

ЛЕКЦИЯ 2

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МАССОПЕРЕДАЧИ. МЕХАНИЗМ ПЕРЕНОСА МАССЫ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИФФУЗИЯ. КОЭФФИЦИЕНТЫ МАССООТДАЧИ. УРАВНЕНИЕ АДДИТИВНОСТИ. ДВИЖУЩАЯ СИЛА МАССОПЕРЕДАЧИ.

Основное уравнение массопередачи.

Процесс массопередачи следует рассматривать как многостадийный:

1. Перенос вещества (компонента) из объема «отдающей» фазы к поверхности раздела фаз;
2. Перенос вещества через границу раздела фаз;
3. Перенос вещества от границы раздела в объем «принимающей» фазы.

Для описания кинетики такого многостадийного процесса переноса массы используют линейные уравнения, подобные уравнениям, применяемым в процессах теплопередачи.

Считается, что скорость процессов массопередачи тем выше, чем больше движущая сила и тем меньше, чем больше сопротивление массопередаче.

Выразим скорость массопередачи (удельный поток массы) j . Через элементарную поверхность контакта фаз dA за единицу времени проходит (переносится вещества) dJ . Тогда:

$$j = \frac{dJ}{dA}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right]; \left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right] \quad (2.1)$$

$$j = \frac{dJ}{dA} = \frac{\Delta y}{R_y} = \frac{\Delta x}{R_x} \quad (2.2)$$

$R_y; R_x$ - Общее сопротивление массопереносу, выраженное в единицах газовой и жидкой фазы соответственно. Заменим (как в теплопередаче) общие сопротивления $R_y; R_x$ величинами, им обратными:

$$\frac{1}{R_y} = K_y; \frac{1}{R_x} = K_x \quad (2.3)$$

$K_y; K_x$ - коэффициенты массопередачи, выраженные в единицах газовой и жидкой фазы соответственно. Тогда:

$$j = K_y \cdot \Delta y = K_x \cdot \Delta x \quad (2.4)$$

Или

$$\begin{aligned}dJ &= K_y \cdot dA \cdot \Delta y \\dJ &= K_x \cdot dA \cdot \Delta x\end{aligned}\tag{2.5}$$

Или в интегральном виде:

$$\begin{aligned}J &= K_y \cdot A \cdot \Delta y_{cp} \\J &= K_x \cdot A \cdot \Delta x_{cp}\end{aligned}\tag{2.6}$$

Это уравнения массопередачи, записанные через движущие силы, выраженные в единицах концентраций газовой жидкой и фаз.

J - количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую в единицу времени $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с}} \right], \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right];$

A – поверхность массопередачи $[m^2];$

$\Delta y_{cp}; \Delta x_{cp}$ - средние по всему аппарату (всей поверхности) движущие силы, выраженные соответственно в единицах газовой и жидкой фаз.

$K_y; K_x$ - коэффициенты массопередачи, определяют массу распределяемого вещества, переходящего из одной фазы в другую за единицу времени через единицу поверхности контакта фаз при движущей силе равной единице $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot (\text{ед. движ. силы})} \right]$

Размерность коэффициента K и его численное значение зависят от размерности движущей силы:

$$K_y = J / A \cdot \Delta y_{cp} = \left[\frac{\frac{\text{кмоль комп}}{\text{с}}}{\text{м}^2 \frac{\text{кмоль комп}}{\text{кмоль смеси}}} \right] = \left[\frac{\text{кмоль смеси}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]\tag{2.7}$$

В зависимости от размерности движущей силы, K может иметь различную размерность и различные числовые значения.

Уравнения массопередачи используются для расчета требуемой поверхности массопередачи A , по которой определяют размеры массообменного аппарата.

Механизм процессов массопередачи (модель диффузионного погранслоя)

В основе описания процессов массопередачи лежат следующие допущения:

1) В пределах каждой фазы процесс массопереноса протекает независимо один от другого. Выполняется аддитивность фазовых сопротивлений.

2) На границе раздела фазы находятся в равновесии, при этом равновесие устанавливается значительно быстрее, чем изменяются концентрации в фазах. (В большинстве случаев доказано экспериментально)

Перенос вещества через свободную границу в системах газ-жидкость и жидкость-жидкость включает 3 этапа: перемещение из ядра потока к границе раздела фаз, через границу, от границы в ядро другого потока.

Примем, что потоки турбулентны и распределенное вещество переходит из газовой фазы Φ_y в жидкую Φ_x .

Механизмы переноса внутри фазы:

- молекулярный (диффузионный), осуществляется перемещением молекул вещества (в неподвижных ламинарно движущихся средах).

- конвективный, осуществляется перемещением макрочастиц (перенос потоком).

Конвективный перенос осуществляется значительно быстрее диффузионного.

Ядро потока. Удалено от границы раздела фаз. Перенос вещества осуществляется турбулентными пульсациями, поэтому концентрация вещества здесь одинакова. Роль молекулярной диффузии мала.

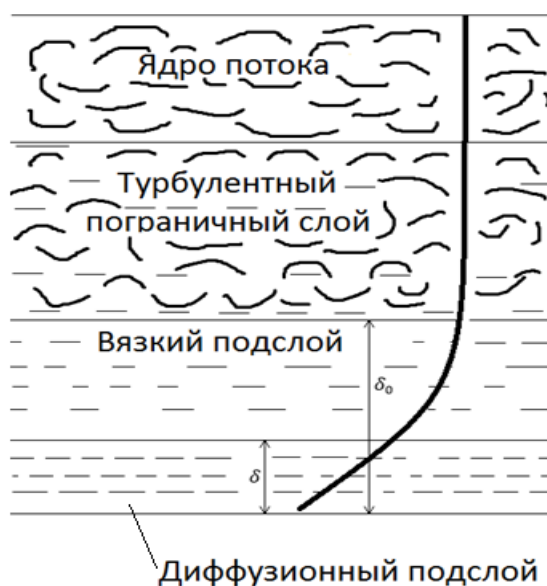


Рис. 2.1. Профиль концентраций в фазе по модели диффузионного пограничного слоя

По мере приближения к границе раздела фаз, в турбулентном пограничном слое турбулентные пульсации затухают за счет сил поверхностного натяжения или за счет сил трения. Концентрация медленно снижается.

Внутри пограничного слоя различают:

- вязкий подслой. В нем уменьшается масштаб турбулентности, концентрация меняется заметно быстрее. Под действием сил трения движение приближается к ламинарному, возрастает доля вещества, передаваемого молекулярной диффузией. Но доля турбулентных пульсаций еще велика.

- диффузионный подслой. Существует внутри вязкого подслоя. Вещество здесь переносится только молекулярной диффузией. Турбулентные пульсации отсутствуют. Распределение концентраций линейно, т.е. концентрация меняется линейно до граничных значений. Здесь наибольший градиент концентраций. То есть практически все сопротивление массопереносу сосредоточено внутри этого тонкого диффузионного подслоя.

Основным законом переноса вещества молекулярной диффузией является

1-й закон Фика:

$$J = -D \cdot A \cdot dC / dn \quad (2.8)$$

где J – количество вещества, передаваемого путем диффузии в единицу времени, $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с}} \right]$;

A – площадь поверхности массопередачи, м^2

dC/dn – градиент концентраций, направленный по нормали к поверхности, $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}} \right]$;

" – " указывает, что поток массы направлен в сторону уменьшения концентрации;

D – коэффициент диффузии:

$$D = \frac{J}{A \cdot dC / dn}; \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right] \quad (2.9)$$

Он показывает массу вещества, проходящую через единицу поверхности в единицу времени при градиенте концентраций, равном единице.

Коэффициент диффузии отражает физические свойства вещества и среды, которые зависят от размеров молекул, молекулярной массы вещества, давления и температуры. Его рассчитывают, определяют экспериментально или находят в справочниках. С ростом температуры коэффициент диффузии растет, с ростом давления – уменьшается.

$$D \text{ газов} \sim 10^{-5} \frac{M^2}{c}; D \text{ жидкостей} \sim 10^{-9} \frac{M^2}{c} \quad (2.10)$$

Таким образом, зная механизм переноса вещества, можно ответить на вопрос:

Каковы пути интенсификации процессов массопередачи.

Чтобы увеличить скорость массопередачи, необходимо воздействовать на самые медленные стадии, а именно – на процессы, протекающие в пограничных слоях. Необходимо уменьшать толщину пограничного слоя, увеличивая турбулизацию потока либо увеличением скорости, либо перемешиванием.

Процессы переноса вещества внутри одной фазы к границе раздела или от нее принято обозначать термином массоотдача в отличие от массопередачи - переноса вещества из ядра одной фазы через границу раздела фаз в ядро потока другой фазы.

Уравнение массоотдачи

Масса вещества, переносимая от поверхности или к поверхности раздела фаз в единицу времени через единицу поверхности, пропорциональна разности концентраций в ядре потока и на границе раздела фаз. Для рассматриваемого случая переноса распределяемого вещества из газовой фазы Φ_y в жидкую Φ_x фазу уравнения массоотдачи будут иметь вид:

$$\begin{aligned} J &= \beta_y \cdot A \cdot (y - y_{cp}) \\ J &= \beta_x \cdot A \cdot (x_{cp} - x) \end{aligned} \quad (2.11)$$

β_y и β_x – коэффициенты массоотдачи по фазам, характеризуют количество вещества, передаваемого совместно диффузией и конвекцией через единицу поверхности в единицу времени при разности концентраций внутри фазы и на границе раздела равной единице. (Размерность такая же, как и коэффициента массопередачи).

Величина коэффициента массоотдачи зависит от гидродинамических условий в аппарате, свойств среды (плотности, вязкости, коэффициента молекулярной диффузии).

Коэффициенты массоотдачи в каждом конкретном случае определяют, обобщая опытные данные (часто используя методы теории подобия).

Связь между коэффициентами массопередачи и массоотдачи (Уравнение аддитивности диффузионных сопротивлений)

Выделим элементный участок аппарата поверхностью dA .

- 1) Масса вещества переходит из газовой фазы Φ_y в жидкую Φ_x через элементную площадку dA .
- 2) Процесс массопередачи установившийся.

3) Коэффициенты диффузии D и коэффициенты массоотдачи β не изменяется вдоль поверхности массоотдачи.

4) Зависимость между равновесными концентрациями линейна

$$y^* = m(x)$$

m — коэффициент распределения (тангенс угла наклона касательной к равновесной линии).

5) На границе раздела фаз устанавливается равновесие ($y_{zp} = m \cdot x_{zp}$). Это равносильно допущению, что нет сопротивления переходу вещества из фазы в фазу. (Это экспериментально подтверждено).

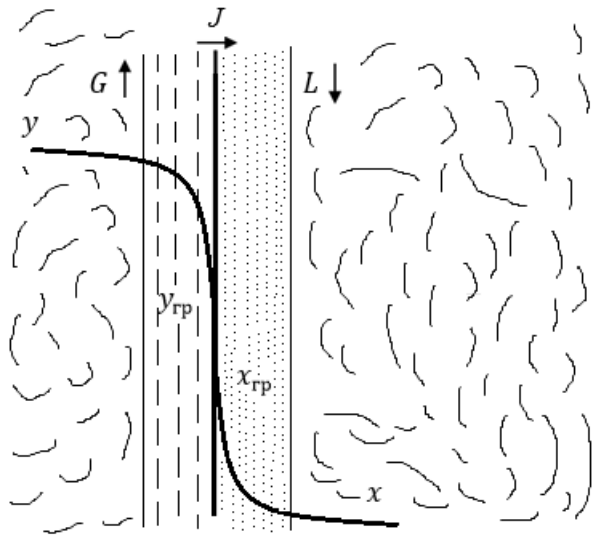


Рис.2.2. Схема распределения концентраций в фазах и на границе для случая переноса вещества из газовой фазы Φ_y в жидкую Φ_x

В уравнении (2.5) выразим движущую силу для элемента поверхности dA как разность $(y - y^*)$

$$dJ = K_y \cdot dA \cdot \Delta y = K_y \cdot dA \cdot (y - y^*) \quad (2.12)$$

Для этого же участка поверхности справедливы уравнения (2.11):

$$\begin{aligned} dJ &= \beta_y \cdot dA \cdot (y - y_{zp}) \\ dJ &= \beta_x \cdot dA \cdot (x_{zp} - x) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Выразим из этих уравнений (2.12, 2.13) движущие силы:

$$\begin{aligned}\frac{dJ}{K_y \cdot dA} &= (y - y^*) \\ \frac{dJ}{\beta_y \cdot dA} &= (y - y_{zp}) \\ \frac{dJ}{\beta_x \cdot dA} &= (x_{zp} - x)\end{aligned}\tag{2.14}$$

В последнем выражении выразим концентрации в жидкой фазе x через концентрации в газовой фазе:

На основании допущения (4):

$$x = \frac{y^*}{m}$$

На основании допущения (5):

$$x_{zp} = \frac{y_{zp}}{m}$$

Система уравнений (2.14) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}\frac{dJ}{K_y \cdot dA} &= (y - y^*) \\ \frac{dJ}{\beta_y \cdot dA} &= (y - y_{zp}) \\ \frac{dJ}{\beta_x \cdot dA} &= \left(\frac{y_{zp}}{m} - \frac{y^*}{m}\right)\end{aligned}\tag{2.15}$$

Сложим последние два уравнения:

$$\frac{dJ}{\beta_y \cdot dA} + \frac{dJ \cdot m}{\beta_x \cdot dA} = y - y^*\tag{2.16}$$

Заменим $y - y^*$ согласно первому уравнению системы (2.15):

$$\frac{dJ}{dA} \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x} \right) = \frac{dJ}{K_y \cdot dA}\tag{2.17}$$

То есть:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x} \quad (2.18)$$

$$R_y = r_y + r_x$$

Это - уравнение аддитивности (суммы) фазовых диффузионных сопротивлений

$r_y; r_x$ – фазовые диффузионные сопротивления;

R_y - общее диффузионное сопротивление, выраженное в единицах газовой фазы. Это уравнение свидетельствует, что общее сопротивление массопередаче складывается из частных сопротивлений в фазах.

Аналогично можно получить выражение для коэффициента массопередачи, отнесенного к концентрации жидкости K_x :

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{m\beta_y} \quad (2.19)$$

$$R_x = r_x + r_y$$

Из уравнения аддитивности следует, что:

$$K_x = m \cdot K_y \quad (2.20)$$

Рассмотрим частные случаи.

1. Хорошо растворимый газ. Например, аммиак в воде ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$); хлористый водород в воде ($\text{HCl-H}_2\text{O}$). В этом случае m -мало; тогда $r_x = \frac{m}{\beta_x}$ - очень мало.

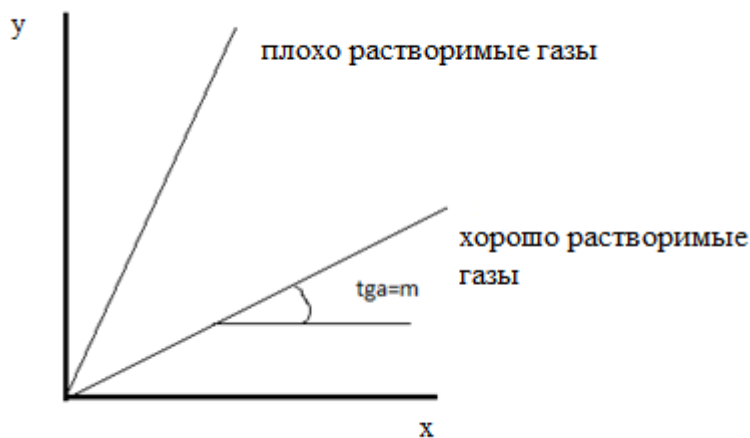


Рис.2.3. Положение линий равновесия для случаев плохо – и хорошо растворимых газов.

Все сопротивление массопередаче сосредоточено в газовой фазе (см. уравнение (2.18):

$$K_y \cong \beta_y \quad (2.21)$$

Процесс переноса определяется скоростью диффузии вещества в газовой фазе (лимитируется газовой фазой). Процесс в жидкости идет очень быстро. Для увеличения массопереноса надо турбулизовать поток газа.

2. Плохо растворимые газы. Например, N_2 ; O_2 ; CO_2 в воде.

В этом случае m -велико; тогда $r_y = \frac{1}{m \cdot \beta_y}$ - очень мало (см. уравнение (2.19).

Тогда:

$$K_x \cong \beta_x \quad (2.22)$$

Все сопротивление сосредоточено в жидкой фазе и именно ее необходимо турбулизовать.

Каковы трудности при расчете коэффициентов m/o ?

1. Трудности заключаются в измерении концентраций на границе раздела фаз.

Системы с высоким и низким значением m служат модельными для определения коэффициентов массоотдачи. ($K_x \approx \beta_x$ - m велико, $K_y \approx \beta_y$ - m мало). В этих случаях не требуется знать концентрацию на границе раздела. Можно использовать равновесные данные.

2. Аддитивность получена при $m = \text{const}$. Если линия равновесия кривая:

А) если кривизна на рабочем участке невелика, то линию спрямляют (линеаризируют), используя среднее значение m .

Б) если кривизна большая, то равновесную линию делят на участки, на которых поступают по пункту А).

Движущая сила массопередачи

Величина движущей силы процессов массопередачи зависит от взаимного направления движения фаз и вида их контакта.

Движение фаз, как и в теплопередаче, может происходить при противотоке, прямотоке, перекрестном токе. Возможны и другие разнообразные виды взаимного направления движения фаз, связанные с перемешиванием и распределением потоков.

Контакт фаз может быть непрерывным или ступенчатым (см. рис 2.2).

Обычно концентрации фаз изменяются при их движении вдоль поверхности раздела. Соответственно изменяется и движущая сила. Поэтому в общем уравнение массопередачи входит величина средней движущей силы.

Расчет средней движущей силы

Выделим элементный участок аппарата поверхностью dA . Рассмотрим перенос массы вещества из газовой фазы Φ_y в жидкую Φ_x через этот элемент поверхности dA .

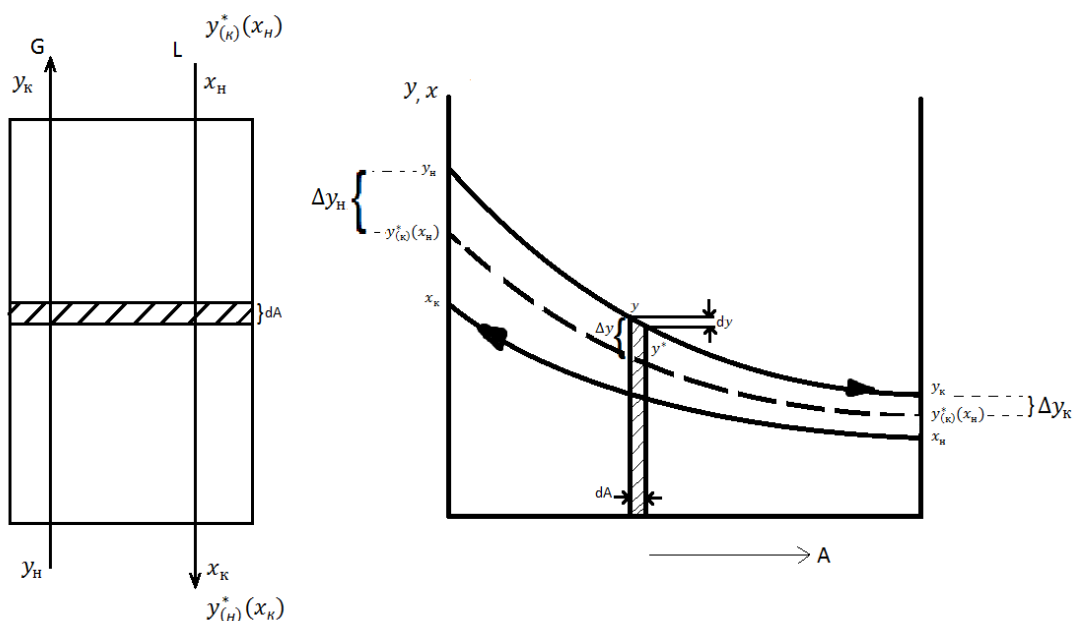


Рис.2.4. К определению средней движущей силы процесса массопередачи.

Примем:

1. Процесс массопередачи установившийся.
2. В аппарате противоток.
3. Фазы двигаются по модели МИВ, не перемешиваются.
4. Концентрации в фазах малы, расходы фаз постоянны $L = const$;

$G = const$, рабочая линия – прямая.

5. Линия равновесия – кривая $y^* = f(x)$
6. Коэффициенты массопередачи по высоте постоянны K_x ; $K_y = const$.

В случае, когда рабочая линия является прямой (допущение 4), используются относительные массовые или мольные концентрации.

Средняя движущая сила процесса массопередачи:

$$\Delta Y_{cp} = \frac{(Y_n - Y_k)}{\int_{Y_k}^{Y_n} \frac{dY}{Y - Y^*}} \quad (2.31)$$

Аналогично выражается средняя движущая сила в концентрациях жидкой фазы Φ_x :

$$\Delta X_{cp} = \frac{(X_k - X_n)}{\int_{X_n}^{X_k} \frac{dX}{X^* - X}} \quad (2.31a)$$

Это - уравнения для выражения средней движущей силы в общем виде, когда линия равновесия является кривой. Подынтегральные выражения в этих уравнениях представляют изменение рабочей концентрации, приходящееся на единицу движущей силы по газовой и жидкой фазе соответственно. И называются числами единиц переноса.

По газовой фазе:

$$\int_{Y_k}^{Y_n} \frac{dY}{Y - Y^*} = N_{Oy} \quad (2.32a)$$

По жидкой фазе:

$$\int_{X_n}^{X_k} \frac{dX}{X^* - X} = N_{Ox} \quad (2.32a)$$

Или:

$$N_{Oy} = \frac{Y_n - Y_k}{\Delta Y_{cp}} \quad (2.33)$$

$$N_{Ox} = \frac{(X_k - X_n)}{\Delta X_{cp}} \quad (2.33a)$$

Числа единиц переноса часто используются в расчетах высоты массообменных аппаратов.

В случае, когда линия равновесия является прямой ($Y^* = m \cdot X$), средняя движущая сила определяется аналогично тому, как она рассчитывается для теплообменных аппаратов, т.е. как средняя логарифмическая или средняя арифметическая величина из движущих сил массопередачи у концов аппарата:

$$\Delta Y_{cp} = \frac{[Y_H - Y_H^*(X_K)] - [Y_K - Y_K^*(X_H)]}{\ln \frac{Y_H - Y_H^*(X_K)}{Y_K - Y_K^*(X_H)}} = \frac{\Delta Y_{\delta} - \Delta Y_M}{2,31g \frac{\Delta Y_{\delta}}{\Delta Y_M}} \quad (2.34)$$

В этом уравнении ΔY_{δ} обозначает выраженную в общем виде движущую силу процесса на том конце аппарата, где она больше, а величина ΔY_M – на другом конце аппарата, где она меньше. Аналогично в концентрациях другой фазы (Фх) имеем:

$$\Delta X_{cp} = \frac{[X_K^*(Y_H) - X_K] - [X_H^*(Y_K) - X_H]}{\ln \frac{X_K^*(Y_H) - X_K}{X_H^*(Y_K) - X_H}} = \frac{\Delta X_{\delta} - \Delta X_M}{2,31g \frac{\Delta X_{\delta}}{\Delta X_M}} \quad (2.34a)$$

При $\frac{\Delta Y_{\delta}}{\Delta Y_M} \leq 2$ ($\frac{\Delta X_{\delta}}{\Delta X_M} \leq 2$) с достаточной для технических расчетов точностью

средняя движущая сила может быть рассчитана как среднеарифметическая:

$$\Delta Y_{cp} = \frac{\Delta Y_{\delta} + \Delta Y_M}{2} \quad (2.35)$$

Соответственно в концентрациях жидкой фазы:

$$\Delta X_{cp} = \frac{\Delta X_{\delta} + \Delta X_M}{2} \quad (2.35a)$$

Ошибка не более 3%