

Н. И. Ульянов, ассистент; И. Ф. Кузьмицкий, доцент

СПОСОБ РАСЧЕТА РАЗДЕЛЕНИЯ СПИРТОВЫХ СМЕСЕЙ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

The way of adaptation of a method of modelling of multicomponent rectification «from a plate to a plate» for calculation of division alcohol multicomponent mixes is offered. The given way allows to reduce analytical dynamic models, models aperiodic a link of the second order and a link of delay that has allowed to receive transfer functions for calculation of parameters of quality of process of rectification. The analysis of the received transfer functions for the various substances included in made spirit and various modes of productivity of installation which has shown that essentially distinguished factors of transfer are observed carried out. It causes application of a circuit of adaptation of factor of amplification in system of automatic control. For an estimation of quality of management rectification installations from a position of quality management of a product and economy of power resources the generalized criterion is offered.

Введение. Теория ректификации многокомпонентных смесей разрабатывалась достаточно интенсивно. Широко известны методика Тиле и Геддеса – «способ независимого определения концентраций», а также методика Льюиса и Матисона – «от тарелки к тарелке».

В методике Тиле и Геддеса в качестве независимых переменных берутся температуры на тарелках колонны. Метод Льюиса и Матисона отличается тем, что в качестве независимых переменных выбирается распределение каждого компонента между дистиллятом и кубовым продуктом.

Метод Льюиса – Матисона с большим трудом обеспечивает сходимость вычислений и требует применения специальных процедур (блокировка, отслеживание значений переменных и др.).

Описанные способы разработаны для использования в нефтехимической, химической отраслях промышленности, где содержания компонентов в разделяемых смесях сопоставимы друг с другом. В спиртовой промышленности перерабатываются смеси, в которых в большой степени присутствует этанол и вода, а остальные компоненты являются примесными и содержатся в малом количестве. Большое различие в характерах и свойствах смесей наблюдается для верхнего и нижнего продуктов колонны. Эфиральдегидная фракция может содержать около 30% примесных компонентов при содержании этилового спирта также 30%, а содержание примесных компонентов в готовом продукте должно быть мизерным [1], не более нескольких миллиграммов на литр. Применение описанных методов к спиртовым смесям не всегда приводит к сходимости вычислений.

Поэтому осуществляются попытки адаптировать уже известные способы расчета ректификации многокомпонентных смесей для расчета разделения спиртовых многокомпонентных смесей.

Основная часть. Математическая модель массообменного процесса на тарелке колонны брагоректификационной установки (БРУ) имеет следующий вид [2]:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} - L_i, G_{i-1} = G_i,$$

$$M_i \frac{d\Theta_{L,i}}{dt} = L_{i+1}(\Theta_{L,i+1} - \Theta_{L,i}) + G_{i-1}(\Theta_{G,i-1} - \Theta_{G,i}),$$

$$\Theta_{G,i}(t) = \Theta_{G,i-1}(t)e^{R_i(t)} - \Theta_{G,i}^*(\Theta_{L,i}(t))(e^{R_i(t)} - 1).$$

Общий коэффициент массопередачи определяется по формуле

$$K_i = \frac{S}{\frac{1}{\beta_{yi}} + \frac{m_i}{\beta_{xi}}},$$

где S – эффективная площадь тарелки; β_{yi} – частный коэффициент массоотдачи в паровой фазе; m_i – коэффициент, учитывающий равновесие в системе «этиловый спирт – вода»; β_{xi} – частный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе.

Коэффициенты β_{yi} , β_{xi} используются для корректировки модели или, точнее, для «привязки» ее к реальному объекту.

Для повышения точности расчета коэффициента массопередачи предлагается следующая модель вычисления коэффициентов массоотдачи:

$$\beta_{yi} = \alpha_1 G_i^2 + \alpha_2 G_i + \alpha_3,$$

$$\beta_{xi} = \alpha_4 L_i + \alpha_5,$$

где α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 – настроечные коэффициенты.

Тепловая модель процесса брагоректификации в дифференциальной форме имеет вид

$$S \frac{dl}{dt} = G_{i-1} + L_{i+1} - L_i(l) - G_i(l),$$

$$\rho C_p S \frac{d(lT)}{dt} = \rho C_p \times$$

$$\times [G_{i-1} T_{G,i-1} + L_{i+1} T_{L,i+1} - L_i(l) T_{L,i} - G_i(l) T_{G,i}],$$

где ρ – плотность жидкости; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; T – температура жидкости на тарелке.

Коэффициенты передачи и постоянные времени тарелок бражной колонны

Максимальный режим производительности БРУ		Номинальный режим производительности БРУ		Минимальный режим производительности БРУ	
K_i	T_i	K_i	T_i	K_i	T_i
0,18	0,08	0,20	0,08	0,27	0,09
0,19	0,08	0,25	0,08	0,29	0,09
0,21	0,08	0,30	0,08	0,31	0,09
0,25	0,08	0,35	0,08	0,37	0,09
0,27	0,08	0,40	0,08	0,44	0,09
0,29	0,10	0,45	0,09	0,51	0,10
0,33	0,10	0,50	0,09	0,58	0,10
0,36	0,10	0,55	0,09	0,64	0,10
0,39	0,10	0,60	0,09	0,71	0,10
0,42	0,10	0,65	0,09	0,78	0,10
0,52	0,16	0,70	0,09	0,85	0,11
0,60	0,16	0,75	0,09	0,91	0,11
0,70	0,19	0,80	0,09	0,99	0,11
0,75	0,20	1,00	0,09	1,00	0,11
0,80	0,20	1,00	0,09	1,30	0,11
0,90	0,26	1,00	0,09	1,35	0,11
1,05	0,27	1,00	0,10	1,35	0,15
1,50	0,27	1,00	0,11	1,35	0,16
1,90	0,28	1,40	0,12	1,36	0,17
1,90	0,28	1,50	0,13	1,37	0,18
2,40	0,09	1,60	0,14	1,38	0,19
2,51	0,10	1,70	0,15	1,40	0,20
2,54	0,13	1,90	0,20	1,45	0,30
2,60	0,16	2,00	0,25	1,50	0,35
3,82	0,20	2,80	0,30	1,60	0,40
4,89	0,23	2,90	0,35	1,79	0,45
5,16	0,26	3,32	0,40	2,48	0,55
5,24	0,29	3,45	0,45	2,66	0,80
5,28	0,33	3,50	0,50	2,73	0,90

Пользуясь уравнениями тепло- и массообмена и методикой получения передаточных функций по основным каналам управления [2], были рассчитаны коэффициенты усиления и постоянные времени для каждой тарелки колонн БРУ. Коэффициенты усиления и постоянные времена тепло- и массообменного процесса ректификации для трех режимов производительности БРУ приведены в таблице.

Аналитическую модель динамики тепло- и массообменного процесса в колонне можно представить цепочкой аperiodических звеньев с разными коэффициентами. На рис. 1 показана аналитическая модель динамики тепло- и массообменного процесса бражной колонны БРУ.

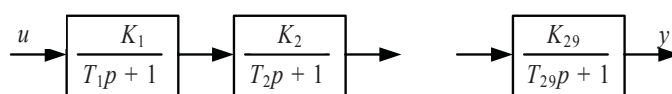


Рис. 1. Аналитическая модель динамики тепло- и массообменного процесса:

K_1 – K_{29} – коэффициенты передачи; T_1 – T_{29} – постоянные времена;

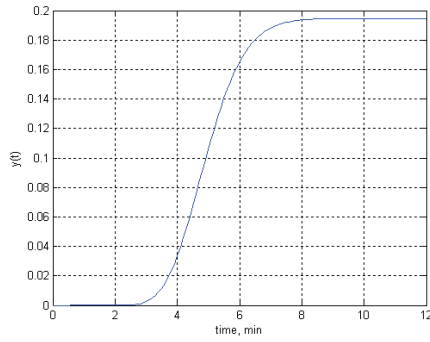
u – входная величина; y – выходная величина

На рис. 2 отражена переходная характеристика, полученная в результате подачи на вход аналитической модели динамики тепло- и массообменного процесса единичного ступенчатого сигнала $u(t) = 1$ (для трех режимов производительности БРУ).

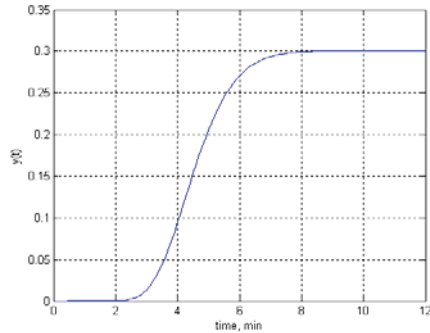
Данные аналитические модели можно редуцировать моделями аperiodического звена второго порядка и звена запаздывания.

Аperiodическое звено второго порядка и звено запаздывания описываются дифференциальным уравнением второго порядка с запаздыванием. Редуцированная модель примет следующий вид:

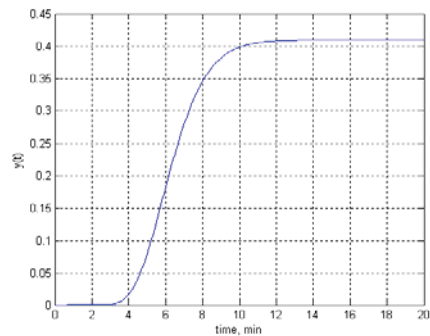
$$T_r' \frac{d^2 y_r(t)}{dt} + T_r'' \frac{dy_r(t)}{dt} + y_r(t) = Ku(t - \tau_r). \quad (1)$$



a



б



в

Рис. 2. Переходная характеристика:
a – максимальный режим;
б – номинальный режим;
в – минимальный режим

Передаточная функция редуцированной модели выглядит следующим образом:

$$W_r(p) = \frac{K}{T_r' p^2 + T_r'' p + 1} e^{-\tau_r p}. \quad (2)$$

Преобразуем уравнение (1) к следующему виду:

$$\frac{d^2 y_r(t)}{dt^2} = \frac{1}{T_r'} \left[K u(t - \tau_r) - T_r'' \frac{dy_r(t)}{dt} - y_r(t) \right]. \quad (3)$$

Из уравнения (3) выразим $y_r(t)$:

$$y_r(t) = \frac{1}{T_r'} \iint \left[K u(t - \tau_r) - T_r'' \frac{dy_r(t)}{dt} - y_r(t) \right] dt. \quad (4)$$

Подадим на вход модели единичное ступенчатое воздействие $u(t) = 1$. Запишем функцию ошибок F в виде

$$F = \sum_{i=1}^{i=N} [y(t_i) - y_r(t_i)]^2, \quad (5)$$

где N – число разбиений по оси t .

Для получения K , T_r' и T_r'' , при которых F является минимальной, применяются необходимые условия минимума:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial K} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial T_r'} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial T_r''} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему уравнений (6), получим значения K , T_r' и T_r'' .

Запишем передаточную функцию редуцированной модели для бражной колонны БРУ (по концентрации этилового спирта) и настроечные коэффициенты α для трех режимов производительности:

1) максимальный режим производительности БРУ:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,19}{0,59 p^2 + 1,31 p + 1} e^{-3,12 p},$$

$$\alpha_1 = 1,13, \alpha_2 = 1,73, \alpha_3 = 3,86,$$

$$\alpha_4 = 1,57, \alpha_5 = 59,64;$$

2) номинальный режим производительности БРУ:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,3}{0,63 p^2 + 1,6 p + 1} e^{-3,12 p},$$

$$\alpha_1 = 1,03, \alpha_2 = 1,67, \alpha_3 = 2,33,$$

$$\alpha_4 = 8,32, \alpha_5 = 60,54;$$

3) минимальный режим производительности БРУ:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,41}{0,79 p^2 + 2,2 p + 1} e^{-3,12 p},$$

$$\alpha_1 = 1,13, \alpha_2 = 1,57, \alpha_3 = 2,81,$$

$$\alpha_4 = 1,32, \alpha_5 = 67,92.$$

Анализ параметров передаточных функций показывает, что значительно отличаются они лишь по величине коэффициента передачи. Если коэффициент передачи модели по номинальному режиму производительности БРУ взять в качестве номинального (K_n), тогда коэффициент передачи модели по максимальному

режиму производительности будет $K_{\max} \approx 0,71K_n$, а для модели по минимальному режиму производительности – $K_{\min} \approx 1,48K_n$.

Для нахождения передаточных функций редуцированной модели по концентрациям уксусного альдегида, сивушного масла, уксусно-этилового эфира, метилового спирта, свободных кислот воспользуемся уравнениями (1)–(6). По всем этим веществам будут отличные коэффициенты массопередачи.

Передаточная функция редуцированной модели для ректификационной колонны БРУ при номинальном режиме производительности выглядит следующим образом:

1) по концентрации уксусного альдегида:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,38}{10,5p^2 + 3,2p + 1} e^{-8,85p};$$

2) по концентрации сивушного масла:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,15}{2,3p^2 + 1,5p + 1} e^{-7,63p};$$

3) по концентрации уксусно-этилового эфира:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,35}{8,1p^2 + 2,7p + 1} e^{-8,97p};$$

4) по концентрации метилового спирта:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,21}{4,2p^2 + 3,9p + 1} e^{-9,15p};$$

5) по концентрации свободных кислот:

$$W_r(p, \alpha) = \frac{0,42}{2,2p^2 + 1,6p + 1} e^{-9,25p}.$$

Анализируя полученные передаточные функции редуцированных моделей по веществам, можно отметить, что они существенно отличаются по коэффициентам передачи. Например, если в качестве номинального коэффициента передачи (K_n) взять коэффициент передачи редуцированной модели по концентрации этилового спирта $K_n \approx K_{э,с}$, то остальные коэффициенты передачи можно записать так: по концентрации уксусного альдегида: $K_{у,а} \approx 1,5K_n$; по концентрации сивушного масла $K_{с,м} \approx 0,6K_n$; по концентрации уксусно-этилового эфира $K_{у,э} \approx 1,4K_n$; по концентрации метилового спирта $K_{м,с} \approx 0,8K_n$; по концентрации свободных кислот $K_{с,к} \approx 1,6K_n$.

Проведенный анализ современного состояния исследований и уровня автоматизации технологического процесса (ТП) ректификации в производстве ректифицированного пищевого этилового спирта (ЭС) показал, что в опубликованных ранее исследованиях отсутствует обобщенный критерий для оценки качества управления БРУ в динамических режимах.

Для оценки качества управления БРУ в динамических режимах и экономии энергоресурсов предлагается использовать обобщенный критерий ($I(q, t)$):

$$I(q, t) = \int_0^t \left[\begin{aligned} &(x_1(t) - x_{1d})d_{11} + (x_2(t) - x_{2d})d_{12} + \\ &+ (x_3(t) - x_{3d})d_{13} + (x_4(t) - x_{4d})d_{14} + \\ &+ (x_5(t) - x_{5d})d_{15} + (x_{6m} - x_6(t))d_{21} + \\ &+ (x_{7n} - x_7(t))^2 d_{31} + (x_{8n} - x_8(t))^2 d_{32} + \\ &+ c_{11}u_{11}^2(t) + c_{22}u_{12}^2(t) + c_{33}u_{13}^2(t) + \\ &+ c_{44}u_{21}^2(t) + c_{55}u_{22}^2(t) + c_{66}u_{23}^2(t) \end{aligned} \right] dt,$$

где t – время; $x_1(t)$ – массовая концентрация альдегидов в пересчете на уксусный в безводном спирте, мг/дм³; x_{1d} – допустимая массовая концентрация альдегидов в пересчете на уксусный в безводном спирте, мг/дм³; $x_2(t)$ – массовая концентрация сивушного масла в пересчете на безводный спирт, мг/дм³; x_{2d} – допустимая массовая концентрация сивушного масла в пересчете на безводный спирт, мг/дм³; $x_3(t)$ – массовая концентрация сложных эфиров в пересчете на уксусно-этиловый эфир в безводном спирте, мг/дм³; x_{3d} – допустимая массовая концентрация сложных эфиров в пересчете на уксусно-этиловый эфир в безводном спирте, мг/дм³; $x_4(t)$ – объемная доля метилового спирта в пересчете на безводный спирт, %; x_{4d} – допустимая объемная доля метилового спирта в пересчете на безводный спирт, %; $x_5(t)$ – массовая концентрация свободных кислот (без CO₂) в пересчете на безводный спирт, мг/дм³; x_{5d} – допустимая массовая концентрация свободных кислот (без CO₂) в пересчете на безводный спирт, мг/дм³; $x_6(t)$ – объемная доля этилового спирта, %; x_{6m} – минимальная объемная доля этилового спирта, %; $x_7(t)$ – массовый расход бражки, кг/ч; x_{7n} – номинальный массовый расход бражки, кг/ч; $x_8(t)$ – температура бражки на входе в БРУ, °С; x_{8n} – номинальная температура бражки на входе в БРУ, °С; $u_{11}(t)$ – массовый расход пара в бражной колонне (БК), кг/ч; $u_{12}(t)$ – массовый расход пара в элюационной колонне (ЭК), кг/ч; $u_{13}(t)$ – массовый расход пара в ректификационной колонне (РК), кг/ч; $u_{21}(t)$ – температура в кубе БК, °С; $u_{22}(t)$ – температура в кубе ЭК, °С; $u_{23}(t)$ – температура в кубе РК, °С; $d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{15}, d_{21}, d_{31}, d_{32}, c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{44}, c_{55}, c_{66}$ – весовые коэффициенты.

Параметры $x_{1d}, x_{2d}, x_{3d}, x_{4d}, x_{5d}, x_{6m}$ определяются из требований стандарта Республики Беларусь СТБ 1334-2003 [1], а $x_{7n}, x_{8n}, u_{11n}, u_{12n}, u_{13n}, u_{21n}, u_{22n}, u_{23n}$ – из требований технологического регламента брагоректификации.

Для нахождения $x_7(t), x_8(t), u_1(t), u_2(t)$ применяются технические средства автоматизации, существующие на конкретном предприятии.

Для определения $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $x_4(t)$, $x_5(t)$, $x_6(t)$ предложен способ определения количественного состава вещества (заявка на патент Республики Беларусь № а20080946 от 17.07.2008).

Изобретение относится к физико-химическим методам анализа и может быть использовано для высокоточного определения содержания каких-либо веществ в многокомпонентных образцах. В частности, оно может быть применено для измерения концентраций водно-спиртовых растворов, виноматериалов, водок и вин в ликероводочной промышленности.

Одним из современных способов количественного анализа является импульсный метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР). В этом способе мерой количества вещества является амплитуда сигнала свободной индукции (ССИ), возбуждаемого коротким радиочастотным импульсом на частоте резонанса ядер исследуемого вещества, помещенного в постоянное магнитное поле. Предложенный метод определения количественного состава вещества может быть использован в тех случаях, когда в состав исследуемого образца, кроме анализируемого вещества, входят другие компоненты, содержащие резонансные ядра, что значительно расширяет диапазон исследуемых образцов. Также по данному способу нет необходимости расчета калибровочных коэффициентов, что повышает оперативность определения концентрации водно-спиртовых растворов.

Метод определения количественного состава вещества, включающий измерение начальных амплитуд сигналов свободной индукции исследуемого образца и эталона с известными физико-химическими свойствами, отличается от известных способов тем, что измеряют температуру исследуемого образца и эталона, определяют настроечные коэффициенты и содержание анализируемого вещества в исследуемом образце по формуле

$$c_1 = a_0 + a_1 T_1 + a_2 \frac{A p_3}{A_3},$$

где c_1 – концентрация анализируемого вещества; a_0 , a_1 , a_2 – настроечные коэффициенты; T_1 – температура исследуемого образца; A и A_3 – амплитуды сигналов свободной индукции от образца и эталона соответственно; p_3 – плотность эталона.

Качество управления БРУ с позиции управления качеством и экономии энергоресурсов тем лучше, чем меньше величина критерия $I(q, t)$.

Приведем составляющие, входящие в критерий ($I(q, t)$), в безразмерные величины, путем деления их на номинальные значения. Примем величину весовых коэффициентов равным:

$$d_{11} = d_{12} = d_{13} = d_{14} = d_{15} = d_{21} = 0,9;$$

$$d_{31} = d_{32} = 0,7;$$

$$c_{11} = c_{12} = c_{33} = c_{44} = c_{55} = c_{66} = 0,5.$$

До использования разработанных адаптивных систем автоматического управления в регулировании БРУ величина обобщенного критерия равна 3,69, а с применением разработанных адаптивных систем – 2,93.

Анализируя полученные значения величин обобщенного критерия качества управления БРУ ($I(q, t)$), можно утверждать, что использование разработанных адаптивных систем автоматического управления в регулировании БРУ позволяет улучшить качество управления на 26%.

Заключение. Предложен способ адаптации метода моделирования многокомпонентной ректификации «от тарелки к тарелке» для расчета разделения спиртовых многокомпонентных смесей.

Данный способ дает возможность редуцировать аналитические динамические модели, моделями апериодического звена второго порядка и звена запаздывания, что позволило определить передаточные функции для расчета показателей качества процесса ректификации.

Анализ полученных передаточных функций для различных веществ, входящих в состав ректифицированного спирта, и различных режимов производительности БРУ показал, что наблюдаются существенно отличающиеся коэффициенты передачи. Это обуславливает применение цепи адаптации коэффициента усиления в системе автоматического управления.

Обобщенный критерий позволяет оценить качество управления всей БРУ с позиции управления качеством продукта и экономии энергоресурсов в производстве ректифицированного спирта.

Установлено, что использование разработанных адаптивных систем автоматического управления по каналу «вход: расход пара – выход: концентрация этанола в полупродуктах (головном продукте)» позволяет улучшить качество регулирования брагоректификационной установкой в динамических режимах на 26%.

Литература

1. Спирт этиловый ректифицированный из пищевого сырья. Технические условия: СТБ 1334-2003. – Введ. 01.01.04. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2004. – 7 с.
2. Ульянов, Н. И. Исследование основных каналов управления процессом брагоректификации и разработка их динамических моделей / Н. И. Ульянов // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2007. – Вып. XV. – С. 118–121.