

Д. Г. Калишук, доцент; Н. П. Саевич, ст. преподаватель; Е. Н. Слабко, студент

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ХОРВАТА И ШУБЕРТА ПРИ РАСЧЕТАХ КОЛОНН ЧЕТКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ АЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ

The analysis of methods of graphic determination of number of the theoretical stages is conducted in the columns of clear distillation. It is shown that Horvath and Schubert's method is inapplicable without revision for the calculations of columns of clear distillation of azeotropes. Here the receptions at the use of which the indicated method can be applied for determination of number of theoretical stages in the columns of clear distillation of azeotropes are described. The examples of calculations are executed on the improved method.

**Введение.** Решения, принятые на стадии технического проектирования, в основном определяют технико-экономические показатели аппаратов и установок. В идеальном случае проектные решения должны обеспечивать минимальные приведенные затраты и себестоимость продукции при оптимальных удельных капитальных вложениях и текущих затратах.

В химических и смежных производствах для разделения жидких гомогенных смесей широко применяют ректификационные колонны. При использовании недостаточно достоверных методик технологических расчетов, ошибках проектировщиков данные аппараты могут вводиться в эксплуатацию как с заниженным, так и с завышенным числом ступеней взаимодействия фаз. Для достижения заданного качества разделения в первом случае колонны должны работать при сниженной производительности и увеличенных флегмовых числах. Во втором случае при заданной производительности обоснованное требуемым качеством разделения снижение флегмовых чисел может быть недопустимо из-за нарушения нормальной гидродинамической обстановки в колонне [1]. Работа при завышенных флегмовых числах влечет за собой увеличение удельного энергопотребления. Поэтому усовершенствование методик определения числа ступеней взаимодействия фаз в ректификационных колоннах является актуальной задачей.

**Основная часть.** В современной практике технологических расчетов ректификационных колонн при определении их высоты одним из наиболее востребованных является метод, разработанный Мак-Кебом и Тиле [1]. Сущность его заключается в графическом определении числа теоретических ступеней взаимодействия фаз (ТСВФ). На  $x$ - $y$ -диаграмме строят рабочие линии и линию равновесия и в пределах изменения составов фаз от состава дистиллята до состава кубового остатка вписывают взаимосвязанные прямоугольные ступеньки. Число полученных ступенек соответствует числу ТСВФ.

В изложении последующего материала статьи используем обозначения, общепринятые при описании ректификации, а именно:

$x$  и  $y$  – молярные доли низкокипящего компонента (НК) в жидкой и паровой фазах соответственно, кмоль/кмоль;

$x_W$ ,  $x_F$  и  $x_D$  – молярные доли НК в кубовом остатке, исходной смеси и дистилляте, кмоль/кмоль;

$R$  – рабочее флегмовое число.

При расчетах колонн четкой ректификации (в них получают кубовый остаток с  $x_W \rightarrow 0$  либо дистиллят с  $x_D \rightarrow 1$ , кмоль/кмоль) достаточно точное определение числа ТСВФ при использовании метода Мак-Кеба и Тиле затруднено. На  $x$ - $y$ -диаграммах небольшого формата невозможно выполнить построения и подсчитать ступеньки в областях, прилегающих к значениям  $x = 0$  и  $x = 1$ , кмоль/кмоль.

Э. Крелем [2] и другими авторами в таких случаях рекомендуется выполнять крупномасштабные  $x$ - $y$ -диаграммы с длиной осей координат 2–3 м. Однако они трудоемки и неудобны в использовании.

Можно также найти решение задачи по определению ТСВФ в колоннах четкой ректификации путем фрагментирования  $x$ - $y$ -диаграммы. В крупном масштабе при этом выполняют проблемный, нечитательный фрагмент построенной ранее мелкомасштабной диаграммы. При необходимости (нечитательности) участок выделенного фрагмента также может быть последовательно увеличен. Однако фрагментирование с последовательным увеличением масштаба осложняет восприятие информации и ее обработку. Кроме того, оно может вызвать дополнительные неточности из-за погрешностей построения.

Хорватом и Шубертом [3] для расчета числа ТСВФ в колоннах четкой ректификации был предложен следующий метод. Для каждой из частей колонны – исчерпывающей и укрепляющей – строят отдельно  $x$ - $y$ -диаграммы с рабочей и равновесной линиями. Для построения диаграммы исчерпывающей части колонны используется система координат  $\lg x - \lg y$ , для укрепляющей –  $\lg(1-x) - \lg(1-y)$ . Для восприятия информации при традиционном положении рабочей и равновесной линий диаграмму укрепляющей части колонны поворачивают на  $180^\circ$ . Число ТСВФ, также как и при использовании метода Мак-Кеба и Тиле, определяют по

количеству прямоугольных ступенек, вписанных между рабочими линиями и линией равновесия. В результате проведенного нами анализа доказано, что метод Хорвата и Шуберта также применим для расчетов колонн четкой ректификации в случаях, когда равновесие разделяемой смеси не подчиняется закону Рауля и в логарифмических координатах линия равновесия не является прямой.

Для расчетов высоты колонн четкой ректификации азеотропных смесей метод Хорвата и Шуберта неприменим без доработки:

1) при разделении смесей с нижней точкой азеотропа и получении дистиллята состава  $x_D \rightarrow x_a$  (см. пример  $x$ - $y$ -диаграммы для смеси такого рода – «бензол – циклогексан» – на рис. 1), где  $x_a$  – молярная доля НК в азеотропной смеси, кмоль/кмоль;

2) при разделении смесей с верхней точкой азеотропа и получении кубового остатка состава  $x_W \rightarrow x_a$  (см. пример  $x$ - $y$ -диаграммы для смеси «вода – муравьиная кислота» на рис. 2).

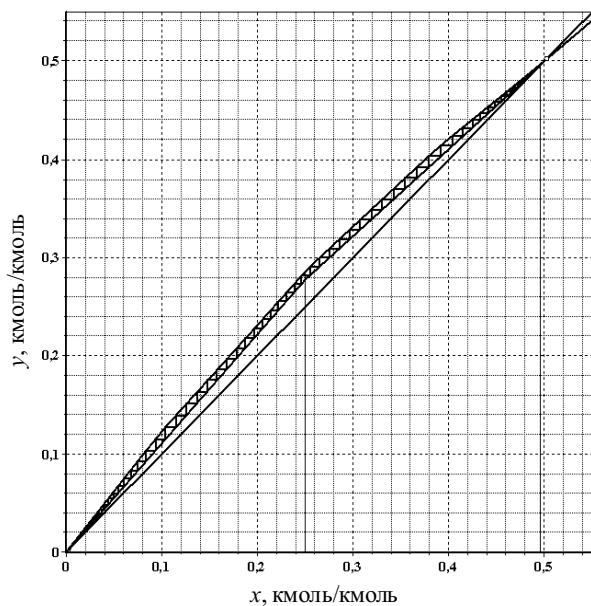


Рис. 1. Определение числа ТСВФ по методу Мак-Кеба и Тиле для колонны разделения смеси «бензол – циклогексан» ( $x_a = 0,502$  кмоль/кмоль) при  $x_W = 0,005$ ,  $x_F = 0,250$  и  $x_D = 0,495$  кмоль/кмоль

В указанных случаях нами предлагается использовать в расчетах величины фиктивных долей НК. При выполнении задачи, упомянутой выше в п. 1, фиктивные доли НК в жидкой и паровой фазах  $x'$  и  $y'$  соответственно вычисляются следующим образом:

$$x' = \frac{x}{x_a}; \quad (1)$$

$$y' = \frac{y}{x_a}. \quad (2)$$

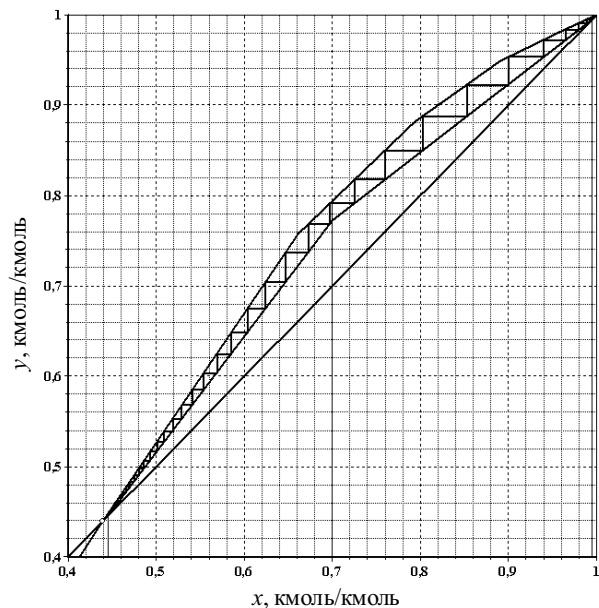


Рис. 2. Определение числа ТСВФ по методу Мак-Кеба и Тиле для колонны разделения смеси «вода – муравьиная кислота» ( $x_a = 0,4395$  кмоль/кмоль) при  $x_W = 0,445$ ,  $x_F = 0,700$  и  $x_D = 0,995$  кмоль/кмоль

Если выполняется задача, упомянутая в п. 2, то  $x'$  и  $y'$  рассчитывают по формулам

$$x' = \frac{x - x_a}{1 - x_a}; \quad (3)$$

$$y' = \frac{y - x_a}{1 - x_a}. \quad (4)$$

Порядок выполнения действий при определении числа ТСВФ по нашему методу следующий. Для разделяемой системы определяют условия равновесия в виде зависимости  $y^* = f(x)$ , где  $y^*$  – молярная доля НК в паровой фазе в условиях равновесия, кмоль/кмоль. Далее при заданных значениях  $x_W$ ,  $x_F$  и  $x_D$  по известным методикам [1–2] рассчитывают  $R$  и получают уравнения рабочих линий исчерпывающей и укрепляющей частей колонны.

Построив в системе координат  $x$  –  $y$  равновесную и рабочие линии, выявляют участок, для которого определение числа ТСВФ проблематично и в пределах него для ряда значений состава жидкости и пара производят пересчет по формулам (1) и (2) или (3) и (4). В результате получают координаты точек для построения равновесной и рабочей линии укрепляющей (исчерпывающей) части колонны в модифицированном виде.

Уравнение укрепляющей части колонны при выполнении задачи по п. 1 приобретает вид

$$y' = \frac{R}{R+1}x' + \frac{x'_D}{R+1}, \quad (5)$$

где  $x'_D$  – фиктивная доля НК в дистилляте.

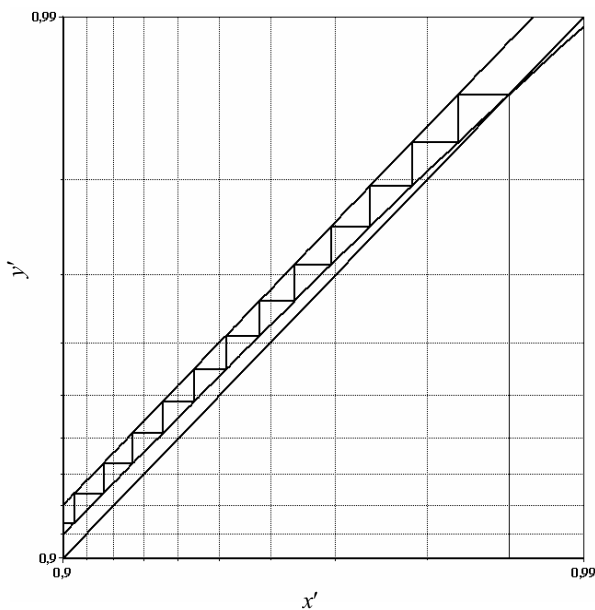


Рис. 3. Определение числа ТСВФ по разработанному авторами методу для укрепляющей части колонны (смесь и условия разделения по рис. 1)

При выполнении задачи по п. 2 уравнение исчерпывающей части колонны представляется:

$$y' = \frac{R+f}{R+1}x' + \frac{1-f}{R+1}x'_W, \quad (6)$$

где  $f$  – относительный молярный расход исходной смеси;  $x'_W$  – фиктивная доля НК в кубовом остатке.

Используя данные для построения модифицированной линии равновесия и расчетные точки, полученные с помощью уравнения (5) или (6), строят графические зависимости в системе координат  $\lg(1-x') - \lg(1-y')$  или  $\lg x' - \lg y'$ . В дальнейшем число ТСВФ определяется таким же образом, как описано в работе [3], т. е. на требуемом участке диаграммы между линиями вписываются прямоугольные ступеньки.

Примеры графического определения числа ТСВФ по доработанному нами методу Хорвата и Шуберта представлены на рис. 3 и 4. Сопоставление их результатов с результатами расчетов по методу Мак-Кеба и Тиле показало незначительное, не более 3%, отклонение. Однако при использовании метода Мак-Кеба и Тиле диаграммы пришлось многократно фрагментировать и увеличивать в масштабе.

В процессе исследований авторами разработана компьютерная программа, позволяющая в автоматическом режиме производить необходимые расчеты и графические построения с использованием различных методов.

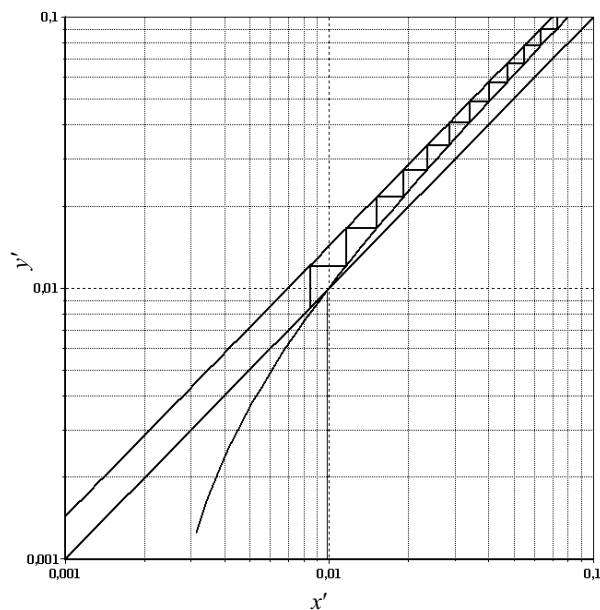


Рис. 4. Определение числа ТСВФ по разработанному авторами методу для исчерпывающей части колонны (смесь и условия разделения по рис. 2)

**Заключение.** Авторами установлено:

- применение метода Хорвата и Шуберта невозможно без доработки при расчетах колонн четкой ректификации азеотропных смесей;

- при определении числа ТСВФ в колоннах четкой ректификации азеотропных смесей, если  $x_D \rightarrow x_a$  (смеси с нижней точкой азеотропа) и  $x_W \rightarrow x_a$  (смеси с верхней точкой азеотропа) следует производить построения по методу Хорвата и Шуберта с использованием значений фиктивных долей НК в фазах и продуктах разделения;

- предложенная авторами доработка метода Хорвата и Шуберта применительно к четкой ректификации азеотропных смесей не снижает точность расчетов и уменьшает по сравнению с методом Мак-Кеба и Тиле трудоемкость графических построений.

### Литература

1. Александров, И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования / И. А. Александров. – М.; Л.: Химия, 1965. – 308 с.
2. Крель, Э. Руководство по лабораторной перегонке: пер. с нем. / Э. Крель; под ред. В. М. Олевского. – М.: Химия, 1980. – 520 с.
3. Horvath, J. P. Distillation Stages Graphically / J. P. Horvath, R. F. Schubert / Chem. Eng. – 1958. – № 10. – P. 129–132.