии не допускается изменение потоков теплоносителей, то температуру продукта на выходе из теплообменника регулируют путём байпасирования части продукта и изменения его расхода. При этом регулирующий клапан устанавливают на байпас-

ной линии. Такие схемы применяют, например, при использовании тепла горячих промежуточных или конечных продуктов для нагрева исходного сырья. Отметим, что байпасирование одного из теплоносителей требует некоторого увеличения поверхности теплообменника и большего расхода греющего агента (для переохлаждения или перегрева продукта) чем при дросселировании. Однако при этом улучшаются динамические характеристики системы регулирования вследствие исключения теплообменника из контура регулирования и уменьшения времени запаздывания объекта.

При изменении агрегатного состояния теплоносителей их температура в теплообменнике практически не изменяется и скорость теплопередачи q можно определить по равенству

$$q = rF_m, \quad (5.11)$$

где r – теплота фазового перехода; F_m – массовый расход среды.

Если в качестве греющего агента применяют водяной пар, то температуру технологического продукта обычно регулируют путём изменения подачи пара. При значительных колебаниях давления пара применяют каскадную систему регулирования давления пара с коррекцией по температуре нагретого продукта.

Возможно также регулирование скорости теплопередачи путём поддержания постоянства температуры продукта на выходе из теплообменника клапаном, установленным на линии отвода конденсата. Это приводит к частичному замещению теплообменника конденсатом, что в свою очередь скажется на суммарной величине коэффициента передачи теплообменника, а следовательно, и на скорости теплопередачи. Такая система реагирует более медленно, чем система с клапаном на линии пара, её применение рекомендуется лишь при отсутствии резких возмущений по нагрузке. Но вместе с тем она позволяет лучше использовать тепло водяного пара, так как значения его давления и темпера-

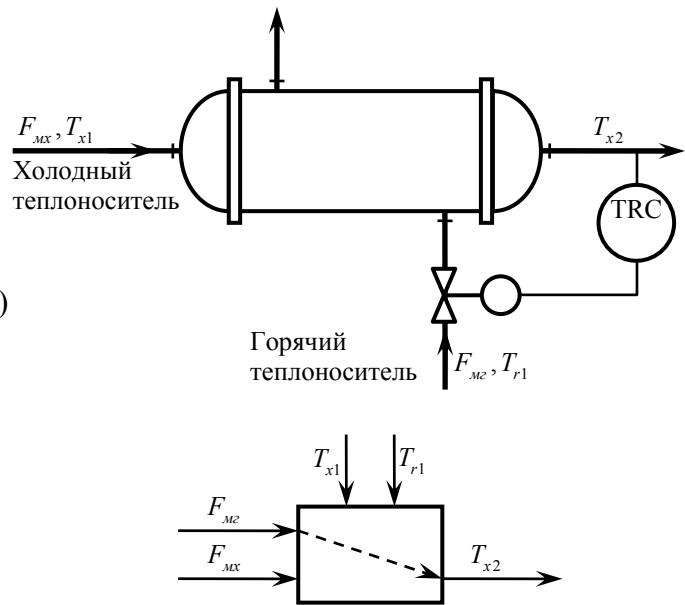


Рис. 5.12. Схема регулирования поверхностного теплообменника воздействием на расход горячего теплоносителя.

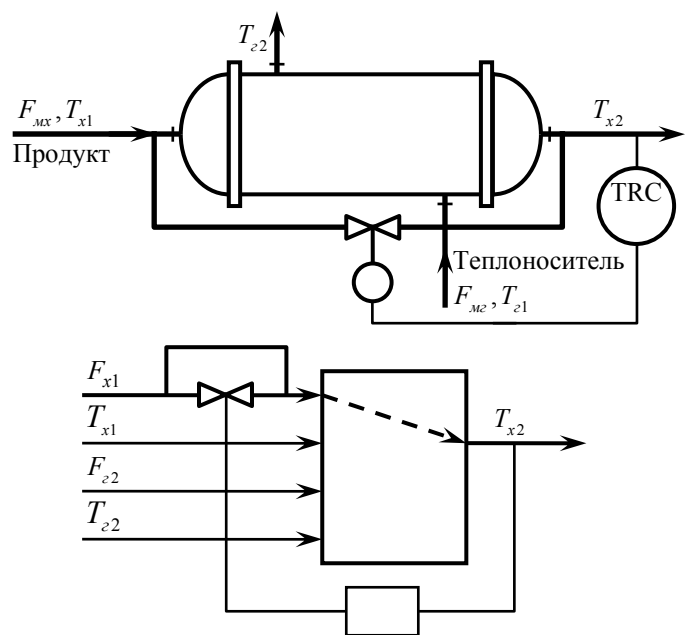


Рис. 5.13. Схема регулирования поверхностного теплообменника байпасированием холодного теплоносителя (продукта).

туры более высоки вследствие отсутствия дополнительных гидравлических сопротивлений на паропроводе, а отводимый конденсат принимает температуру несколько меньшую, чем температура конденсации пара. Это позволяет повысить эффективность работы теплообменника на 5-7 %. Кроме того, по размерам клапан, установленный на линии отвода конденсата будет меньше того, который установлен на линии подачи греющего пара.

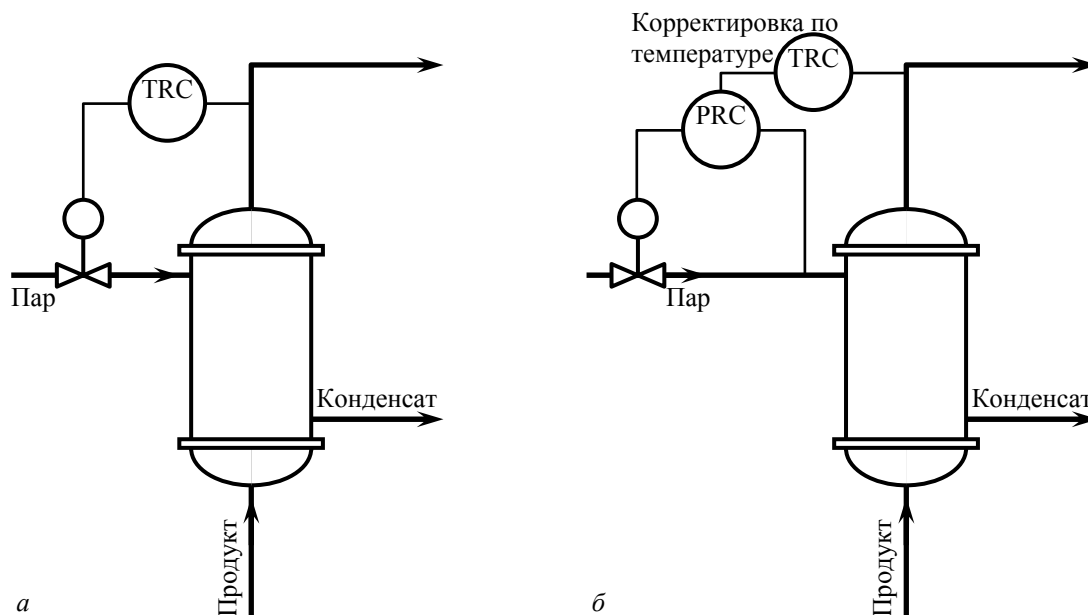


Рис. 5.14. *a* – схема регулирования работы теплообменника воздействием на расход греющего пара; *б* – каскадная система регулирования температуры продукта.

Процесс конденсации технологического продукта может быть охарактеризован температурой конденсата этого продукта. Непосредственное регулирование этих величин с воздействием на расход пара, являющийся нагрузкой конденсатора, не представляется возможным.

В этом случае наиболее широко применяют схемы, предусматривающие поддержание постоянства давления паров технологического продукта с воздействием на расход хладагента или конденсата, так как контуры регулирования давления достаточно динамичны. Регулирование уровня путём отвода конденсата (рис. 5.16, *a*) обеспечивает соблюдение материального баланса конденсатора. По расходу хладагента можно судить о тепловой нагрузке объекта. Изменение расхода конденсата продукта (рис. 5.16, *б*) обуславливает изменение теплообменной поверхности, благодаря частичному заполнению конденсатора жидкостью. Последнее, вследствие того, что при конденсации коэффициенты передачи паров значительно выше, чем при охлаждении конден-

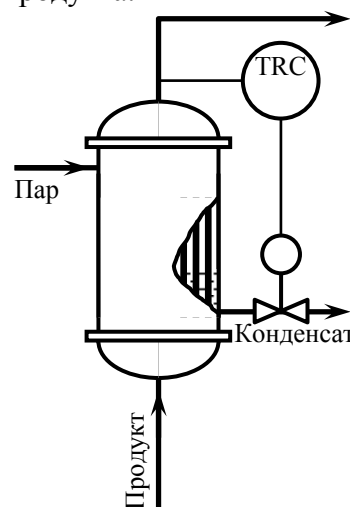


Рис. 5.15. Схема регулирования работы теплообменника путём воздействия на расход конденсата.

сата, приводит к изменению скорости теплопередачи. Тепловую нагрузку объекта определяют по текущему значению уровня конденсата.

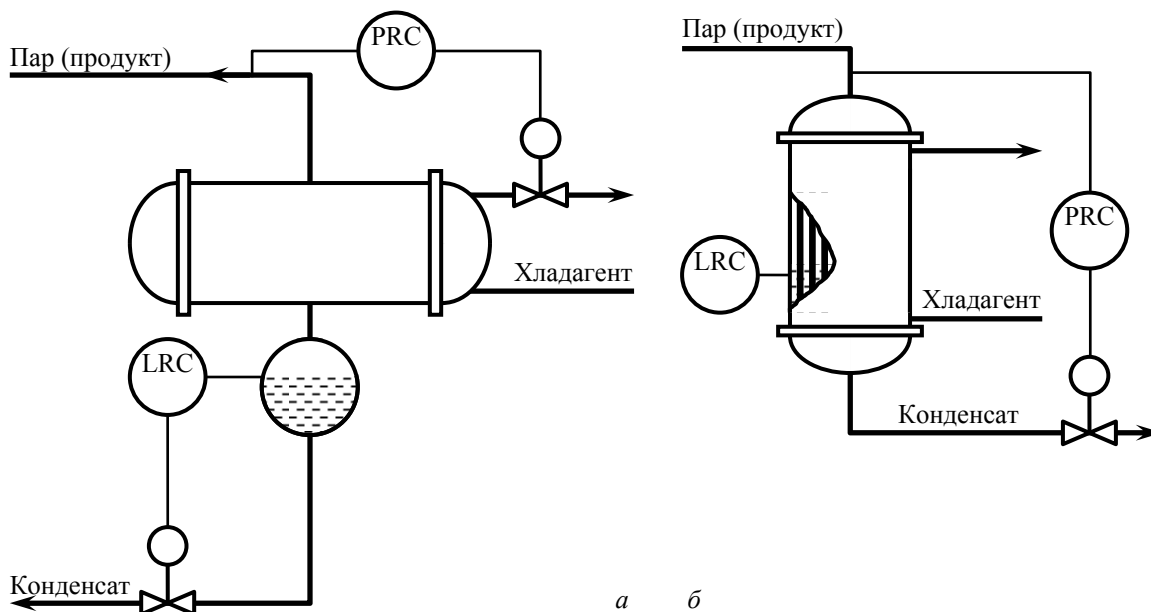


Рис. 5.16. Схемы регулирования работы конденсаторов путём воздействия на расходы хладагента (а) и конденсата (б).

5.3. Автоматизация трубчатых печей.

Прокачиваемый через змеевик трубчатой печи продукт нагревается за счет тепла образующегося при сжигании топливного газа.

Цель регулирования трубчатых печей поддержание постоянства температуры продукта на выходе из печи.

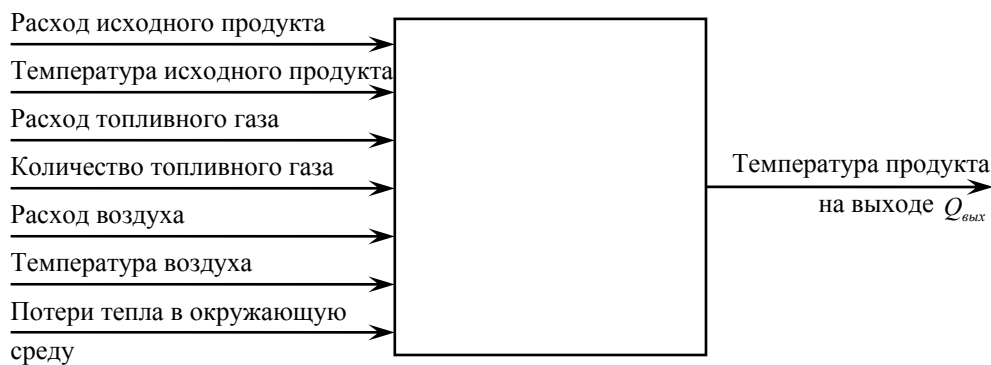


Рис. 5.17. Структурная схема регулирования трубчатых печей.

Возмущениями объекта являются:

- Расход и температура исходного продукта.
- Теплотворная способность топлива.
- Количество и температура воздуха, подаваемого для сжигания топлива.
- Потери тепла в окружающую среду.

Эти возмущения можно скомпенсировать с помощью АСР температуры продукта на выходе из печи, управляющей подачей топлива в печь. Однако трубчатые печи обладают запаздыванием по передаче тепла от дымовых газов через стенку змеевика к проходящему по змеевику продукту. Кроме того, переходный процесс по каналу "расход топлива – температу-

ра продукта на выходе" продолжается несколько часов. Поэтому при использовании **одноконтурной АСР** динамическая ошибка и время регулирования достигает больших значений.

Вместе с тем температура газов над перевальной стенкой достаточно быстро реагирует на изменение режима работы печи, обусловленное изменением количества топливного газа, подаваемого на сжигание.

Поэтому существенное улучшение качества регулирования температуры продукта на выходе из печи может быть достигнуто применением **каскадной схемы регулирования**, рис. 5.18, состоящей из регулятора температуры продукта на выходе из печи (корректирующий регулятор), воздействующего на задание регулятора температуры газов над перевальной стенкой (стабилизирующий регулятор), который управляет подачей топлива в печь. Стабилизирующий регулятор начинает компенсировать возникающие возмущения, влияющие на процесс сгорания топлива прежде, чем они приведут к изменению температуры продукта.

При резком изменении перегрузки печи по расходу нагреваемого продукта и при наличии возмущения по расходу топлива используют также выше описанную схему каскадного регулирования, стабилизирующий регулятор которой воздействует на регулятор соотношения расходов продукта и топлива. В этом случае **регулятор соотношения управляет подачей топлива в печь**, рис. 5.19.

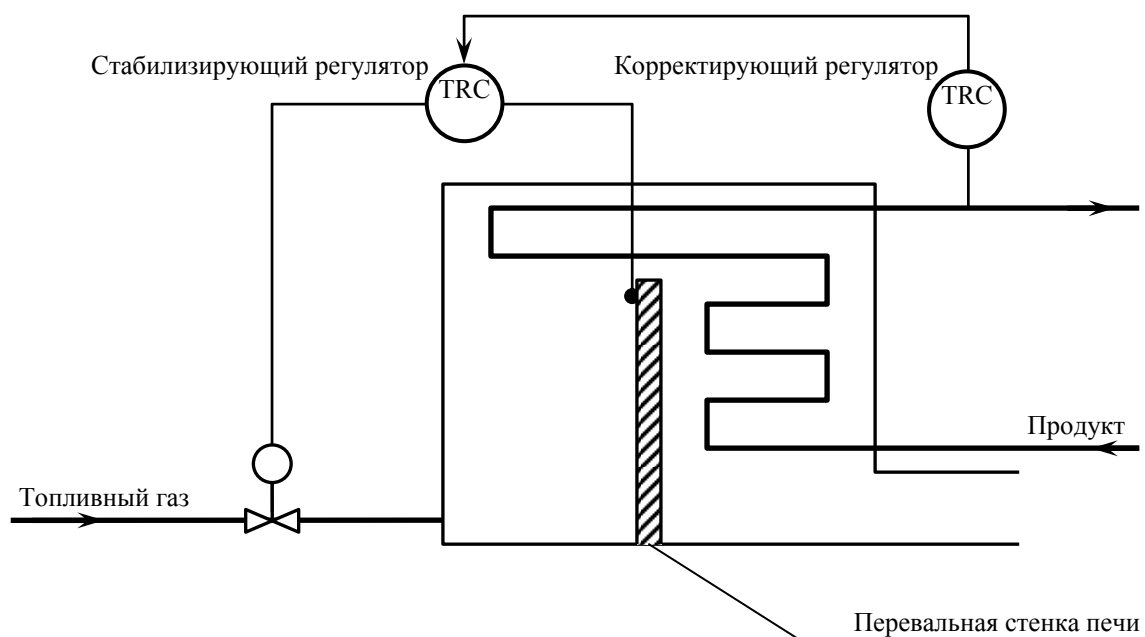


Рис. 5.18. Схема связанного регулирования процесса в трубчатой печи.

При принудительной подаче первичного воздуха оптимальный его расход, при котором температура в топке принимает максимальное значение поддерживают посредством **регулятора соотношения топливный газ – воздух**", обеспечивающего заданное значение коэффициента избытка воздуха, определяющего интенсивность процесса сгорания.

Если при этом теплотворная способность топлива существенно изменяется, то на регулятор соотношения направляют корректирующий сигнал от регулятора стабилизации содержания кислорода в топочных газах. Это обеспечивает полное сгорание топлива и высокое качество регулирования.

Сильным возмущением режима работы трубчатых печей со стороны топливного газа является изменение его давления. Это изменение компенсируют введением в АСУ температурой продукта на выходе из печи дополнительного регулятора давления, задание на который подают от регулятора температуры в топочном пространстве.

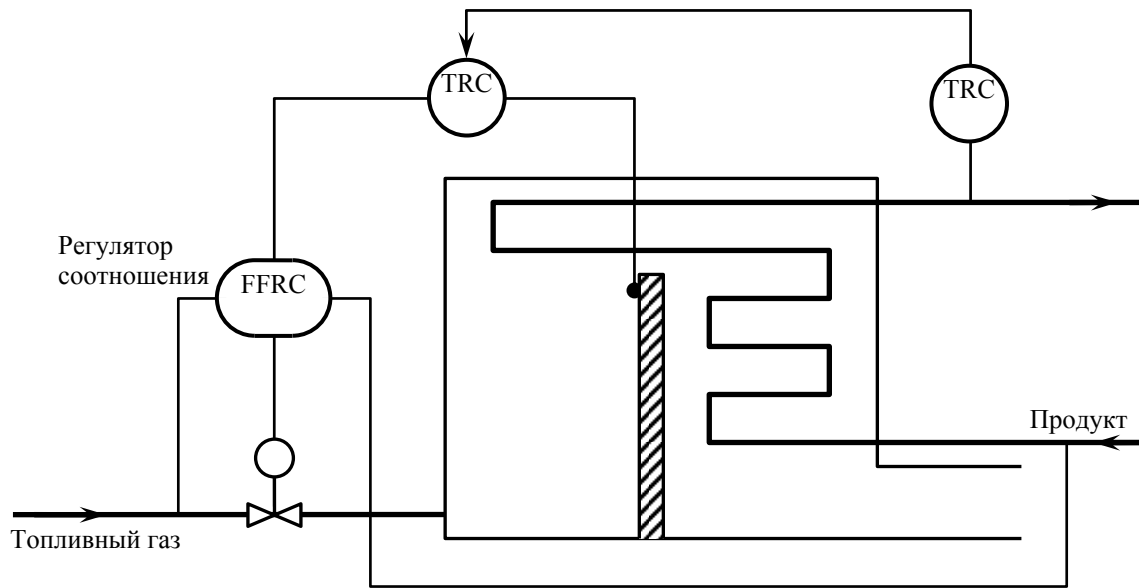


Рис. 5.19. Каскадная схема регулирования трубчатой печи с регулятором соотношения "топливный газ – продукт".

Такие системы обеспечивают качественное регулирование расхода топливного газа, так как расход газа в большой степени зависит от его давления.

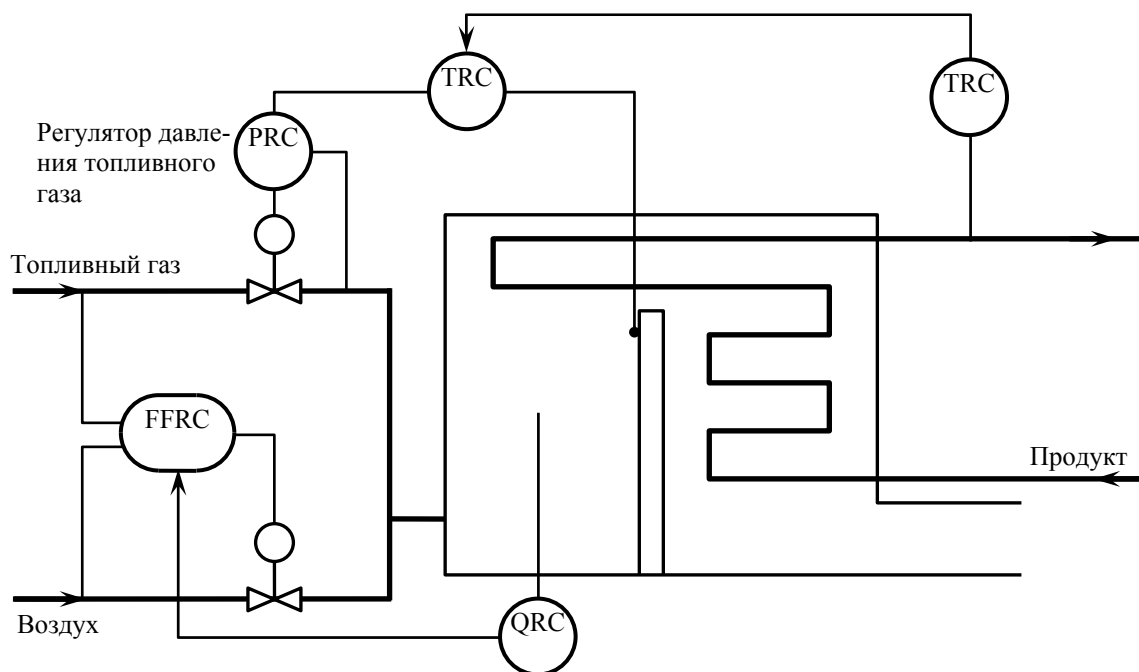


Рис. 5.20. Каскадная схема регулирования температуры продукта на выходе с регулятором соотношения "топливный газ – воздух" и коррекцией по содержанию кислорода в топочных газах.

Так как зависимость температуры в топке от соотношения "топливо – воздух" имеет экстремальный характер, при автоматизации трубчатых печей применяют системы экстремального регулирования.

