

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ ТВЁРДЫХ ВЕЩЕСТВ

к.т.н., доц. Таран Ю.А.

Три варианта процесса растворения

```
graph TD; A[Три варианта процесса растворения] --- B[полное]; A --- C[частичное]; A --- D[химическое]
```

полное

частичное

химическое

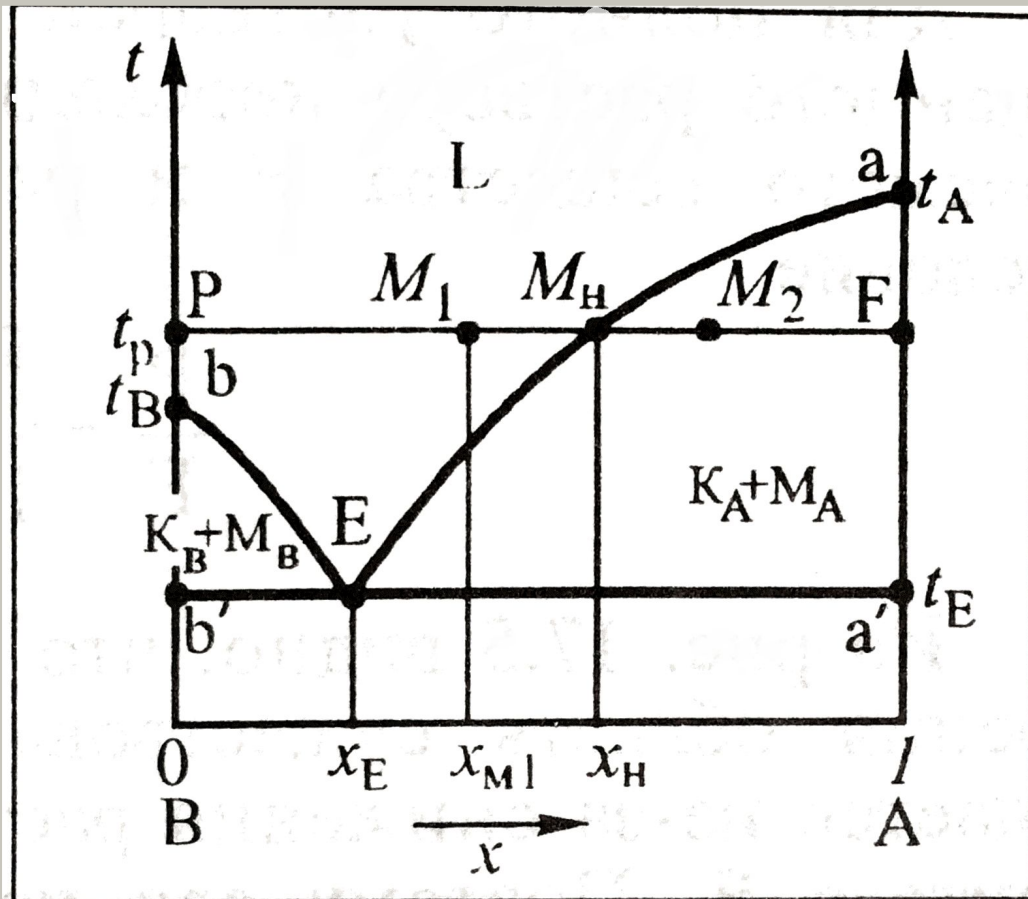
К РАСТВОРИТЕЛЯМ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ ПРЕДЪЯВЛЯЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ:

- ОНИ ДОЛЖНЫ ОБЕСПЕЧИВАТЬ ХОРОШУЮ РАСТВОРИМОСТЬ;
- ОБЛАДАТЬ НИЗКОЙ ВЯЗКОСТЬЮ;
- ДОСТУПНОСТЬЮ И ДЕШЕВИЗОЙ;
- НЕ ТОКСИЧНОСТЬЮ;
- ЛЕГКОСТЬЮ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ;
- ПРИ ЧАСТИЧНОМ РАСТВОРЕНИИ (ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ)

ПОЛНОЕ РАСТВОРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ ВОЗМОЖНО ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СЛЕДУЮЩИХ ОСНОВНЫХ УСЛОВИЙ:

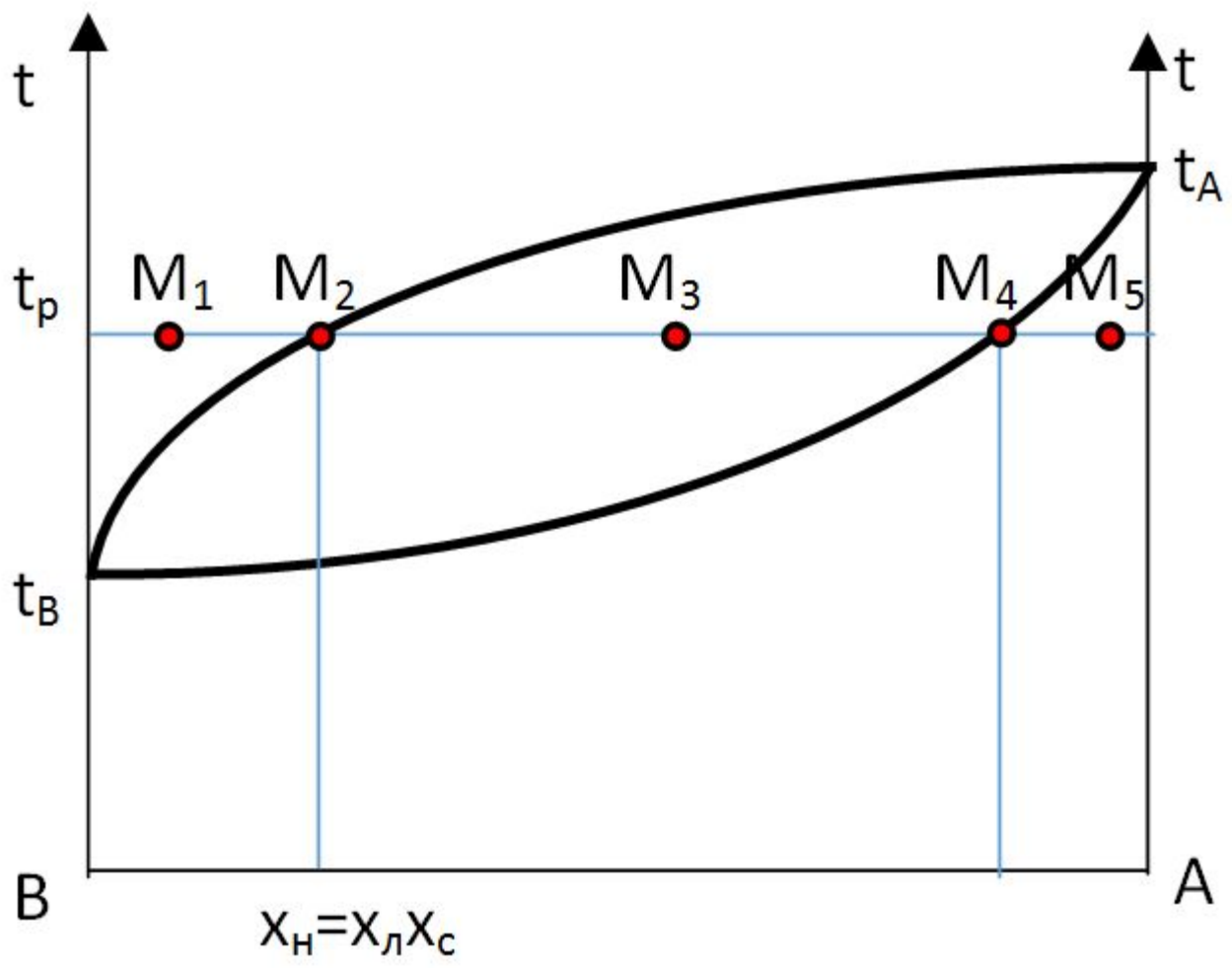
- ОТСУТСТВИЕ В ИСХОДНОМ ВЕЩЕСТВЕ КОМПОНЕНТОВ, НЕРАСТВОРИМЫХ В ИСПОЛЬЗОВАННОМ РАСТВОРИТЕЛЕ;
- ДОСТАТОЧНЫЙ РАСХОД РАСТВОРИТЕЛЯ — ТАКОЙ, ЧТОБЫ ВСЕ ВЕЩЕСТВО МОГЛО РАСТВОРИТЬСЯ ПРИ ВЫБРАННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА.
- ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СТАДИИ РАСТВОРЕНИЯ ДОЛЖНА БЫТЬ ТАКОЙ, ЧТОБЫ ВСЕ ВЕЩЕСТВО УСПЕЛО РАСТВОРИТЬСЯ.

РАСТВОРЕНИЕ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ВЕЩЕСТВ.

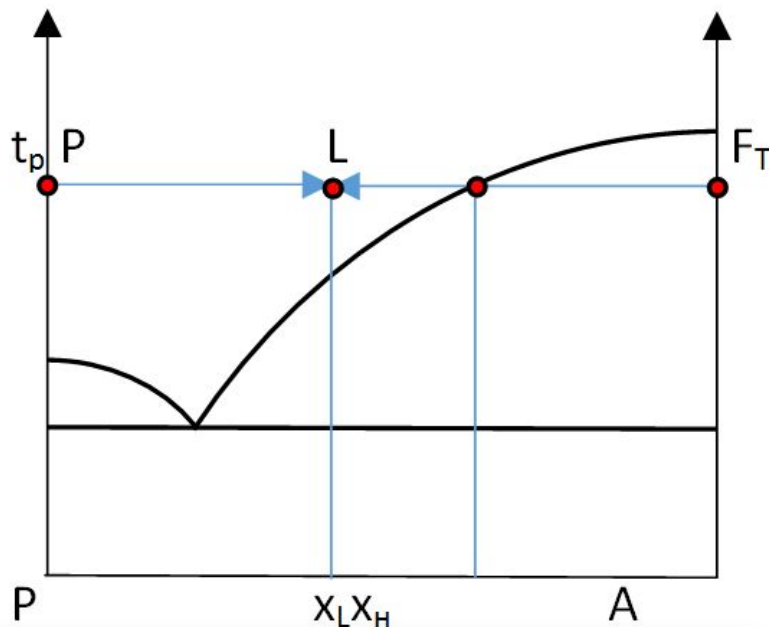


$$1. x_{M1} = \frac{\overline{PM_1}}{\overline{PF}}$$

$$2. \frac{P}{F} = \frac{\overline{M_H F}}{\overline{PM_H}} = \frac{1 - x_H}{x_H}$$



ПОПНОЕ РАСТВОРЕНИЕ ВЕЩЕСТВА



$$x_L < x_H$$

$$F_T + P = L \quad (1)$$

$$F_T x_F + P x_P = L x_L \quad (2)$$

При совместном рассмотрении получим:

$$x_L = \frac{F_T x_F + P x_P}{F_T + P} \quad (3)$$

$$P = F_T \frac{x_F - x_L}{x_L - x_P} \quad (4)$$

При получении насыщенного раствора $x_L = x_H$:

$$P_H = F_T \frac{1 - x_H}{x_H} \quad (5)$$

В частном случае, когда $x_P = 0$ и $x_F = 1$:

$$x_L = \frac{F_T}{L} = \frac{F_T}{F_T + P}; \quad P = F_T \frac{1 - x_L}{x_L}; \quad P_H = F_T \frac{1 - x_H}{x_H}.$$

Процесс растворения может осуществляться с нагревом и без нагрева.

Тепловой баланс процесса растворения без нагрева:

$$F_T c_T t_F + P c_P t_P = (F_T + P) c_L t_L + F_T r_p; \quad (F_T + P = L) \quad (6)$$

Где r_p - теплота растворения.

$$t_L = \frac{F_T (c_T t_F - r_p) + P c_P t_P}{(F_T + P) c_L} \quad (7)$$

При таком растворении обычно $t_L < t_P$

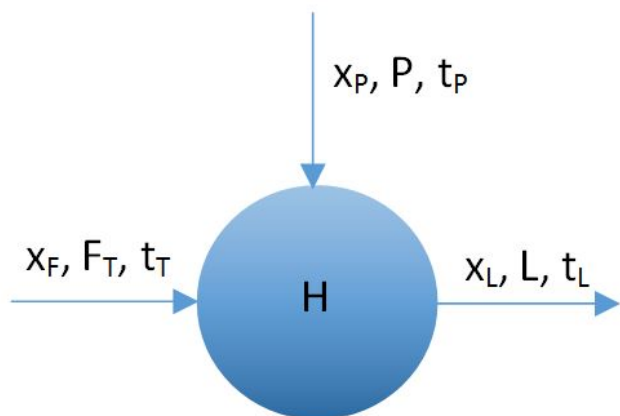
Тепловой баланс процесса растворения с нагревом:

$$F_T c_T t_F + P c_P t_P + Q_H = (F_T + P) c_L t_L + F_T r_p; \quad (F_T + P = L) \quad (8)$$

$$Q_H = F_T (r_p + c_L t_L - c_T t_F) + P (c_L t_L - c_P t_P) \quad (9)$$

Иногда для получения раствора с заданной температурой t_L используют предварительно нагретый растворитель. Его температура равна:

$$t_P = \frac{F_T (r_p - c_T t_F) + L c_L t_L}{P c_P} \quad (10)$$



АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ

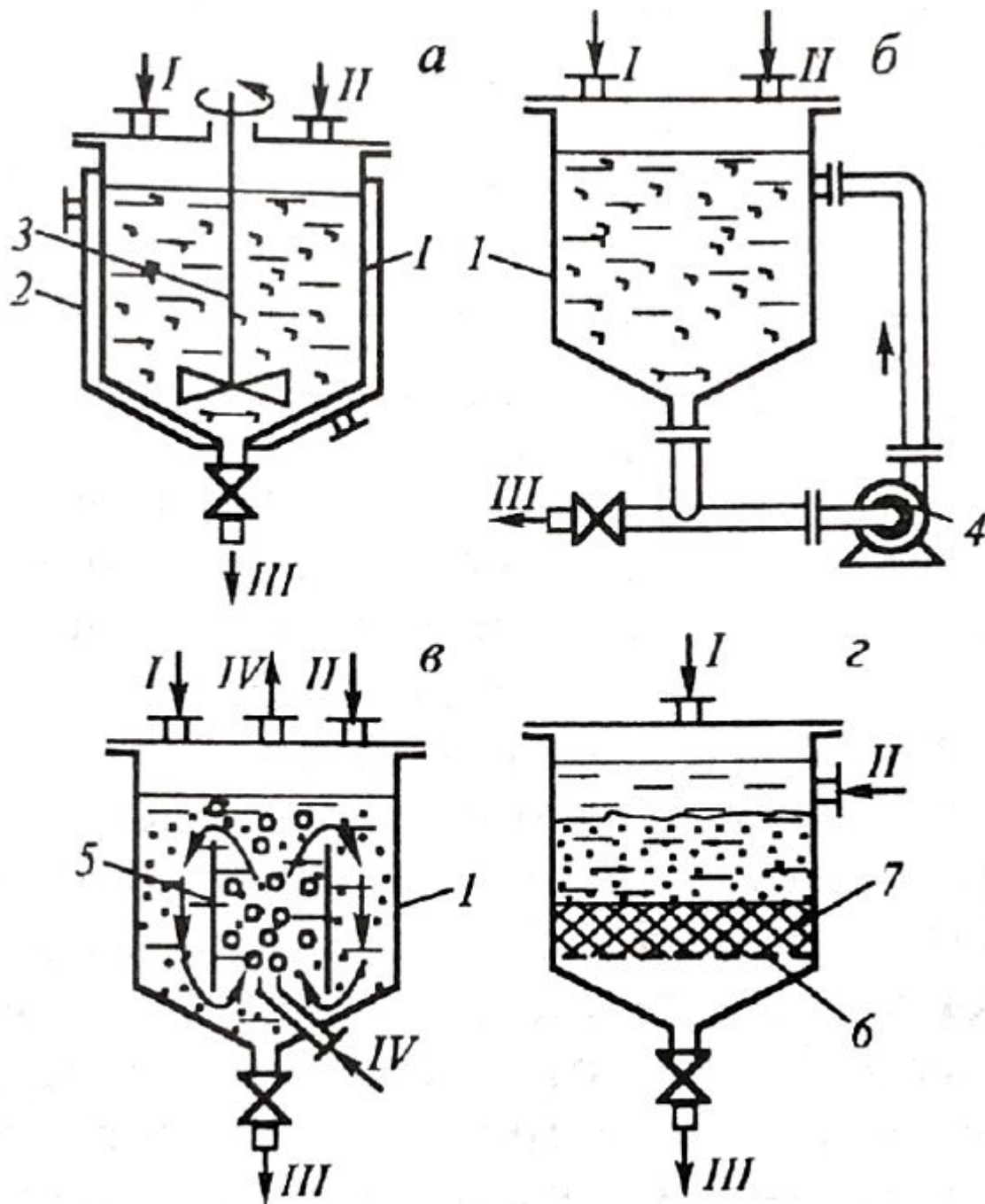
Основные требования к аппаратам для растворения

обеспечивать высокую степень извлечения целевых компонентов

обеспечивать максимально высокую концентрацию получаемого раствора

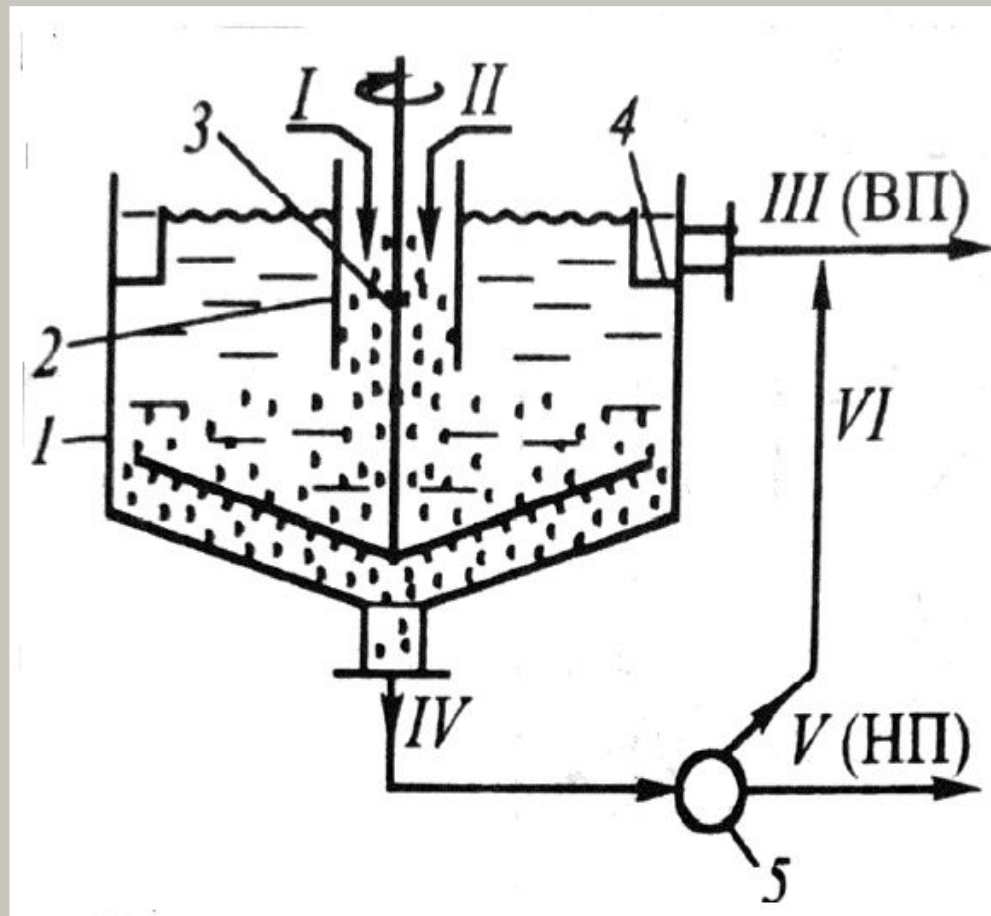
обладать высокой удельной производительностью

характеризоваться низкими удельными затратами энергии



СХЕМЫ ЕМКОСТНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ:

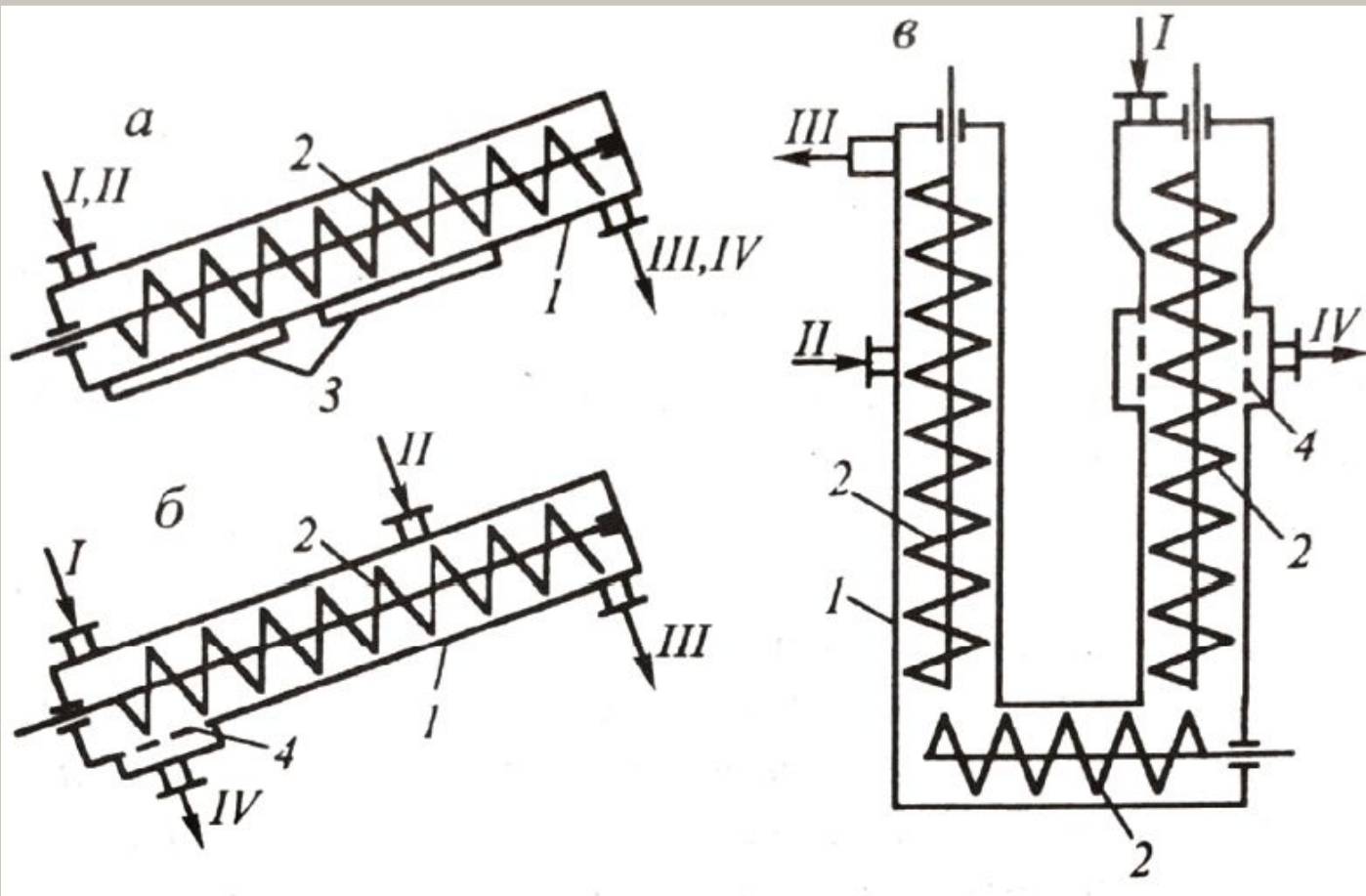
- а — С МЕХАНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКОЙ,
 - б — С ВНЕШНИМ КОНТУРОМ ЦИРКУЛЯЦИИ,
 - в — С ВНУТРЕННЕЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ СУСПЕНЗИИ,
 - г — С ФИЛЬТРАЦИЕЙ ЧЕРЕЗ НЕПОДВИЖНЫЙ СЛОЙ РАСТВОРЯЕМОГО ВЕЩЕСТВА;
- 1 — КОРПУС АППАРАТА, 2 — ТРЕЮЩАЯ РУБАШКА, 3 — МЕШАЛКА, 4 — НАСОС, 5 — ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ТРУБА, 6 — ОПОРНАЯ РЕШЕТКА, 7 — СЛОЙ ИНЕРТНОЙ НАСАДКИ;
- I — ИСХОДНОЕ ВЕЩЕСТВО, II — РАСТВОРИТЕЛЬ, III — КОНЕЧНАЯ СУСПЕНЗИЯ, IV — ВОЗДУХ.



ЭКСТРАКТОР-ОТСТОИНИК ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ:

1 — КОРПУС, 2 — ЗАГРУЗОЧНАЯ ТРУБА, 3 — ГРЕБКОВАЯ МЕШАЛКА, 4 — ПРИЕМНЫЙ КАРМАН, 5 — СЕПАРАТОР ФАЗ;

I — ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ, II — РАСТВОРИТЕЛЬ, III — РАСТВОР (ЭКСТРАКТ), IV — ПУЛЬПА (СГУЩЕННАЯ СУСПЕНЗИЯ), V — ТВЕРДЫЙ ОСТАТОК (РАФИНАТ), VI — ОТДЕЛЕННЫЙ РАСТВОР.



ШНЕКОВЫЕ РАСТВОРИТЕЛИ:

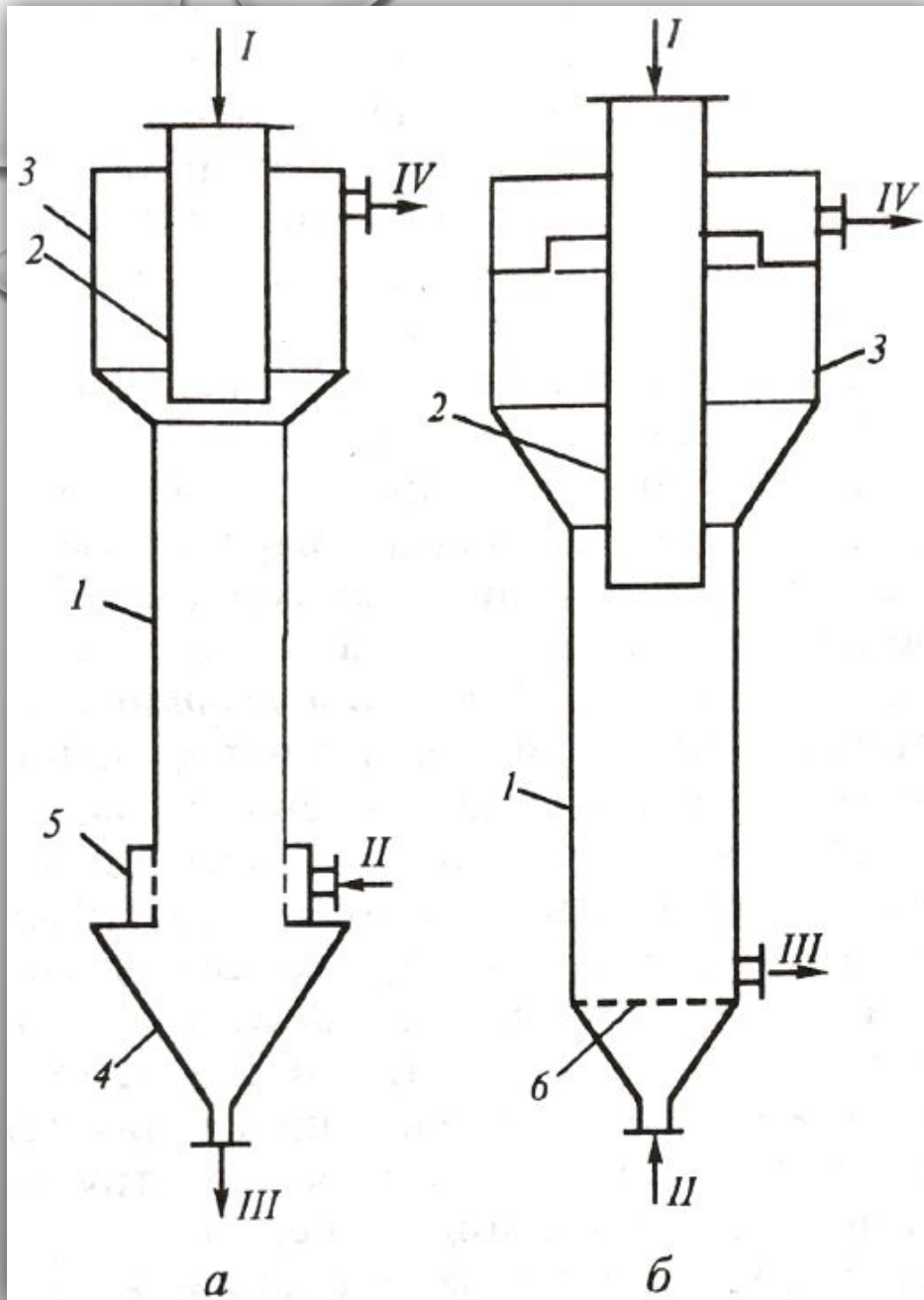
А — ПРЯМОТОЧНЫЙ, Б — ПРОТИВОТОЧНЫЙ, В — ТРЕХКОЛОННЫЙ;

1 — КОРПУС АППАРАТА, 2 — ШНЕК, 3 — РУБАШКА, 4 — ФИЛЬТРУЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ;

I — ИСХОДНОЕ ВЕЩЕСТВО, II — РАСТВОРИТЕЛЬ, III — ТВЕРДЫЙ ОСТАТОК, IV — КОНЕЧНЫЙ РАСТВОР (ЭКСТРАКТ).

КОЛОННЫЕ РАСТВОРИТЕЛИ С ПАДАЮЩИМ (А) И ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ (Б) СЛОЕМ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА:

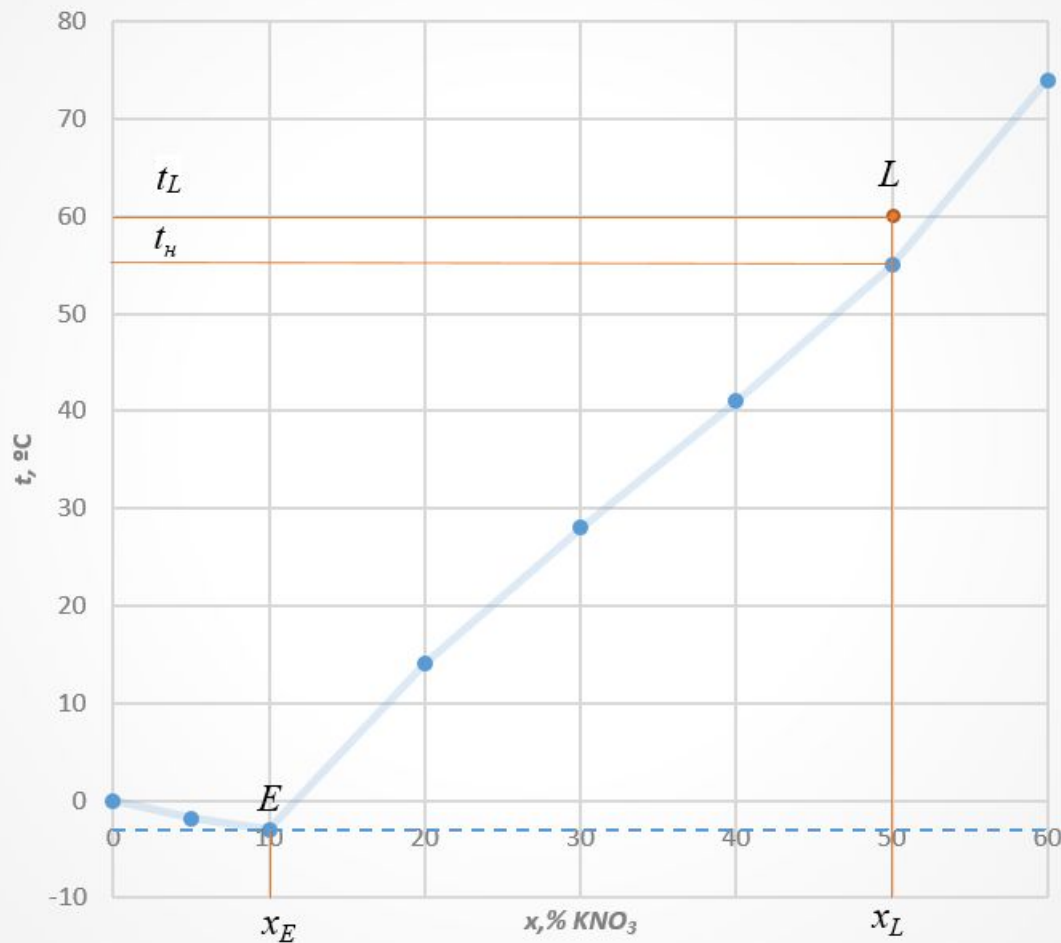
- 1 — КОРПУС АППАРАТА,
 - 2 — ЗАГРУЗОЧНАЯ ТРУБА,
 - 3 — СЕКЦИЯ ОСВЕТЛЕНИЯ РАСТВОРА,
 - 4 — ОТСТОЙНИК ТВЕРДОЙ ФАЗЫ,
 - 5 — КОЛЛЕКТОР,
 - 6 — РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ РЕШЕТКА;
- I — ИСХОДНОЕ ВЕЩЕСТВО,
II — РАСТВОРИТЕЛЬ,
III — ТВЕРДЫЙ ОСАДОК,
IV — КОНЕЧНЫЙ РАСТВОР.



ЗАДАЧА 1.

$x, \% \text{KNO}_3$	0	5	10	20	30	40	50	60
$t, ^\circ\text{C}$	0	-1,8	-3	14	28	41	55	74

Диаграмма равновесия фаз



Из справочника находим:

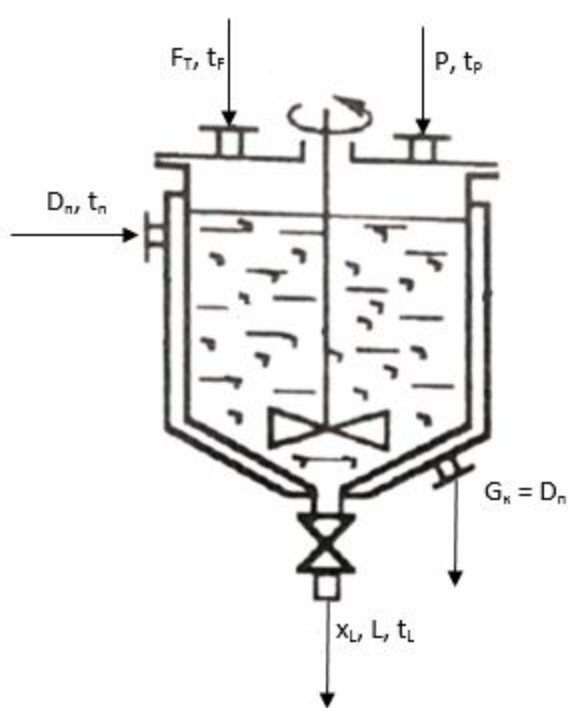
для нитрата калия:

$$r_p = 120 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; c_c = 0,96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

$$\text{для воды: } c_v = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

для пара: при $P_{\text{п}} = 2 \text{ ат}$,

$$r_n = 2210 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; t_n = 120^\circ\text{C}.$$



$$\Delta t_P = t_L - t_H \rightarrow t_L = \Delta t_P + t_H = 55 + 5 = 60^\circ\text{C}$$

$$F_T x_F + P x_P = L x_L$$

$$F_T + P = L$$

$$F_T x_F + P x_P = (F_T + P) x_L$$

$$P = F_T \frac{x_F - x_L}{x_L - x_P}$$

В нашем случае:

$x_F = 1$ (чистая соль); $x_P = 0$ (чистая вода).

Расход растворителя: $P = F_T \frac{1 - x_L}{x_L} = 1 \frac{1 - 0,5}{0,5} = 1 \text{ кг/с}$

Выход раствора: $L = F_T + P = 1 + 1 = 2 \text{ кг/с}$

Количество подводимого тепла определим из теплового баланса процесса растворения.

$$Q_H = F_T (r_P + c_L t_L - c_c t_F) + P (c_L t_L - c_P t_P)$$

$$c_L = c_c x_L + c_B (1 - x_L) = 0,96 \cdot 0,5 + 4,19 \cdot (1 - 0,5) = 2,58 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

$$Q_H = 1 \cdot (120 + 2,58 \cdot 60 - 0,96 \cdot 20) + 1 \cdot (2,58 \cdot 60 - 4,19 \cdot 15) = 349 \text{ кВт}$$

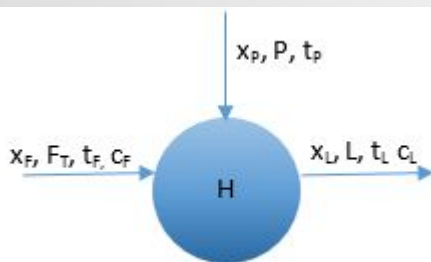
Расход греющего пара:

$$D_n = \frac{Q_H}{r} = \frac{349}{2210} = 0,158 \text{ кг/с}$$

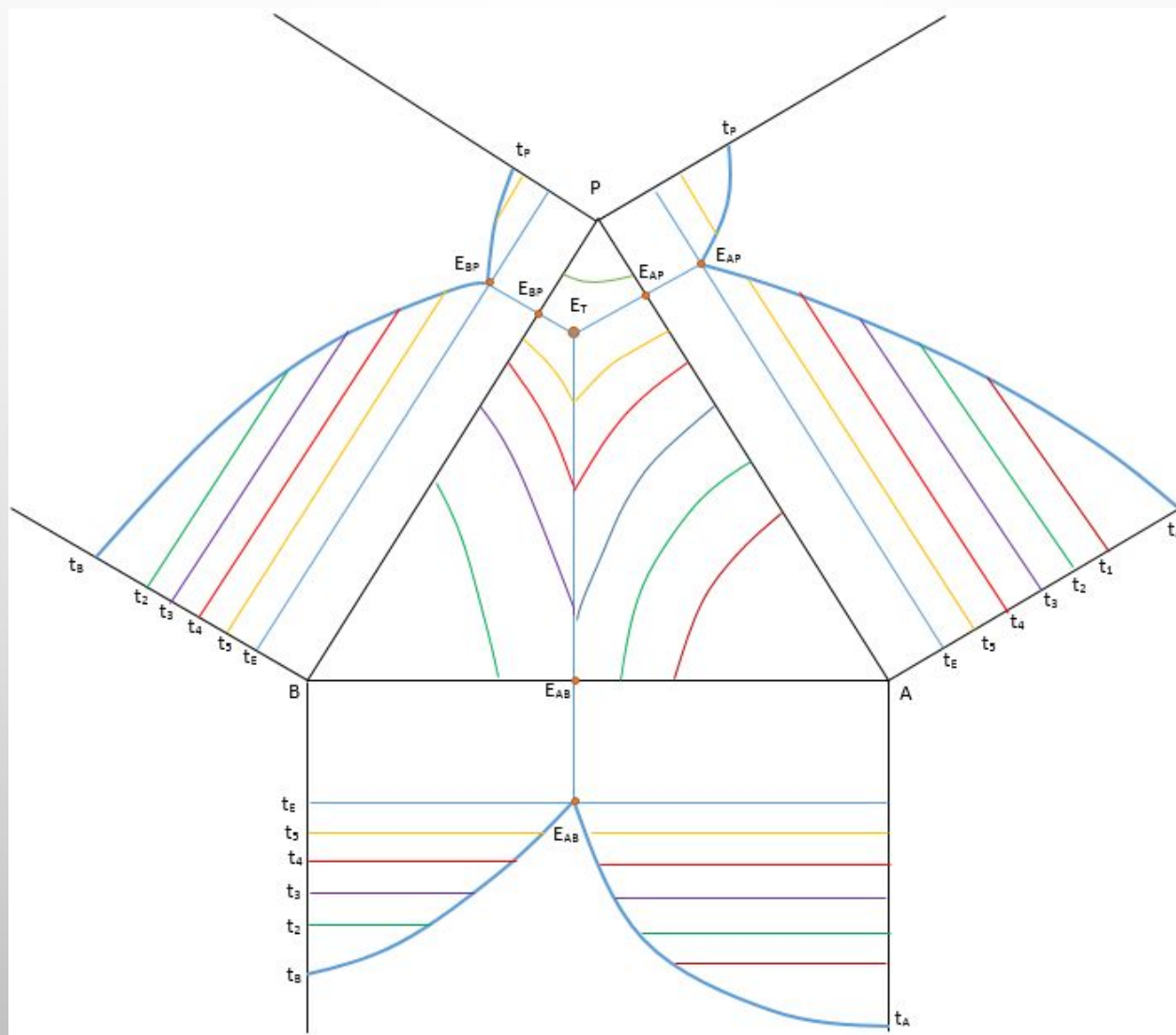
Поверхность теплообмена:

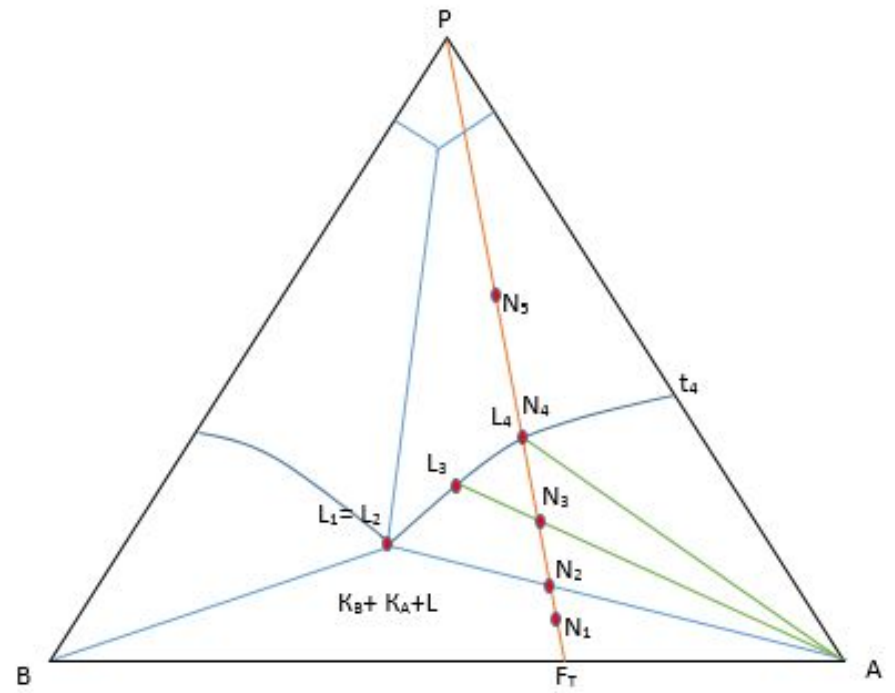
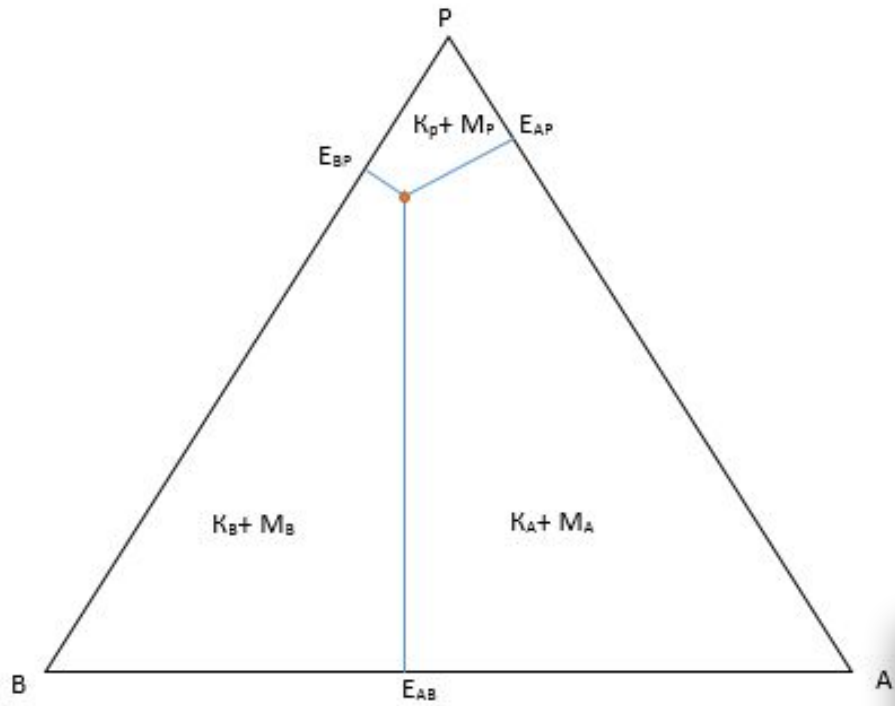
$$F = \frac{Q_H}{k \Delta t}, \quad \Delta t = t_n - t_L = 120 - 60 = 60^\circ\text{C}$$

$$F = \frac{349 \cdot 10^3}{500 \cdot 60} = 11,6 \text{ м}^2$$

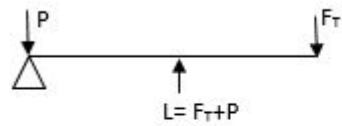


РАСТВОРЕНИЕ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ





Определение состава растворов.



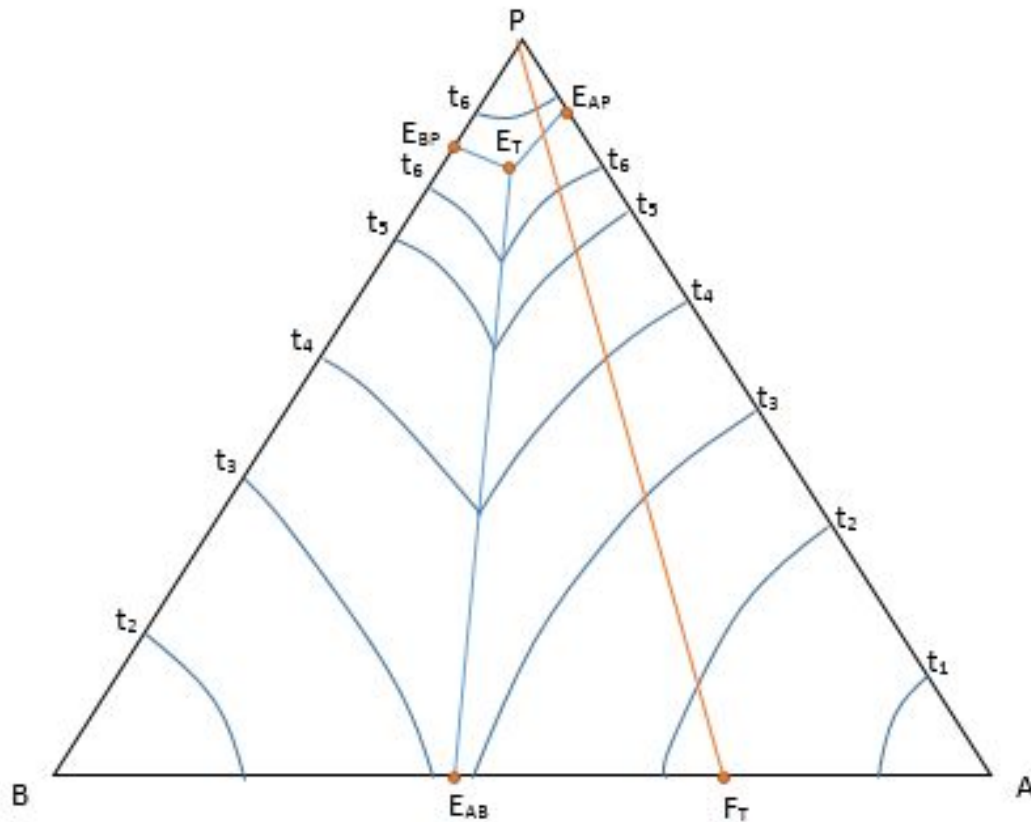
$$F_T \overline{PF_T} = L \overline{PL} = (F_T + P) \overline{PL}$$

$$\overline{PL} = \frac{F_T}{F_T + P} \overline{PF_T}$$

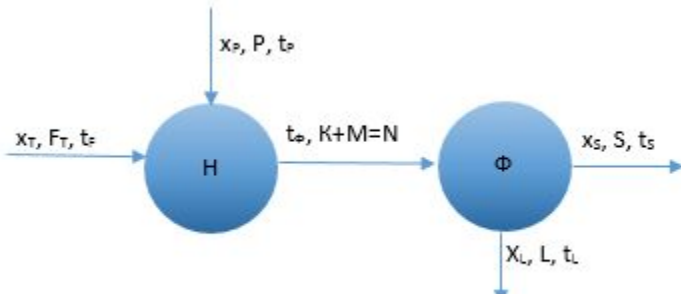
Определение расхода P .

$$P \overline{PL} = F_T \overline{LF_T}$$

$$P = F_T \frac{\overline{LF_T}}{\overline{PL}}$$



Частичное растворение бинарной смеси



S - рафинал. L - экстракт. $t_s = t_l = t_\phi$. $K \neq S$ ($x_K < x_S$). $M \neq L$ ($x_M \approx x_L$).

Стадия растворения.

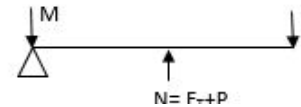
$$F_T + P = K + M = N \quad (1)$$

$$F_T x_T + P x_P = K x_K + M x_M \quad (2)$$

$$x_K = 1; x_M = f(t_\phi); M = F_T + P - K \quad (3)$$

$$K = \frac{F_T(x_T - x_M) - P(x_M - x_P)}{x_K - x_M} \quad (4)$$

Используя правило рычага.



$$K = (F_T + P) \frac{NM}{MK} \quad (5)$$

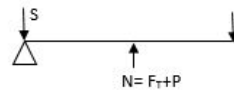
Для всего процесса.

$$F_T + P = L + S \quad (6)$$

$$F_T x_T + P x_P = L x_L + S x_S \quad (7)$$

$$L = \frac{F_T(x_T - x_S) - P(x_S - x_P)}{x_L - x_S} \quad (8)$$

$$S = F_T + P - L \quad A = \frac{M'}{K}; E = \frac{x_S - x_L}{x_K - x_L}; A = \frac{x_K - x_S}{x_S - x_L}; A = \frac{1-E}{E}. \quad x_S = E(x_K - x_L) + x_L$$



$$L \overline{SN} = (F_T + P) \overline{SN}$$

$$L = (F_T + P) \frac{\overline{SN}}{\overline{SL}}$$

Тепловой баланс нагревом.

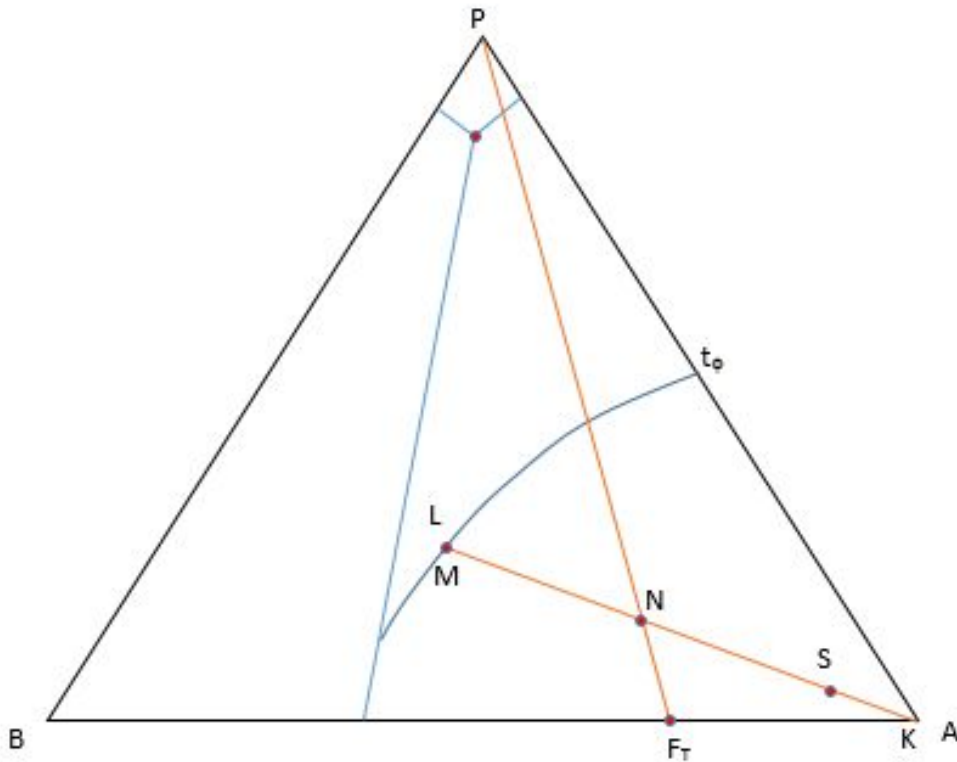
$$F_T c_T t_T + P c_P t_P + Q_H = K c_K t_L + M c_M t_\phi + (F_T - K) r_p$$

$$Q_H = F_T(r_p - c_T t_T) - K(r_p - c_K t_L) + M c_M t_\phi - P c_P t_P$$

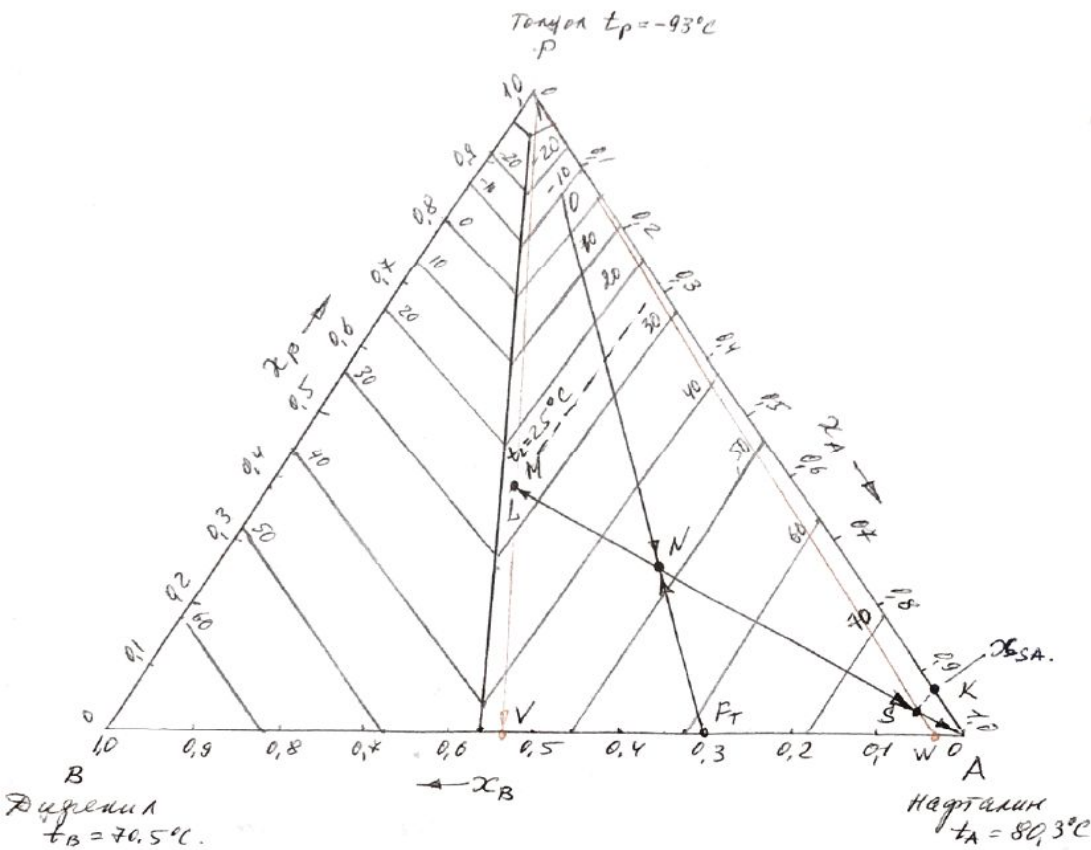
Тепловой баланс без нагрева.

$$F_T c_T t_T + P c_P t_P = K c_K t_L + M c_M t_\phi + (F_T - K) r_p$$

$$t_L = \frac{K r_p + P c_P t_P - F_T(r_p - c_T t_T)}{K c_K + M c_M}$$



ЗАДАЧА 2.



Нафталин: $r_{p,H} = 154 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $c_{T,H} = 1,47 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{гр}}$

$c_{Ж,H} = 1,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{гр}}$

Дифенил: $r_{p,D} = 120 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $c_{T,D} = 1,29 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{гр}}$

$c_{Ж,D} = 1,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{гр}}$

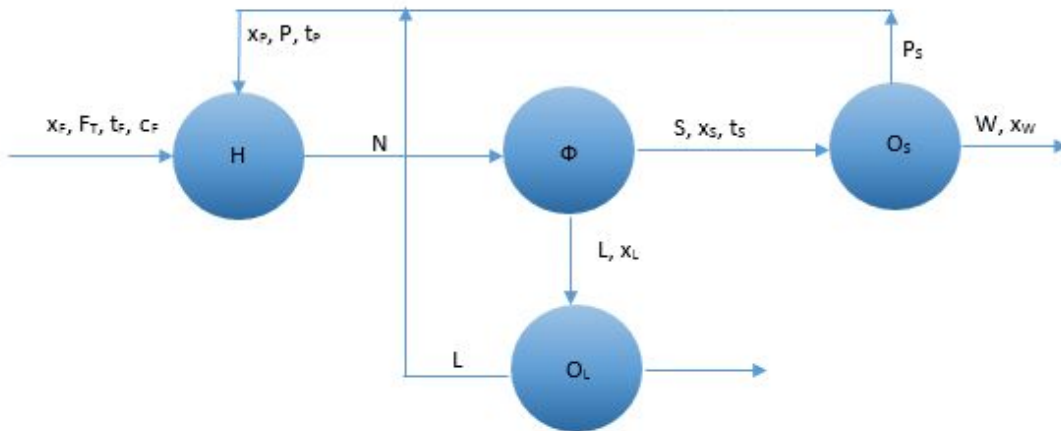
Толуол: $c_{Ж,T} = 1,63 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{гр}}$

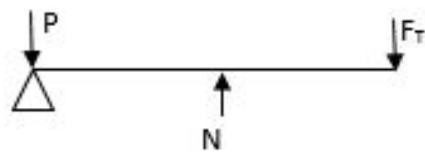
$F_T = \frac{2000}{3600} = 0,556 \text{ кг/с}$

$P = \frac{700}{3600} = 0,194 \text{ кг/с}$

$N = F_T + P = S + L$

$N = 0,556 + 0,194 = 0,750 \text{ кг/с}$



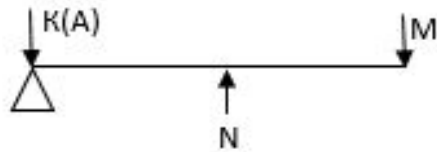


$$F_T \overline{PF_T} = N \overline{NP}$$

$$\overline{NP} = \overline{PF_T} \frac{F_T}{N} = 135 \frac{0,556}{0,75} = 100 \text{ мм}$$

$$\overline{PF_T} = 135 \text{ мм}$$

Определим К и М используя правило рычага.



$$M = N \frac{\overline{AN}}{\overline{AM}}$$

$$\overline{AN} = 63 \text{ мм}$$

$$\overline{AM} = 93 \text{ мм}$$

$$M = 0,75 \frac{63}{93} = 0,508 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

$$K = N - M = 0,75 - 0,508 = 0,242 \text{ кг/с}$$

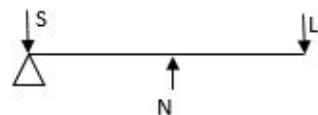
По диаграмме находим состав жидкой фазы (маточника).

$$x_{LA} = 28,5\% \text{ Н}, x_{LB} = 33,5\% \text{ Д}, x_{LA} = 38\% \text{ Т.}$$

Определим состав твердой фазы (положение точки S).

$$A = \frac{x_{KA} - x_{SA}}{x_{SA} - x_{LA}} \rightarrow x_{SA} = \frac{x_{KA} + Ax_{LA}}{1 + A} = \frac{1 + 0,1 \cdot 0,285}{1 + 0,1} = 0,935 = 93,5\% \text{ Н}$$

Определим выход L и S используя правило рычага.



$$L = (F_T + P) \frac{\overline{SN}}{\overline{SL}}$$

$$\overline{SN} = 54 \text{ мм}; \overline{SL} = 84 \text{ мм.}$$

$$L = 0,75 \frac{54}{84} = 0,482 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$S = N - L = 0,75 - 0,482 = 0,268 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$\eta_{\text{из}} = \frac{Sx_S}{F_T x_F} = \frac{0,268 \cdot 0,935}{0,556 \cdot 0,7} = 0,644 = 64,4\%$$

$$x_{WA} = 97\% H, x_{WB} = 3\% D, W = S \frac{\overline{SP}}{\overline{SW}}$$

$$x_{VA} = 46\% H, x_{VB} = 54\% D, V = L \frac{\overline{LP}}{\overline{VP}}$$

$$Q_H = F_T(r_P - c_F t_F) - K(r_P - c_K t_L) + M c_M t_L - P c_P t_P$$

$$c_F = c_{T,H} x_F + c_{T,D} (1 - x_F) = 1,47 \cdot 0,7 + 1,29(1 - 0,7) = 1,416 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

$$c_K = c_{T,H} = 1,47 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

$$c_M = c_{Ж,H} x_{L,H} + c_{Ж,D} x_{L,D} + c_{Ж,T} x_{L,T}$$

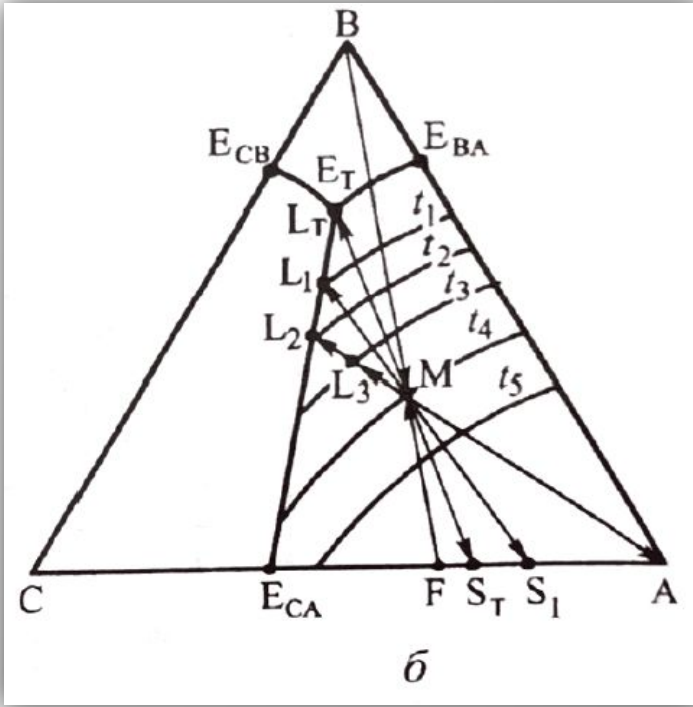
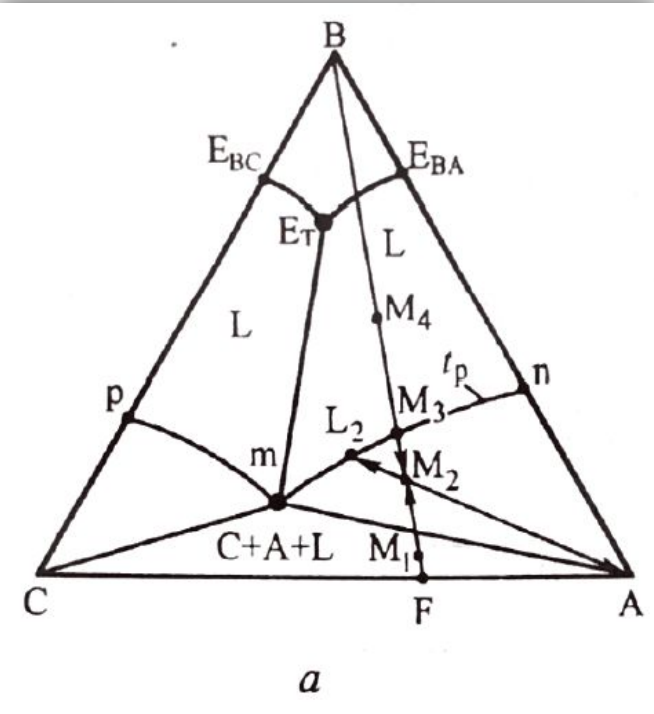
$$= 1,47 \cdot 0,285 + 1,76 \cdot 0,335 + 1,63 \cdot 0,38 = 1,71 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

$$c_P = c_{Ж,T} = 1,63 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$$

$$r_P = r_{P,H} x_F + r_{P,D} (1 - x_F) = 154 \cdot 0,7 + 121(1 - 0,7) = 144,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$Q_H = 0,544(144,1 - 1,416 \cdot 20) - 0,242(144,1 - 1,47 \cdot 25) + 0,508 \cdot 1,71 \cdot 25 - 0,194 \cdot 1,63 \cdot 10 = 56,8 \text{ кВт.}$$

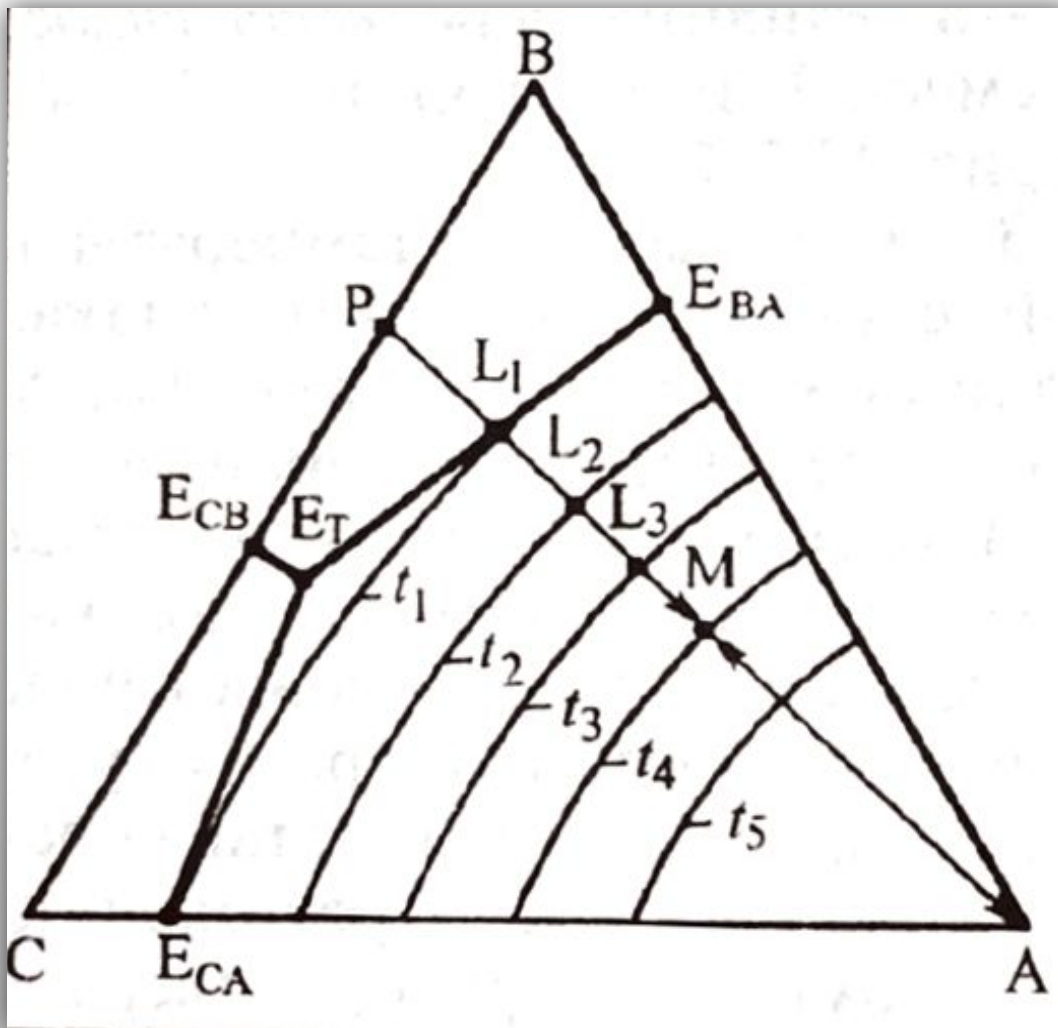
ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ В ДИАГРАММЕ РАВНОВЕСИЯ ФАЗ



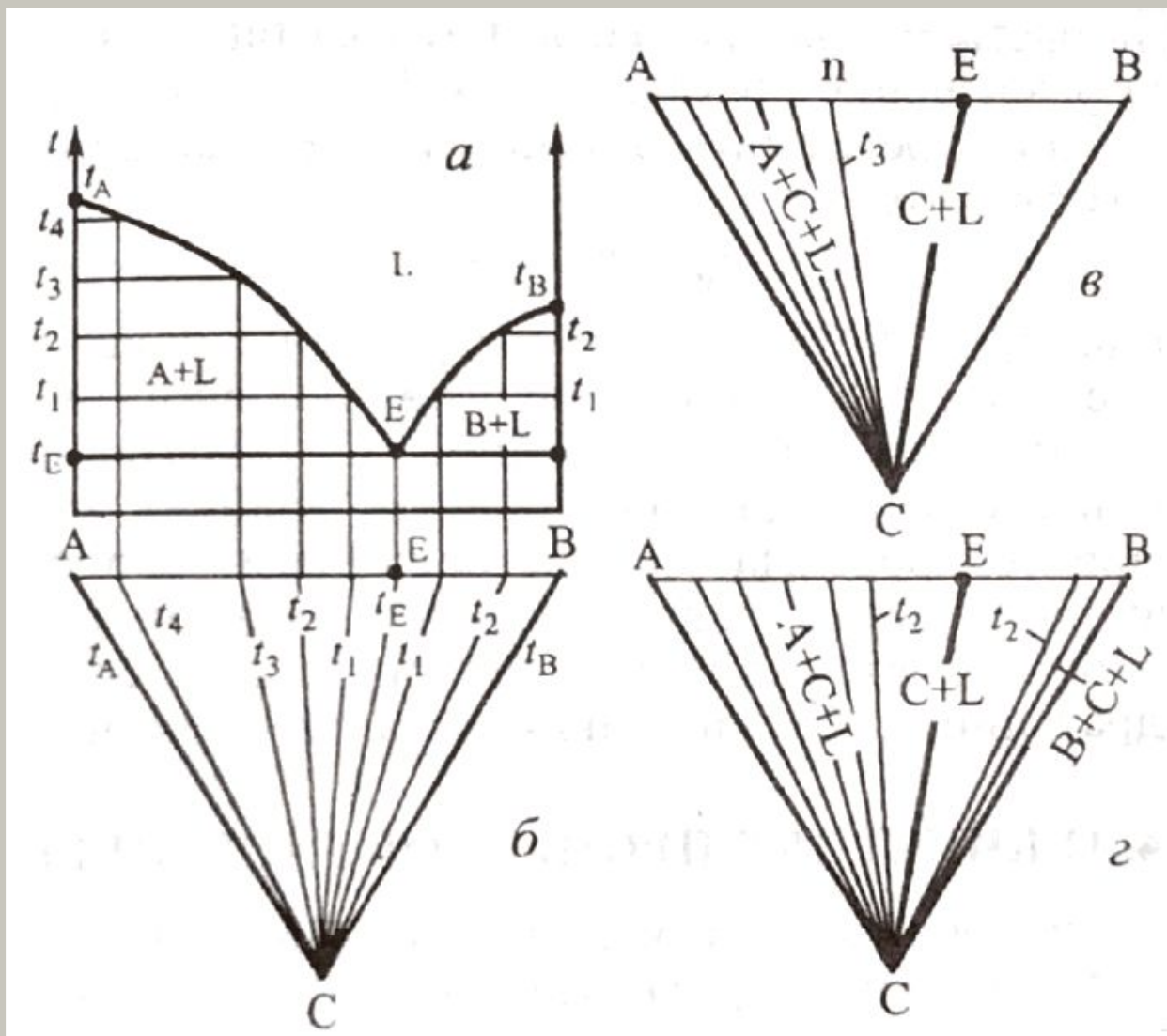
- А — ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ПОТОКОВ РАСТВОРИТЕЛЯ И РАСТВОРЯЕМОЙ СМЕСИ,
- Б — ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСТВОРЕНИЯ.

$$\frac{L_2}{K_A} = \frac{\overline{M_2A}}{\overline{L_2M_2}}$$

РАСТВОРЕНИЕ ВЕЩЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ



РАВНОВЕСИЕ В ТРОЙНОЙ СИСТЕМЕ С ИНЕРТНЫМ КОМПОНЕНТОМ



КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ

ПРОЦЕСС ПРОСТОГО РАСТВОРЕНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОТСУТСТВИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ СТАДИИ:

1. ПОДВОД РАСТВОРИТЕЛЯ К ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ;
2. ПЕРЕХОД ВЕЩЕСТВА ИЗ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В РАСТВОРЕННОЕ СОСТОЯНИЕ (ПРОТЕКАЕТ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ);
3. ДИФфуЗИОННЫЙ ПЕРЕНОС РАСТВОРЕННОГО КОМПОНЕНТА (ВЕЩЕСТВА) ОТ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ В ОСНОВНУЮ МАССУ РАСТВОРА.

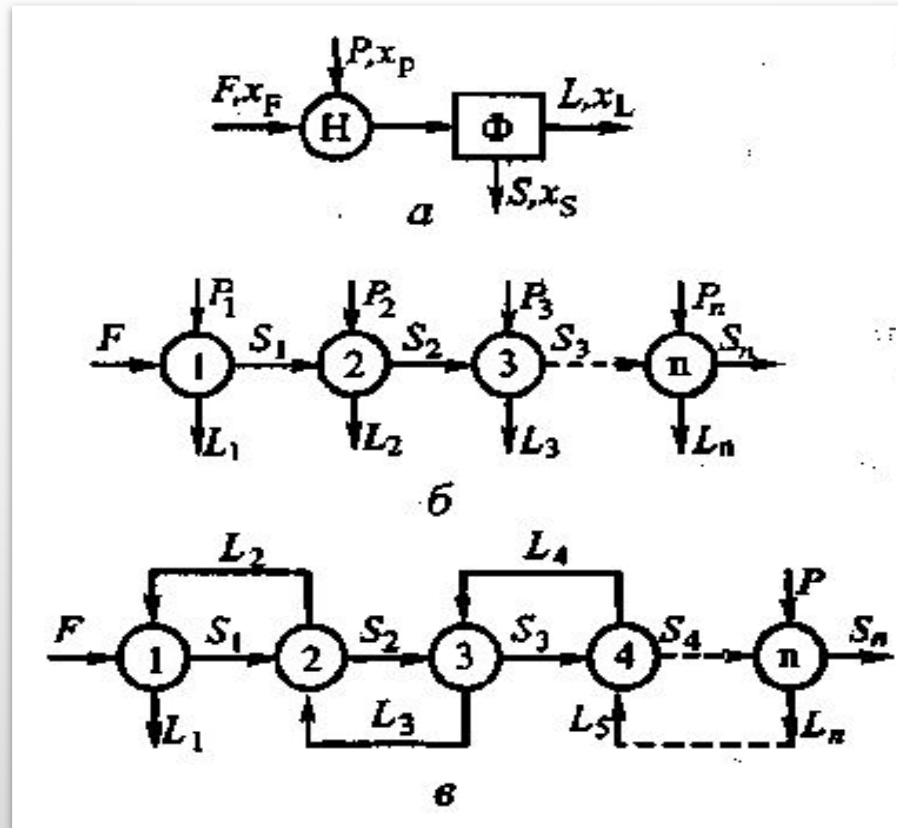
ПРОЦЕСС ФРАКЦИОННОГО РАСТВОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ, ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ СЛЕДУЮЩИЕ СТАДИИ:

1. ПОДВОД РАСТВОРИТЕЛЯ К ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗ;
2. ПРОНИКНОВЕНИЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ПОРЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА (ЧАСТИЦ);
3. РАСТВОРЕНИЕ ИЗВЛЕКАЕМОГО КОМПОНЕНТА, ИЛИ ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С НИМ;
4. ДИФфуЗИЯ РАСТВОРЕННОГО КОМПОНЕНТА В ПОРАХ ТВЕРДОГО ТЕЛА К ЕГО ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ;
5. ПЕРЕХОД РАСТВОРЕННОГО ВЕЩЕСТВА ИЛИ ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ОСНОВНУЮ МАССУ (В ЯДРО) ЖИДКОЙ

СПОСОБЫ И СХЕМЫ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ



ЧАСТИЧНОЕ РАСТВОРЕНИЕ



СХЕМЫ ПОТОКОВ ПРИ ОДНОКРАТНОМ (А), ПОРЦИОННОМ (Б) И ПРОТИВОТОЧНОМ (В) ЧАСТИЧНОМ РАСТВОРЕНИИ.

The background features a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered in the corners. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!