

Лекция 7 «Массообменные процессы. Фазовое равновесие. Материальный баланс массообменных процессов. Основное уравнение массопередачи. Средняя движущая сила процесса массопередачи»

Цель: Дайте определение массообменным процессам. Охарактеризуйте фазовое равновесие. Опишите материальный баланс массообменных процессов. Приведите основное уравнение массопередачи. Охарактеризуйте среднюю движущую силу процесса массопередачи.

Краткий конспект лекции: Технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью переноса вещества (массы) из одной фазы в другую, называются массообменными процессами. К таким процессам относятся: 1) абсорбция, 2) адсорбция, 3) перегонка, 4) экстракция, 5) сушка, 6) кристаллизация. Скорость протекания этих процессов определяется скоростью диффузии.

Процессы, при которых переход вещества из одной фазы в другую происходит путём диффузии, называются процессами массопередачи. В процессах массопередачи участвуют две фазы, в которых распределяется третье вещество. Фазы являются носителями распределяемого вещества и непосредственно в процессе массопередачи не участвуют.

Фазовое равновесие

Переход вещества из одной фазы в другую происходит при отсутствии равновесия между фазами. Предельным состоянием процесса массообмена является достижение равновесия системы, т.е. равенство скоростей перехода вещества из одной фазы в другую и обратно при данной температуре и давлении.

В состоянии равновесия любой концентрации распределяемого вещества в одной фазе соответствует равновесная ей концентрация этого вещества в другой фазе:

$$y^* = f(x) \quad (1)$$

или

$$x^* = f(y) \quad (2)$$

где x – содержание распределяемого вещества в одной фазе, y^* – равновесная ей концентрация этого вещества в другой фазе и наоборот (уравнение 2).

Условия равновесия позволяют определить направление процесса. Если рабочая концентрация распределяемого вещества в данной фазе выше равновесной, то она будет уходить из этой фазы в другую.

Равновесие между фазами можно представить графически диаграммой $y - x$ (рис. 1) [2,3].

Материальный баланс массообменных процессов

Диффузионные (массообменные) процессы, как правило, осуществляются в противоточных аппаратах, где участвующие в массообмене фазы протекают навстречу друг другу. Поэтому для вывода уравнения материального баланса массообменных процессов рассматривается движение потоков в противоточном аппарате (рис. 2).

Обозначим весовые скорости фаз жидкой L и газовой G вдоль поверхности их раздела в килограммах в час. Содержание в них распределяемого компонента обозначим в килограммах на килограмм фазы: в фазе L – через x и в фазе G – через y .

Допустим, что рабочая концентрация распределяемого компонента выше его равновесной концентрации $y > y_p$, и поэтому компонент будет переходить из фазы G в фазу L .

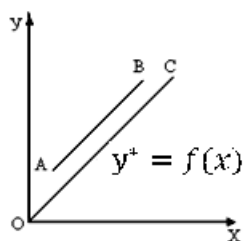


Рис. 1. Диаграмма y - x :
 АВ – рабочая линия
 ОС – линия равновесия;

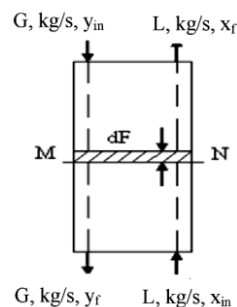


Рис. 2. К выводу уравнения
 линии рабочих концентрации

Фазы являются носителями распределяемого вещества и в процессе массообмена не участвуют. Для бесконечно малого элемента поверхности dF фазового контакта материальный баланс в отношении распределяемого между фазами компонента выразится дифференциальным уравнением

$$dM = -Gdy = Ldx \quad (3)$$

Интегрируя уравнение в заданных пределах концентраций распределяемого вещества от y_n до y_k и от x_n до x_k :

$$M = -G \int_{y_n}^{y_k} dy = L \int_{x_n}^{x_k} dx \quad (4)$$

или

$$M = G(y_n - y_k) = L(x_k - x_n) \quad (5)$$

получим уравнение материального баланса массообмена для всей поверхности фазового контакта в рассматриваемом аппарате.

Из уравнения (5) находятся соотношения между весовыми потоками фаз

$$L = G \frac{y_n - y_k}{x_k - x_n} \quad (6)$$

или

$$G = L \frac{x_k - x_n}{y_n - y_k} \quad (7)$$

и удельный расход растворителя

$$l = \frac{L}{G} = \frac{y_n - y_k}{x_k - x_n} \quad (8)$$

Для любого произвольно взятого сечения аппарата выше линии MN (рис. 2) с концентрацией фаз y и x , проинтегрировав уравнение материального баланса (уравнение 3) в пределах от y до y_k и от x_n до x получим

$$-G \int_y^{y_k} dy = L \int_{x_n}^x dx \quad (9)$$

получим

$$G(y - y_k) = L(x - x_n) \quad (10)$$

уравнение материального баланса для части аппарата выше MN .

Из уравнения (10) находим

$$y = \frac{L}{G}x + \left(y_k - \frac{L}{G}x_n\right) \quad (11)$$

Это уравнение называется уравнением рабочей линии процесса массообмена. Оно выражает зависимость между неравновесными составами фаз y , x в любом сечении аппарата.

Величины G , L , y_k , x_n известны и являются постоянными, поэтому можно обозначить через $\frac{L}{G} = A$ и $y_k - \frac{L}{G}x_n = B$, тогда получим

$$y = Ax + B \quad (12)$$

Это уравнение прямой линии, из которого следует, что концентрации распределяемого вещества в фазах G и L связаны линейной зависимостью [2,3].

Основное уравнение массопередачи

Основной закон массопередачи можно сформулировать, исходя из общих кинетических закономерностей химико-технологических процессов. Скорость процесса равна движущей силе, делённой на сопротивление:

$$\frac{dM}{dF d\tau} = \frac{\Delta}{R} \quad (13)$$

где dM – количество вещества, переходящее из одной фазы в другую, кг/с; dF – поверхность фазового контакта, м²; $d\tau$ – время, с; Δ – движущая сила процесса массопередачи; R – сопротивление.

Обозначим величину, обратную сопротивлению $1/R$, через K и относя количество перешедшего вещества из одной фазы в другую dM к единице времени, уравнение (13) можно записать в виде:

$$M = K dF \Delta, \quad (14)$$

где K – коэффициент скорости или коэффициент массопередачи.

Уравнение (14) называется основным уравнением массопередачи. Для всей поверхности фазового контакта F уравнение (14) записывается

$$M = KF\Delta \quad (15)$$

Таким образом, количество вещества M , переходящее из одной фазы в другую за единицу времени, пропорционально поверхности соприкосновения фаз F и движущей силе Δ .

Размерность коэффициента массопередачи определяется из уравнения (15):

$$[K] = \left[\frac{M}{F\Delta} \right] = \left[\frac{\text{кг}/\text{с}}{\text{м}^2 \cdot (\text{ед. движ. силы})} \right] \quad (16)$$

Коэффициент массопередачи выражает собой количество вещества, переходящего из одной фазы в другую за единицу времени через единицу поверхности соприкосновения фаз при движущей силе, равной единице.

Средняя движущая сила процесса массопередачи

Движущая сила Δ может быть выражена в любых единицах, применяемых для выражения состава фаз. Движущая сила процесса Δ может быть выражена через концентрации в одной из фаз:

$$M = K_y(y - y^*)F, \quad (17)$$

$$M = K_x(x^* - x)F, \quad (18)$$

где y, x – рабочие концентрации распределяемого компонента в газовой и жидкой фазе соответственно; y^*, x^* – равновесные концентрации.

Если рабочая и равновесная концентрации распределяемого вещества выражены через относительные весовые составы (кг/кг), то размерность коэффициента массопередачи будет:

$$[K] = \left[\frac{M}{F\Delta} \right] = \left[\frac{\text{кг}/\text{с}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{кг}} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right] \quad (19)$$

При выражении движущей силы через разность парциальных давлений $\Delta p = p - p^*$, Н/м²:

$$[K] = \left[\frac{M}{F\Delta} \right] = \left[\frac{\text{кг}/\text{с}}{\text{м}^2 \cdot \text{Н}/\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} \right] = \left[\frac{\text{с}}{\text{м}} \right] \quad (20)$$

Если движущая сила процесса выражена через разность объемных концентраций (кг/м³), то размерность коэффициента массопередачи будет [2,3]:

$$[K] = \left[\frac{M}{F\Delta} \right] = \left[\frac{\text{кг}/\text{с}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \quad (21)$$

Средняя движущая сила процесса массопередачи

Движущая сила меняется с изменением рабочих концентраций. Поэтому для всего процесса массообмена, протекающего в пределах изменения концентраций от начальных до конечных определяют среднюю движущую силу. Выражение средней движущей силы зависит от того, является ли линия равновесия (при прочих равных условиях) кривой или прямой.

Для определения средней движущей силы рассмотрим процесс, протекающий в противоточном колонном аппарате при следующих условиях: 1) зависимость $y^* = f(x)$ является кривой; 2) расходы фаз постоянны ($G = \text{const}$, $L = \text{const}$), т.е. рабочая линия является прямой; 3) коэффициенты массопередачи не изменяются ($K_x = \text{const}$, $K_y = \text{const}$) по высоте аппарата (рис. 2).

В нашем случае $y > y^*$, поэтому распределяемое вещество переходит из фазы G в фазу L . Для элемента поверхности соприкосновения фаз dF движущая сила может быть выражена разностью рабочей и равновесной концентраций $\Delta y = y - y^*$. Количество вещества перейдет из фазы G в фазу L на элементе поверхности dF , равной dM , которое определится в соответствии с основным уравнением массопередачи:

$$dM = K_y(y - y^*)dF \quad (22)$$

Это же количество вещества можно выразить как

$$dM = dM = G(-dy) \quad (23)$$

Сопоставляя уравнения (22) и (23) и решая относительно dF , найдем

$$dF = -\frac{Gdy}{K_y(y-y^*)} = -\frac{G}{K_y} \cdot \frac{dy}{(y-y^*)} \quad (24)$$

Интегрируя уравнение (24) в пределах от 0 до F и от y_n до y_k , получим

$$\int_0^F dF = -\frac{G}{K_y} \int_{y_n}^{y_k} \frac{dy}{y-y^*} \quad (25)$$

или

$$F = -\frac{G}{K_y} \int_{y_n}^{y_k} \frac{dy}{y-y^*} \quad (26)$$

Для всей поверхности фазового контакта F на основании основного уравнения массопередачи и уравнения материального баланса можно написать:

$$M = G(y_n - y_k) = K_y F \Delta y_m \quad (27)$$

где Δy_m – средняя движущая сила.

Из уравнения (27) количество фазы G можно выразить:

$$G = \frac{M}{y_H - y_K} \quad (28)$$

Найденное значение G подставим в уравнение (26) и получим:

$$F = \frac{M}{K_y(y - y^*)} \int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*} \quad (29)$$

или

$$M = K_y F \frac{y_H - y_K}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}} \quad (30)$$

Сравнивая уравнения (27) и (30)

$$K_y F \Delta y_m = K_y F \frac{y_H - y_K}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}} \quad (31)$$

найдем значение средней движущей силы

$$\Delta y_m = \frac{y_H - y_K}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}} \quad (32)$$

При выражении движущей силы через концентрацию распределяемого вещества в жидкой фазе x аналогично получается выражение средней движущей силы

$$\Delta y_m = \frac{x_K - x_H}{\int_{y_H}^{y_K} \frac{dx}{x^* - x}} \quad (33)$$

Когда линия равновесия является прямой ($y^* = mx$), средняя движущая сила определяется как средняя логарифмическая между движущими силами в начале и в конце поверхности фазового контакта:

$$\Delta y_m = \frac{\Delta y_H - \Delta y_K}{2,31g \frac{\Delta y_H}{\Delta y_K}} \quad (34)$$

где $\Delta y_H = y_H - y_H^*$ – движущая сила в начале поверхности фазового контакта;

$\Delta y_K = y_K - y_K^*$ – движущая сила в конце поверхности фазового контакта [2-3].

Вопросы для самоконтроля:

1. Перечислите основные массообменные процессы.
2. Что является движущей силой массообменных процессов?
3. Почему массообменные процессы как правило проводят в противоточных аппаратах?
4. Приведите дифференциальное и интегральное уравнения массопередачи для всей поверхности фазового контакта.
5. Каков физический смысл уравнения (11) рабочей линии непрерывного массообменного процесса.
6. Дайте определение основному закону массопередачи.

7. Что называют коэффициентом массопередачи?
8. Укажите возможные размерности коэффициента массопередачи.
9. По какому уравнению рассчитывается средняя движущая сила массопередачи?
10. Что происходит с массообменным процессом при установлении состояния равновесия?

Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазак университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.