ЛЕКЦИЯ №8

Численный метод расчёта массообменных аппаратов со ступенчатым контактом фаз

РАСЧЕТ «ОТ СТУПЕНИ К СТУПЕНИ»

В связи с развитием вычисли тельной техники получили широкое распространение численные методы расчёта массообменных аппаратов со ступенчатым контактом фаз.

Отличительной особенностью тарельчатых аппаратов по сравнению с аппаратами с непрерывным контактом фаз является дискретность контакта взаимодействующих фаз, т.е. процесс массопередачи имеет место только на тарелке, а между тарелками фазы считают не взаимодействующими. В этом случае рабочая линия не является сплошной, а представляется точками, в каждой из которых средние концентрации распределяемого компонента в фазах взяты для отдельных сечений колонны.

Расчет числа ступеней ведется снизу вверх от тарелки к тарелке с использованием уравнений рабочих линий и равновесных зависимостей. Отметим, что указанные зависимости справедливы в отсутствие взаимного уноса фаз.

При известной средней эффективности η (среднего коэффициента полезного действия ступени), число реальных ступеней (действительных тарелок) находят из выражения:

$$N_{\text{РТ}} = \frac{N_{\text{ТТ}}}{\eta}, \tag{8-1}$$

где $N_{\text{ТТ}}$ – число теоретических тарелок (число ступеней между рабочей и равновесной линиями).

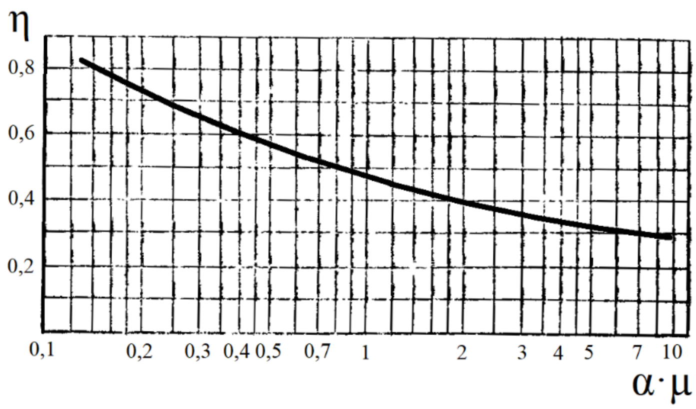

Рис. 8-1. Диаграмма для приближённого определения среднего КПД тарелок

Основная трудность метода – поиск среднего КПД η, значение которого, как правило, берется для известных конструкций тарелок и близких по свойствам смесей. Его значение вычисляется по известным эмпирическим корреляциям, которые можно найти в специальной литературе. Например, на рис. 8-1 представлена зависимость среднего КПД от произведения относительной летучести бинарной системы на вязкость жидкости.

Расчет числа реальных ступеней можно построить на основе системы уравнений материального баланса *n*-ной тарелки:

$$\dot{n}_{G\,n-1}\cdot y_{n-1}+\dot{n}_{L\,n+1}\cdot x_{n+1}-\dot{n}_{G\,n}\cdot y_n-\dot{n}_{L\,n}\cdot x_n=0, \tag{8-2}$$

$$\dot{n}_{G\,n-1}\cdot\left(1-y_{n-1}\right)-\dot{n}_{G\,n}\cdot\left(1-y_n\right)=0, \tag{8-3}$$

$$\dot{n}_{L\,n+1}\cdot\left(1-x_{n+1}\right)-\dot{n}_{L\,n}\cdot x_n=0, \tag{8-4}$$

$$\dot{n}_{G\,n-1}+\dot{n}_{L\,n+1}-\dot{n}_{G\,n}-\dot{n}_{L\,n}=0. \tag{8-5}$$

Считая мольные расходы фаз постоянными, представим уравнение (8-2) в виде:

$$x_n-x_{n+1}=\frac{\dot{n}_G}{\dot{n}_L}\left(y_{n-1}-y_n\right). \tag{8-6}$$

Представим уравнение (7-1) для КПД Мерфри для n-ной и (n+1)-ой тарелки в форме:

$$y_{n-1}-y_n=E_y\left(y_{n-1}-y*_{x_n}\right), \tag{8-7}$$

$$y_n-y_{n+1}=E_y\left(y_n-y*_{x_{n+1}}\right). \tag{8-8}$$

Примем линейной равновесную зависимость $y*=m\cdot x+m_0$, тогда уравнения (8-7) и (8-8) можно представить в виде:

$$y_{n-1}-y_n=E_y\left(y_{n-1}-m\cdot x_n+m_0\right), \tag{8-9}$$

$$y_n-y_{n+1}=E_y\left(y_n-m\cdot x_{n+1}+m_0\right). \tag{8-10}$$

Вычитая из уравнения (8-9) уравнение (8-10), получаем:

$$y_{n-1}-y_n-\left(y_n-y_{n+1}\right)=E_y\left(y_{n-1}-m\cdot x_n+m_0\right)-E_y\left(y_n-m\cdot x_{n+1}+m_0\right),$$

$$y_{n-1}-y_{n+1}=E_y\left[y_{n-1}-y_n-m\cdot\left(x_n-x_{n+1}\right)\right]. \tag{8-11}$$

Подставляя в выражение (8-11) уравнение (8-6), получаем:

$$y_{n-1}-y_{n+1}=E_y\left\{y_{n-1}-y_n-m\cdot\left[\frac{\dot{n}_G}{\dot{n}_L}\left(y_{n-1}-y_n\right)\right]\right\},$$

$$y_{n-1}-y_{n+1}=E_y\cdot\left(y_{n-1}-y_n\right)\cdot\left(1-m\cdot\frac{\dot{n}_G}{\dot{n}_L}\right),$$

$$y_{n-1}-y_{n+1}=E_y\cdot\left(y_{n-1}-y_n\right)\cdot\left(1-\frac{1}{F_{\text{м}}}\right),$$

$$y_{n-1}-y_{n+1}=\left(y_{n-1}-y_n\right)\cdot\left(1-E_y+\frac{E_y}{F_{\text{м}}}\right) \tag{8-12}$$

где $F_м = \dfrac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G \cdot m}$ – фактор массопередачи.

Обозначая $\lambda = 1 - E_y + \dfrac{E_y}{F_м}$, с учетом (8-9) и (8-10), получим:

$$\lambda \cdot \left(y_{n-1} - m \cdot x_n + m_0 \right) = y_n - m \cdot x_{n+1} + m_0 , \tag{8-13}$$

т.е. имеем систему уравнений:

$$\begin{array}{ll} n = 1 & \lambda \cdot \left(y_0 - m \cdot x_1 + m_0 \right) = y_1 - m \cdot x_2 + m_0 \\ n = 2 & \lambda \cdot \left(y_1 - m \cdot x_2 + m_0 \right) = y_2 - m \cdot x_3 + m_0 \\ n = 3 & \lambda \cdot \left(y_2 - m \cdot x_3 + m_0 \right) = y_3 - m \cdot x_4 + m_0 \\ \ldots & \\ n = N & \lambda \cdot \left(y_{N-1} - m \cdot x_N + m_0 \right) = y_N - m \cdot x_{N+1} + m_0 \end{array}$$

откуда получим:

$$\lambda^N \cdot \left(y_0 - m \cdot x_1 + m_0 \right) = y_N - m \cdot x_{N+1} + m_0 . \tag{8-14}$$

Из уравнения (8-14) получаем число ступеней:

$$N = \frac{\ln \dfrac{y_N - m \cdot x_{N+1} + m_0}{y_0 - m \cdot x_1 + m_0}}{\ln \lambda} . \tag{8-15}$$

Но $y_0 = y_н$, $x_1 = x_к$, $y_N = y_к$, $x_{N+1} = x_н$, тогда, число реальных тарелок будет:

$$N_{РТ} = \frac{\ln \dfrac{y_к - m \cdot x_н + m_0}{y_н - m \cdot x_к + m_0}}{\ln \left(1 - E_y + \dfrac{E_y}{F_м} \right)} . \tag{8-16}$$

Отметим, что для теоретической тарелки $E_y = 1$, тогда число теоретических тарелок:

$$N_{ТТ} = \frac{\ln \dfrac{y_к - m \cdot x_н + m_0}{y_н - m \cdot x_к + m_0}}{\ln \left(\dfrac{1}{F_м} \right)} . \tag{8-17}$$

Тогда средний КПД будет равен:

$$\eta = \frac{N_{ТТ}}{N_{РТ}} = \frac{\ln \left(1 - E_y + \dfrac{E_y}{F_м} \right)}{\ln \left(\dfrac{1}{F_м} \right)} . \tag{8-18}$$

Расчет числа реальных ступеней с учетом эффективности каждой ступени по Мэрфри, как и расчет теоретических ступеней, основывается на последовательном определении составов фаз, уходящих со всех ступеней. Рекомендуется начинать расчет с того конца аппарата, куда входит фаза, по которой выражается эффективность ступени (E_{My} или E_{Mx}). Основное отличие алгоритма расчета числа реальных ступеней от приведенного ранее алгоритма расчета числа теоретических ступеней состоит в том, что для каждой ступени требуется определение ее эффективности. Для этого необходимо иметь данные, позволяющие находить общее число единиц переноса, а в случае применения сложных моделей структуры потоков – также и данные для определения параметров этих моделей.

Общие числа единиц переноса обычно определяют из эмпирических уравнений, составленных для частных (фазовых) чисел единиц переноса, которые связаны уравнениями аддитивности (6-22) и (6-23).

Если расчет начинается с низа колонны, со ступени, на которую поступает исходный (очищаемый) газ, как показано на рис. 8-2, значение обычно принимают равным тангенсу угла наклона линии равновесия в точке, соответствующей составу жидкости, покидающей эту ступень. За расход жидкости (абсорбента) принимают его значение на выходе из рассматриваемой ступени, а в качестве расхода газа – его величину на входе в эту ступень. В случае, если расходы фаз существенно изменяются, принимают их средние для каждой ступени значения, которые можно определить, повторяя расчет несколько раз.

Графической иллюстрацией данного способа расчета является так называемый метод кинетической (псевдоравновесной) линии (рис. 8-3).

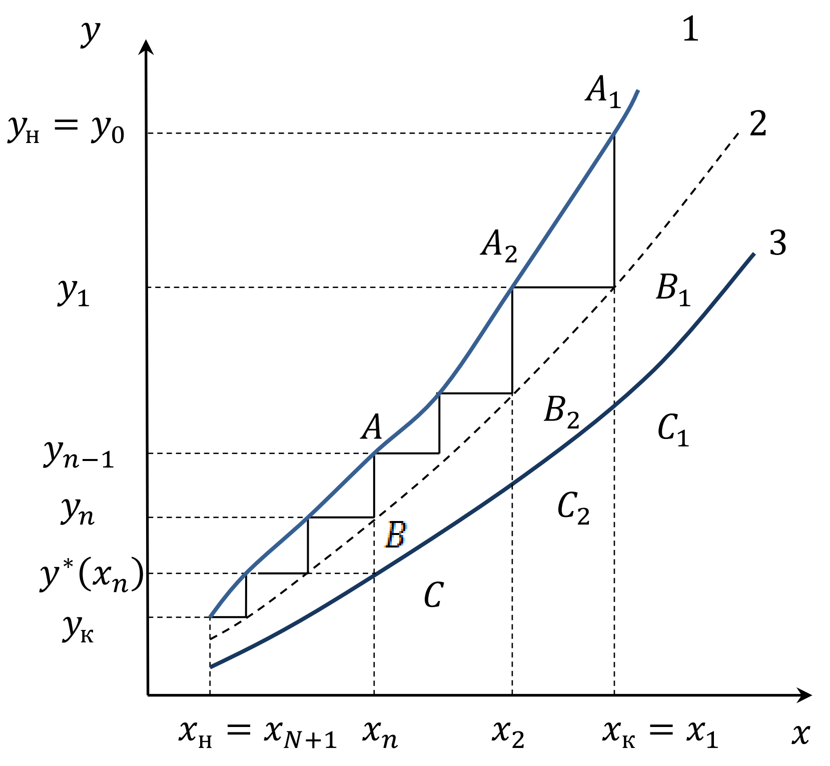

Рис. 8-3. К определению числа реальных ступеней разделения по методу кинетической (псевдоравновесной) линии: 1 – рабочая линия, 2 – кинетическая, 3 – равновесная

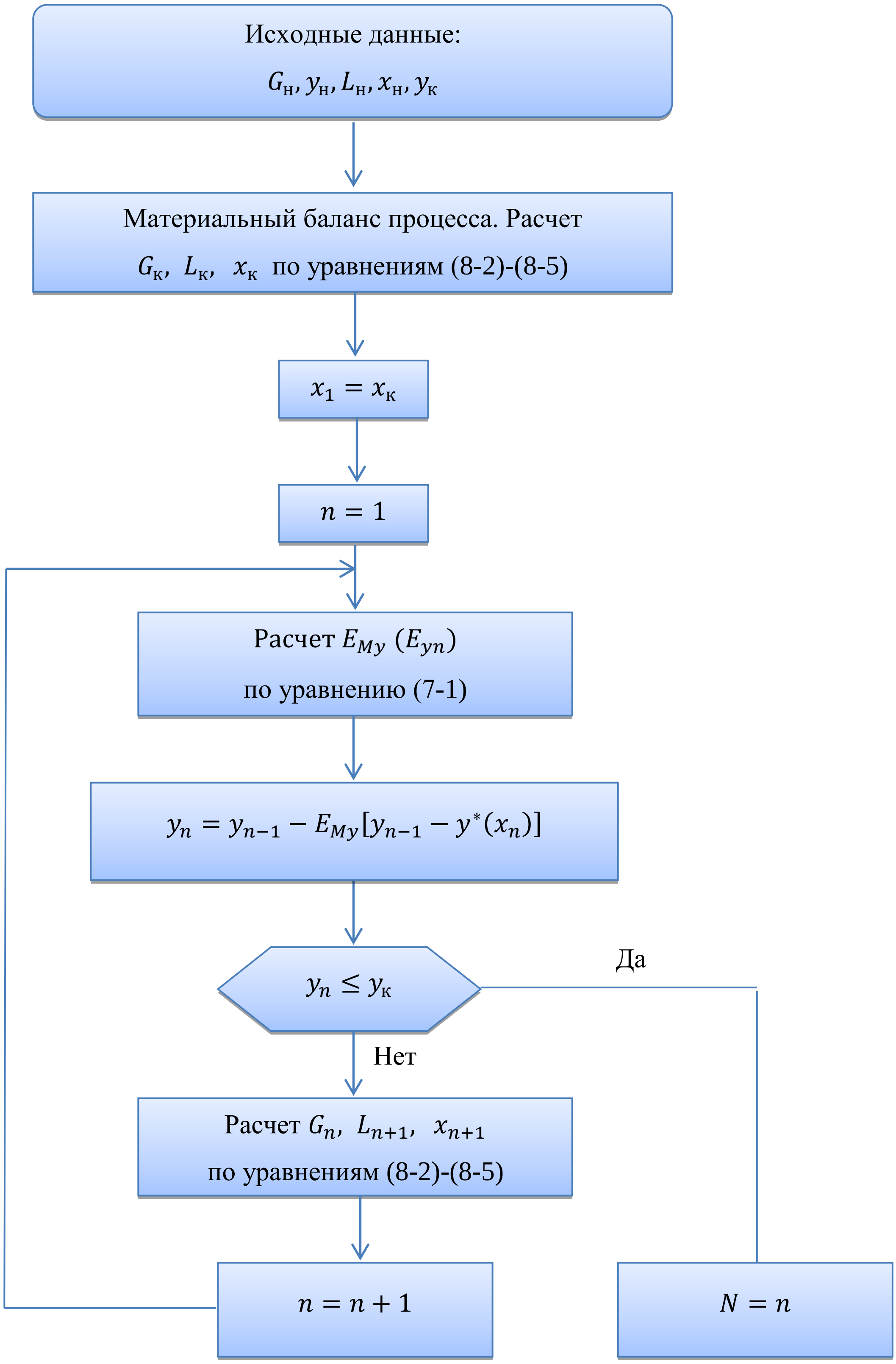

Рис. 8-2. Алгоритм расчета числа реальных ступеней (на примере абсорбции в изотермических условиях)

В координатах x-y (или X-Y) строятся равновесная $y^*(x)$ и рабочая $y(x)$ линии. Для нескольких точек (в достаточном количестве, чтобы построить плавную линию), начиная от точки A_1, определяются эффективности по Мэрфри. Для n-ной ступени имеем:

$$E_{My} = \frac{y_n - y_{n-1}}{y^*_{x_n} - y_{n-1}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}}. \qquad (8\text{-}19)$$

Отрезки $\overline{AC}$ после построения равновесной и рабочей линий определяются в произвольных сечениях в интервале $x_н$–$x_к$. Если для этих сечений определить эффективности по Мэрфри, то отрезок $\overline{AB}$ определится как:

$$\overline{AB} = E_{My} \cdot \overline{AC}. \qquad (8\text{-}20)$$

Таким образом, находя $\overline{AB}_1 = E_{My} \cdot \overline{AC}_1$, $\overline{AB}_2 = E_{My} \cdot \overline{AC}_2$, … , $\overline{AB} = E_{My} \cdot \overline{AC}$, определяют точки B_1, B_2, … , B, соединяя которые, проводят кинетическую кривую. Число реальных ступеней разделения определяют как число ступеней, вписанных между рабочей (1) и кинетической (2) линиями (считают число точек на кинетической кривой; в данном случае 6 ступеней).