

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БРАГОРЕКТИФИКАЦИИ И РАЗРАБОТКА ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

In given article research of the basic channels of management by process of rectification is lead. Installations for rectification are difficult multivariate and multicoherent objects of management. The sizes describing process of rectification can be divided on entrance which form modes of columns, and the days off which reflect a condition of objects. The example of research of dynamics of process of rectification on one plate of a column is considered. Transfer functions are found and dynamic factors are determined. After transfer functions of one plate transfer functions for various liaison channels of increments of entrance and target parameters of all column are found is possible to define with their help.

Введение. Брагоректификационные установки (БРУ) являются сложными многомерными и многосвязными объектами управления.

Величины, характеризующие процесс брагоректификации, могут быть разделены на входные (независимые), которые формируют режимы колонн, и выходные (зависимые), которые отражают состояние объектов. Необходимость в управлении процессом брагоректификации вызывается тем, что независимые переменные подвергаются возмущениям, причем из-за взаимосвязанности параметров изменение одной или нескольких независимых переменных приводит к изменению многих зависимых величин.

Основная часть. Состояние процессов ректификации характеризуется тремя полями: полем концентраций, температуры и давления. Строго говоря, процессы в колоннах БРУ являются процессами многокомпонентной ректификации. Поэтому, помимо поля концентрации этанола, необходимо рассматривать также поля распределения по колоннам многочисленных примесей.

Хотя процесс наиболее полно характеризуется полем концентрации в колонне, в качестве регулируемых параметров, как правило, используются косвенные, легче поддающиеся измерению величины – давление и температура в различных зонах колонн.

Поскольку для поддержания требуемого режима разделения необходимо управлять несколькими регулируемыми величинами, а изменение одной входной величины часто приводит к изменению всех или нескольких выходных величин, БРУ в целом и каждая колонна (с дефлегматором и конденсатором) в отдельности относятся к классу многосвязных объектов управления.

Важно, что технологический поток между колоннами находится в жидком состоянии и, следовательно, между колоннами нет связи по паровому потоку. Это существенно ослабляет влияние последующих колонн на режим предыдущей колонны.

Благодаря указанным обстоятельствам каждую колонну (со своим дефлегматором и конденсатором) можно рассматривать как отдельный объект управления, что в значительной мере упрощает анализ и синтез системы регулирования.

Из числа основных переменных выделим те, которые потенциально могут быть использованы в автоматической системе (АС) как регулируемые (управляемые) величины и управляющие воздействия.

Регулируемые величины можно разделить на три подгруппы: 1) расходы бражного дистиллята, эпората, барды, лютерной воды, и также уровни барды, эпората, лютерной воды; 2) температура и давление в контрольных зонах колонны; 3) концентрация этилового спирта в паровой или жидкой фазах на тарелках колонны или в готовых продуктах (полупродуктах).

Управляющие воздействия делятся на две подгруппы: 1) независимые: расходы пара в колонны, отбор спирта-ректификата из ректификационной колонны, отбор эфиральдегидной фракции из эпорационной колонны, отбор сивушных продуктов из ректификационной колонны; 2) зависимые: расходы охлаждающей воды на конденсаторы-дефлегматоры колонн, отбор барды, отбор лютерной воды.

Возмущающие воздействия на процесс можно разделить на неконтролируемые и контролируемые. К неконтролируемым возмущениям следует отнести потери тепла в окружающую среду, а также такие внутренние возмущения, как изменение эффективности тарелок, теплообменников и т. д.

К контролируемым возмущениям относятся возмущения по количеству и концентрации питания колонн, энергетические параметры греющего пара, охлаждающей воды и питания.

Рассмотрим пример исследования динамики процесса ректификации на одной тарелке колонны (рисунок).

Будем считать, что тарелки пронумерованы снизу вверх; L_i , G_i – массовые расходы жидкости и пара, выходящих с i -й тарелки; $\Theta_{L,i}$, $\Theta_{G,i}$ – массовые концентрации легколетучего компонента (ЛЛК) в жидкости и паре, выходящих с тарелки; L_{i+1} , G_{i-1} – массовые расходы жидкости и пара, поступающие на i -ю тарелку колонны; $\Theta_{L,i+1}$, $\Theta_{G,i-1}$ – массовые концентрации ЛЛК в жидкости и паре, поступающие на i -ю тарелку; $T_{L,i+1}$, $T_{L,i}$ – температура жидкости, поступающей на i -ю тарелку и покидающей i -ю тарелку ко-

лонны; $T_{G,i-1}$, $T_{G,i}$ — температура пара, поступающего на i -ю тарелку и покидающего i -ю тарелку.

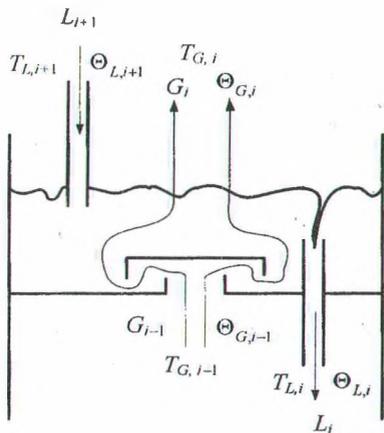


Рисунок. Тарелка ректификационной колонны

В качестве входных параметров отдельной тарелки будем рассматривать входные концентрации ЛЛК в жидкости и паре, входные температуры жидкости и пара, а также входные расходы жидкости и пара. За выходные параметры тарелки примем выходные концентрации ЛЛК в жидкости и паре. Задача исследования динамики сводится к нахождению величин приращений $\Theta'_{G_{\text{вых}}}(t)$ и $\Theta'_{L_{\text{вых}}}(t)$ выходных концентраций ЛЛК в жидкости и паре, которые вызываются возмущением каждого из входных параметров, например возмущением $\Theta'_{L_{\text{вх}}}(t)$ входной концентрации $\Theta_{L_{\text{вх}}}(t)$ ЛЛК в жидкости.

Наиболее естественной характеристикой динамических свойств данного объекта является передаточная функция. Поэтому будем искать передаточные функции тарелки для каждого канала связи между приращениями входных и выходных параметров. Всего таких каналов восемь: $\Theta'_{L_{\text{вх}}}(t) \rightarrow \Theta'_{L_{\text{вых}}}(t)$; $\Theta'_{G_{\text{вх}}}(t) \rightarrow \Theta'_{L_{\text{вых}}}(t)$; $L'_{\text{вх}}(t) \rightarrow \Theta'_{L_{\text{вых}}}(t)$; $G'_{\text{вх}}(t) \rightarrow \Theta'_{L_{\text{вых}}}(t)$, и аналогичные каналы с $\Theta'_{G_{\text{вых}}}(t)$ в качестве приращения выходного параметра: $\Theta'_{L_{\text{вх}}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_{\text{вых}}}(t)$; $\Theta'_{G_{\text{вх}}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_{\text{вых}}}(t)$; $L'_{\text{вх}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_{\text{вых}}}(t)$; $G'_{\text{вх}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_{\text{вых}}}(t)$.

Рассмотрим процесс, происходящий на i -й тарелке ректификационной колонны. Входными параметрами для этой тарелки будут: концентрация $\Theta_{L,i+1}(t)$ ЛЛК в жидкости, поступающей с $(i+1)$ тарелки колонны, и расход $L_{i+1}(t)$ поступающей жидкости, а также концентрация $\Theta_{G,i-1}(t)$ ЛЛК в паре, поступающем с $(i-1)$ тарелки, и расход $G_{i-1}(t)$ поступающего пара. Выходными параметрами тарелки являются: концентрация $\Theta_{L,i}(t)$ ЛЛК в жидкости, уходящей с i -й тарелки; концентрация $\Theta_{G,i}(t)$ ЛЛК в паре, уходящем с i -й тарелки; расход

уходящем с i -й тарелки; расход $L_i(t)$ жидкости, уходящей с тарелки. При этом считаем, что расход пара на входе и выходе тарелки имеет одно и то же значение; это обстоятельство отражается математической моделью тарелки, предложенной в работе [1].

Если в ректификационной колонне установлен стационарный режим работы с постоянными значениями входных и выходных параметров, то на каждой тарелке режим протекания процесса будет стационарным со значениями $\Theta^0_{L,i+1}$, $\Theta^0_{G,i-1}$, L^0_{i+1} , G^0_{i-1} входных параметров и значениями $\Theta^0_{L,i}$, $\Theta^0_{G,i}$, L^0_i выходных параметров. Для описания процесса, протекающего на тарелке, будем использовать математическую модель, построенную в работе [1]. В стационарном режиме работы тарелки входной расход жидкости L^0_{i+1} равен выходному расходу жидкости L^0_i , поэтому величина M^0_i является постоянной. Кроме того, производная $d\Theta_{L,i}/dt$ в стационарном режиме равна нулю и из уравнений математической модели, предложенной в работе [1], получим:

$$L^0_{i+1}(\Theta^0_{L,i+1} - \Theta^0_{L,i}) + G^0_{i-1}(\Theta^0_{G,i-1} - \Theta^0_{G,i}) = 0, \quad (1)$$

$$\Theta^0_{G,i} = \Theta^0_{G,i-1} e^{R_i} - \Theta^*_G(\Theta^0_{L,i})(e^{R_i} - 1). \quad (2)$$

Пусть имеет место возмущение $\Theta'_{L,i+1}(t)$ концентрации ЛЛК в жидкости, поступающей на i -ю тарелку, в то время как все остальные входные параметры сохраняют прежние стационарные значения $\Theta^0_{G,i-1}$, L^0_{i+1} , G^0_{i-1} . Величина M^0_i также будет иметь прежние стационарное значение M^0_i . При указанном возмущении входной концентрации ЛЛК в жидкости появляются возмущения выходных параметров: $\Theta'_{L,i}(t)$ и $\Theta'_{G,i}(t)$. Выходные функции объекта будут иметь следующий вид:

$$\Theta_{L,i}(t) = \Theta^0_{L,i} + \Theta'_{L,i}(t), \quad (3)$$

$$\Theta_{G,i}(t) = \Theta^0_{G,i} + \Theta'_{G,i}(t). \quad (4)$$

При этом, пользуясь математической моделью, уравнения, описывающие процесс на тарелке, примут вид

$$M^0_i \frac{d\Theta'_{L,i}}{dt} = L^0_{i+1}(\Theta'_{L,i+1} - \Theta'_{L,i}) + G^0_{i-1}\Theta'_{G,i}, \quad (5)$$

$$\Theta'_{G,i} = [\Theta^*_G(\Theta^0_{L,i}) - \Theta^*_G(\Theta^0_{L,i} + \Theta'_{L,i})] \times (e^{R_i} - 1). \quad (6)$$

В общем случае кривая равновесия $\Theta^*_G(\Theta_{L,i})$ имеет сложный нелинейный вид. Аппроксимируя эту кривую в окрестности точки стационарного режима прямой (касательной), получаем в линейном приближении для i -й тарелки:

$$\Theta^*_G(\Theta_{L,i}) = \gamma_i \Theta'_{L,i} + \delta_i, \quad (7)$$

где $\gamma_i = \frac{\partial \Theta^*_G(\Theta_{L,i})}{\partial \Theta_{L,i}}$; $\delta_i = \Theta^*_G(\Theta^0_{L,i})$.

В соответствии с этим уравнением найдем

$$\Theta'_{G,i} = \gamma_i (e^{R^0 i} - 1) \Theta'_{L,i}. \quad (8)$$

Подставив выражение для $\Theta'_{G,i}$ по формуле (8) в уравнение (5), получим следующее соотношение, связывающее приращения $\Theta'_{L,i+1}$ и $\Theta'_{L,i}$ входного и выходного параметров:

$$M^0_i \frac{d\Theta'_{L,i}}{dt} + (L^0_{i+1} + \gamma_i \eta_i G^0_{i-1}) \Theta'_{L,i} = L^0_{i+1} \Theta'_{L,i+1}, \quad (9)$$

где введено обозначение $\eta_i = e^{R^0 i} - 1$. С помощью уравнения (9) задается функциональный оператор i -й ректификационной тарелки для канала $\Theta'_{L,i+1}(t) \rightarrow \Theta'_{L,i}(t)$. При этом возмущение концентрации $\Theta'_{L,i+1}(t)$ в жидкости, поступающей на тарелку, рассматривается как входная функция оператора, а возмущение концентрации $\Theta'_{L,i}(t)$ в жидкости, уходящей с тарелки, — как выходная функция оператора.

Если считать, что входное возмущение $\Theta'_{L,i+1}(t)$ возникло в момент $t = 0$, то естественным начальным условием для уравнения (9) будет

$$\Theta'_{L,i}(t) \Big|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

Это условие означает, что до момента времени $t = 0$ процесс на тарелке протекал в стационарном режиме при постоянных значениях всех входных и выходных параметров.

Передающую функцию $W^{(i)}_{11}(p)$ i -й тарелки для канала $\Theta'_{L,i+1}(t) \rightarrow \Theta'_{L,i}(t)$ находим, применяя к уравнению (9) преобразование Лапласа по переменной t и используя начальное условие (10):

$$W^{(i)}_{11}(p) = \frac{L^0_{i+1}}{M^0_i p + L^0_{i+1} + \gamma_i \eta_i G^0_{i-1}}.$$

Определим аналогичным образом передающую функцию $W^{(i)}_{21}(p)$ i -й тарелки для канала $\Theta'_{G,i-1}(t) \rightarrow \Theta'_{L,i}(t)$. Пусть произошло возмущение концентрации ЛЛК в паре, поступающем на тарелку, на величину $\Theta'_{G,i-1}(t)$. Все остальные входные параметры сохраняют прежние стационарные значения $\Theta^0_{L,i+1}$, L^0_{i+1} и G^0_{i-1} . Выполняя аналогичные преобразования, получим выражение для передающей функции $W^{(i)}_{21}(p)$ по рассматриваемому каналу:

$$W^{(i)}_{21}(p) = \frac{\eta_i G^0_{i-1}}{M^0_i p + L^0_{i+1} + \gamma_i \eta_i G^0_{i-1}}.$$

Найдем теперь передаточные функции по двум оставшимся каналам связи приращений входных и выходных параметров:

$$L'_{i+1}(t) \rightarrow \Theta'_{L,i}(t), \quad G'_{i-1}(t) \rightarrow \Theta'_{L,i}(t).$$

Пусть величина расхода жидкости, поступающей на тарелку, получает приращение $L'_{i+1}(t)$, в то время как остальные входные параметры сохраняют стационарные значения G^0_{i-1} , $\Theta^0_{G,i-1}$, $\Theta^0_{L,i+1}$. Выходные концентрации при этом получают приращения $\Theta'_{L,i}(t)$ и $\Theta'_{G,i}(t)$. Кроме того, будут изменяться во времени величины L_i — расход жидкости, уходящей с тарелки, и M_i — массовое количество жидкости на тарелке. Обозначим их приращения относительно стационарных значений L^0_i и M^0_i через $L'_i(t)$ и $M'_i(t)$. Выполнив преобразования, находим выражение для передаточной функции $W^{(i)}_{31}(p)$:

$$W^{(i)}_{31}(p) = \frac{\Theta^0_{L,i+1} - \Theta^0_{L,i}}{M^0_i p + L^0_{i+1} + \gamma_i \eta_i G^0_{i-1}}.$$

При возникновении в момент времени $t = 0$ возмущения $G'_{i-1}(t)$ величины расхода пара, поступающего на тарелку, выходные концентрации ЛЛК в жидкости и газе получают приращения $\Theta'_{L,i}(t)$, $\Theta'_{G,i}(t)$. Кроме того, получит приращение $G'_i(t)$ величина расхода пара, уходящего с тарелки (с математической модели следует, что $G'_i(t) = G'_{i-1}(t)$ во все моменты времени). Все остальные входные параметры сохраняют прежние стационарные значения L^0_{i+1} , $\Theta^0_{G,i-1}$, $\Theta^0_{L,i+1}$. Расход уходящей с тарелки жидкости и массовое количество жидкости, очевидно, также будут иметь прежние стационарные значения L^0_i и M^0_i . Выполняя преобразования, находим передающую функцию $W^{(i)}_{41}(p)$ i -й тарелки для канала $G'_{i-1}(t) \rightarrow \Theta'_{L,i}(t)$:

$$W^{(i)}_{41}(p) = \frac{\Theta^0_{G,i-1} - \Theta^0_{G,i}}{M^0_i p + L^0_{i+1} + \gamma_i \eta_i G^0_{i-1}}.$$

Выражения для передаточных функций i -й тарелки включают величины $\Theta^0_{L,i+1}$, $\Theta^0_{G,i-1}$, L^0_{i+1} , G^0_{i-1} , $\Theta^0_{L,i}$, $\Theta^0_{G,i}$, M^0_i , характеризующие стационарный режим работы ректификационной колонны. Поэтому все передаточные функции зависят от выбора стационарного режима.

Отметим, что, согласно соотношению (8), выходной параметр $\Theta'_{G,i}$ линейно выражается через выходной параметр $\Theta'_{L,i}$ поэтому передаточные функции $W^{(i)}_{12}(p)$, $W^{(i)}_{22}(p)$, $W^{(i)}_{32}(p)$,

$W^{(i)}_{42}(p)$ для каналов $\Theta'_{L_{i+1}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t)$, $\Theta'_{G_{i-1}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t)$, $L'_{i+1}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t)$, $G'_{i-1}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t)$ легко получаются из известных выражений для передаточных функций $W^{(i)}_{11}(p)$, $W^{(i)}_{21}(p)$, $W^{(i)}_{31}(p)$, $W^{(i)}_{41}(p)$.

Поскольку $\Theta'_{G_i}(t) = \gamma_i \eta_i \Theta'_{L_i}(t)$, имеем:

$$W^{(i)}_{12}(p) = \frac{\Theta'_{G_i}(p)}{\Theta'_{L_{i+1}}(p)} = \gamma_i \eta_i W^{(i)}_{11}(p).$$

Аналогично найдем выражения для других передаточных функций:

$$W^{(i)}_{22}(p) = \gamma_i \eta_i W^{(i)}_{21}(p), \quad W^{(i)}_{32}(p) = \gamma_i \eta_i W^{(i)}_{31}(p),$$

$$W^{(i)}_{42}(p) = \gamma_i \eta_i W^{(i)}_{41}(p).$$

Запишем данные для расчета передаточных функций по каналам для бражной колонны БРУ. Информация для расчета питающей тарелки бражной колонны взята из литературы:

$$L^0_{i+1} = 1300 \text{ кг/ч}; \quad L^0_i = 800 \text{ кг/ч};$$

$$G^0_{i-1} = 290 \text{ кг/ч}; \quad G^0_i = 290 \text{ кг/ч};$$

$$\Theta^0_{L_{i+1}} = 10 \text{ мас.}\%; \quad \Theta^0_{L_i} = 7,31 \text{ мас.}\%;$$

$$\Theta^0_{G_{i-1}} = 46,6 \text{ мас.}\%; \quad \Theta^0_{G_i} = 47,5 \text{ мас.}\%.$$

По исходным данным, согласно формулам, приведенным в [1] и [2], рассчитаем необходимые величины:

$$M^0_i = 500 \text{ кг/ч}; \quad K^0_i = 1,9; \quad R^0_i = 3,3;$$

$$\gamma_i = 1; \quad \eta_i = 27,5.$$

С учетом данных и рассчитанных величин запишем получившиеся передаточные функции:

$$W^{(i)}_{11}(p) = \frac{1300}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{21}(p) = \frac{7975}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{31}(p) = \frac{2,69}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{41}(p) = \frac{0,9}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{12}(p) = \frac{35750}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{22}(p) = \frac{219312,5}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{32}(p) = \frac{73,975}{500p + 7975};$$

$$W^{(i)}_{42}(p) = \frac{24,75}{500p + 7975}.$$

По известным передаточным функциям в системе MATLAB были получены кривые разгона по всем исследуемым каналам бражной колонны.

По данным кривым разгона были определены динамические параметры методом «касательной». Были получены следующие динамические параметры по исследуемым каналам:

$$\Theta'_{L_{i+1}}(t) \rightarrow \Theta'_{L_i}(t): T_0 = 0,085; K_0 = 0,16.$$

$$\Theta'_{G_{i-1}}(t) \rightarrow \Theta'_{L_i}(t): T_0 = 0,09; K_0 = 0,99.$$

$$L'_{i+1}(t) \rightarrow \Theta'_{L_i}(t): T_0 = 0,11; K_0 = 3,34.$$

$$G'_{i-1}(t) \rightarrow \Theta'_{L_i}(t): T_0 = 0,09; K_0 = 1,12.$$

$$\Theta'_{L_{i+1}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t): T_0 = 0,1; K_0 = 4,44.$$

$$\Theta'_{G_{i-1}}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t): T_0 = 0,098; K_0 = 27,27.$$

$$L'_{i+1}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t): T_0 = 0,1; K_0 = 9,2.$$

$$G'_{i-1}(t) \rightarrow \Theta'_{G_i}(t): T_0 = 0,1; K_0 = 3,08.$$

Приведенные динамические параметры позволяют описать динамику по всем исследованным каналам с помощью дифференциальных уравнений первого порядка. По всем каналам бражная колонна обладает свойством самовыравнивания.

Заключение. После того как найдены передаточные функции одной тарелки можно с их помощью определить передаточные функции для различных каналов связи приращений входных и выходных параметров всей колонны.

Кроме тарелок, в состав ректификационной колонны входят и другие элементы (дефлегматор и куб-испаритель), поэтому, строго говоря, прежде чем исследовать динамические свойства всей колонны, необходимо рассмотреть динамику каждого из элементов. Однако, как отмечалось в работе [1], динамические процессы, протекающие в дефлегматоре и куб-испарителе, осуществляются значительно быстрее, чем в собственно колонне. Все возмущения передаются через эти элементы практически без искажений. Таким образом, задача изучения динамики колонны сводится к исследованию динамики последовательности нескольких тарелок.

Литература

1. Ульянов, Н. И. Анализ процесса производства спирта как объекта управления / Н. И. Ульянов // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2006. – Вып. XIV. – С. 163–167.
2. Протодьяконов, И. О. Динамика процессов химической технологии: учеб. пособие для вузов / И. О. Протодьяконов, О. В. Муратов, И. И. Евлампиев. – Л.: Химия, 1984. – 304 с.