

В. П. МАЙКОВ

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОТБОРА ПРОДУКТОВ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ

(Представлено академиком Н. М. Эмануэлем 3 XII 1973)

Расчет оптимального отбора продуктов при ректификации обычно производится совместно с технико-экономической оптимизацией всей разделительной системы ⁽¹⁾. В работах ^(2, 3) показано, что оптимальные значения отборов могут определяться независимо от других параметров, что значительно упрощает задачу оптимизации без существенного нарушения ее общности. При этом практикой расчетов было установлено, что в широком диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров оптимальное значение мольной доли отбора дистиллята ε для бинарной ректификации достаточно точно подчиняется простому условию

$$\varepsilon/z=1, \quad (1)$$

где z — содержание легколетучего компонента в питании, м.д.

Настоящее сообщение посвящено теоретической проверке этого условия. Анализ проводится на основе критерия, оценивающего качество разделения смеси ⁽²⁻⁴⁾.

$$\eta=1-\left(\varepsilon \sum_1^m x_i^+ \ln x_i^++(1-\varepsilon) \sum_1^m x_i^- \ln x_i^-\right) / \sum_1^m z_i \ln z_i. \quad (2)$$

Этот критерий получен ⁽²⁾ как отношение минимальной работы разделения m -компонентной смеси состава z_i на потоки с концентрациями x_i^+ (в дистилляте) и x_i^- (в кубовом продукте) к аналогичной работе, необходимой для разделения смеси того же состава на чистые продукты. Критерий может изменяться от нуля (отсутствие разделения) до единицы (полное разделение). Следовательно, согласно введенному критерию, качество разделения считается тем выше, чем больше требуется затратить для его достижения работоспособной энергии при идеальном ведении процесса и представлении смеси как идеальной. Оговорка относительно идеальных свойств смеси необходима, поскольку именно при этих условиях выполняется следующее очевидное требование к критерию: разделительные системы, имеющие одинаковые составы соответствующих входных и выходных потоков, должны иметь одинаковое численное значение критерия качества разделения, независимо от физических свойств смеси.

Чтобы подчеркнуть фундаментальность такой оценки качества разделения, полезно отметить, что этот критерий легко формулируется на основе теоретико-информационных принципов, которые в последние годы все чаще используются в самых различных областях научного знания ⁽⁵⁾. Так, количество информации, содержащееся в опыте по разделению одного моля смеси состава z_i ($i=1, 2, \dots, m$) на ε долей моля состава x_i^+ и $(1-\varepsilon)$ долей состава x_i^- , может быть представлено выражением

$$I=H_1-H_2=\left[-N \sum_1^m z_i \log z_i\right]-\left[-N \varepsilon \sum_1^m x_i^+ \log x_i^+-\right.$$

$$-N(1-\varepsilon) \sum_1^m x_i^- \log x_i^- \Big],$$

где H_1 — начальная неопределенность (энтропия) опыта, H_2 — остаточная неопределенность после разделения, N — число Авогадро. Максимальное количество информации, которое можно получить при разделении $I_{\max}=H_1$ (при $H_2=0$). Тогда к критерию (2) приходим как к отношению

$$\eta=I/I_{\max}=1-H_2/H_1.$$

В некоторых случаях анализ процесса разделения с информационных позиций оказывается более содержательным, чем при традиционных подходах (6).

Под оптимальным отбором дистиллята (кубового продукта) будем понимать отбор, который обеспечивает максимальное качество разделения исходной смеси на заданном числе ступеней разделения. Рассматриваются теоретические ступени разделения, работающие в режиме полного возврата флегмы. В таком режиме (учитывая пренебрежимо малое количество разделяемой смеси) жидкостной и паровой поток остаются также неизменными при варьировании долей отбора одного из продуктов.

Число ступеней разделения в режиме полного возврата флегмы (минимальное число теоретических тарелок) при фиксированных значениях летучестей компонентов для бинарной ректификации однозначно определяется комплексом

$$P=x^+/x^-\cdot(1-x^-)/(1-x^+), \quad (3)$$

где x^+ , x^- — содержание легколетучего компонента в дистилляте и кубовом продукте соответственно, м.д.

Записав критерий качества разделения для бинарной смеси

$$\eta=1-\frac{\varepsilon[x^+\ln x^++(1-x^+)\ln(1-x^+)]+(1-\varepsilon)[x^-\ln x^-+(1-x^-)\ln(1-x^-)]}{z\ln z+(1-z)\ln(1-z)}, \quad (4)$$

сформулируем задачу определения оптимального отбора продуктов следующим образом: для заданного содержания легколетучего компонента в питании z и заданного параметра P требуется найти такие значения переменных x^+ , x^- , ε , которые бы давали бы максимальное значение критерию качества разделения (4) и одновременно удовлетворяли связи иско-
мых переменных по материальному балансу

$$z=x^+\varepsilon+(1-\varepsilon)x^-. \quad (5)$$

Для решения задачи используем метод множителей Лагранжа. Функция Лагранжа для рассматриваемой задачи имеет вид

$$F=\eta(x^+, x^-, \varepsilon)+\lambda \frac{x^+}{x^-} \frac{1-x^-}{1-x^+}+\mu[\varepsilon x^++(1-\varepsilon)x^-].$$

Необходимым условием максимума критерия η является следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x^+} &= \frac{\partial \eta(x^+, x^-, \varepsilon)}{\partial x^+} + \lambda \frac{\partial}{\partial x^+} \left(\frac{x^+}{x^-} \frac{1-x^-}{1-x^+} \right) + \mu \varepsilon = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial x^-} &= \frac{\partial \eta(x^+, x^-, \varepsilon)}{\partial x^-} + \lambda \frac{\partial}{\partial x^-} \left(\frac{x^+}{x^-} \frac{1-x^-}{1-x^+} \right) + \mu(1-\varepsilon) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} &= \frac{\partial \eta(x^+, x^-, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} + \mu(x^+-x^-) = 0. \end{aligned}$$

В этих уравнениях для сокращения записи учтены значения производных при множителе μ .

Решение этой системы уравнений после взятия соответствующих производных и использования материального баланса (5) приводит к выражению

$$\frac{x^+ x^-}{z} \log \frac{x^+}{x^-} = \frac{(1-x^-)(1-x^+)}{1-z} \log \frac{1-x^-}{1-x^+}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения трех параметров x^+ , x^- , ε при заданных P , z имеем три уравнения (3), (5), (6). Достаточность этих уравнений проверялась численными методами на ЭВМ.

Однако в практике расчетов в качестве заданного параметра выступает чаще всего не величина P , использованная в решении задачи, а одна из

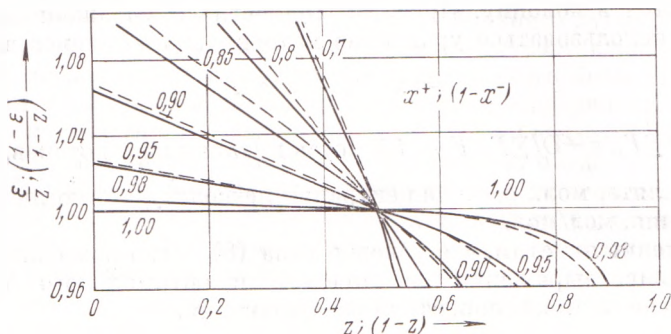


Рис. 1. Зависимость оптимального приведенного отбора дистиллята ε/z (кубового продукта $(1-\varepsilon)/(1-z)$) от концентрации легколетучего компонента в питании z (труднолетучего $1-z$) для различных концентраций легколетучего компонента в дистилляте x^+ (труднолетучего в кубовом продукте $1-x^-$) по уравнению (8). Пунктирные линии — то же по уравнению (6)

концентраций продуктов, например x^+ или x^- . В этом случае другая концентрация может быть найдена из полученного выражения (6), а затем из материального баланса (5) определяется оптимальная доля отбора дистиллята.

Введем параметр $\varphi = \varepsilon/z$, который можно рассматривать как приведенный отбор дистиллята.

Записав

$$x^- = \frac{z - \varepsilon x^+}{1 - \varepsilon} = z \frac{1 - \varphi x^+}{1 - \varphi z}$$

и подставив это выражение в уравнение (6), получим

$$\frac{1-x^+}{(1-z)x^+} \left(\frac{1-\varphi z}{1-\varphi x^+} - z \right) \log \frac{1}{1-x^+} \left(1-z \frac{1-\varphi x^+}{1-\varphi z} \right) = \log \frac{x^+(1-\varphi z)}{z(1-\varphi x^+)}. \quad (7)$$

Как следует из этого уравнения, при равных концентрациях компонентов в питании ($z=0,5$) для всего теоретически возможного диапазона разделения $z < x^+ \leq 1$ оптимальное значение приведенного отбора дистиллята $\varepsilon/z=1$. В этом легко убедиться, подставив значения $z=0,5$, $\varphi=1$ непосредственно в уравнение (7), которое при этом обращается в тождество.

Хотя результаты определения ε по уравнению (6) удовлетворительно согласуются с непосредственными расчетами оптимальных ректификационных колонн в окрестности режимов $\varphi \approx 1$ (2), тем не менее использование режима полного возврата флегмы при выводе уравнения (6) может указывать на частный характер этого выражения. В связи с этим покажем

возможность получения аналогичной зависимости на основе более общих соображений. Так, усматривая определенную симметрию в задаче разделения потока на два продукта, можно допустить, что в оптимальном режиме остаточная неупорядоченность каждого из двух продуктов (измеренная величиной H) будет одинаковой

$$\begin{aligned} &\varepsilon [x^+ \log x^+ + (1-x^+) \log (1-x^+)] = \\ &= (1-\varepsilon) [x^- \log x^- + (1-x^-) \log (1-x^-)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Интересно отметить, что использование уравнения (8) для определения ε приводит практически к тем же результатам, что и уравнение (6). Небольшое расхождение наблюдается лишь в области среднего уровня разделения (см. рис. 1).

Полученные зависимости легко обобщаются на случай нескольких вводов питания в колонну. При этом совместно с выражениями (8) или (6) должно использоваться уравнение материального баланса вида

$$\bar{z} = \varepsilon x^+ + (1-\varepsilon) x^-,$$

где $\bar{z} = \sum_1^q F_i z_i / \sum_1^q F_i$, $\varepsilon = D / \sum_1^q F_i$, F_i — i -й поток питания из q потоков, мол.; D — отбор дистиллята, мол.; z_i — концентрация легколетучего компонента в i -м потоке питания, мол/мол.

В заключение отметим, что условие типа (8) легко позволяет получить соответствующие выражения для определения оптимального отбора продуктов в случае многокомпонентной ректификации.

Московский институт
химического машиностроения

Поступило
3 XII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. М. Платонов, Б. Г. Берго, Разделение многокомпонентных смесей, М., 1965.
- ² А. В. Гальцов, В. П. Майков, Теоретич. основы хим. технол., т. 5, № 2, 303 (1971).
- ³ А. В. Гальцов, В. П. Майков, Теоретич. основы хим. технол., т. 7, № 2, 170 (1973).
- ⁴ В. П. Майков, Г. Г. Вилков, А. В. Гальцов, Химия и технол. топлив и масел, № 6, 19 (1971).
- ⁵ А. Д. Урсул, Информация, «Наука», 1971.
- ⁶ В. П. Майков, В сборн. III Всесоюзная конференция по ректификации, т. 1, Северодонецк, 1973, стр. 120.