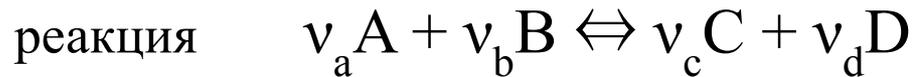


Химическое равновесие

Термодинамические параметры: T ; P ; v_i ; $C_i - \text{const}$

1. Термодинамическое условие равновесия - $\Delta_r G = 0$

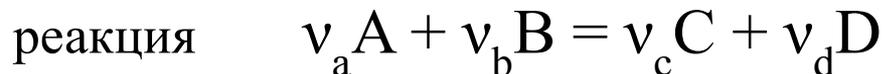
2. Кинетическое условие равновесия - $\overset{\vee}{V} = \overset{\vee}{V}$



$$\overset{\vee}{V} = \overset{\vee}{k} \cdot C_A^{v_a} \cdot C_B^{v_b} \qquad \overset{\vee}{V} = \overset{\vee}{k} \cdot C_C^{v_c} \cdot C_D^{v_d}$$
$$\overset{\vee}{k} \cdot C_A^{v_a} \cdot C_B^{v_b} = \overset{\vee}{k} \cdot C_C^{v_c} \cdot C_D^{v_d}$$

$$K = \frac{\overset{\vee}{k}}{\overset{\vee}{k}} = \frac{(C_C)_p^{v_c} \cdot (C_D)_p^{v_d}}{(C_A)_p^{v_a} \cdot (C_B)_p^{v_b}} \quad \begin{array}{l} \text{Константа равновесия}[f(T)] \\ \text{(кинетические условия)} \end{array}$$

Энергия Гиббса реакции в нестандартных условиях



$$\Delta_r G^0 = (v_c \cdot \Delta_f G^0_C + v_d \cdot \Delta_f G^0_D) - (v_a \cdot \Delta_f G^0_A + v_b \cdot \Delta_f G^0_B) \quad C^0 = 1 \text{ моль/л}$$

$$C \neq C^0 \quad \Delta_r G_i = \Delta_r G^0_i + R \cdot T \cdot \ln C_i$$

$$C_i \equiv X_i \equiv \frac{p_i}{p^0} \equiv \frac{C_i}{C^0} \quad - \quad \text{безразмерная концентрация}$$

$$X_i = \frac{\nu_i}{\sum \nu_i} \quad - \quad \text{мольная доля;} \quad C_i - [\text{моль/л}]$$

$$\frac{p_i}{p^0} \quad - \quad \text{относительное парциальное давление [атм], } p^0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta_r G = (v_c \cdot \Delta_f G^0_C + v_d \cdot \Delta_f G^0_D) - (v_a \cdot \Delta_f G^0_A + v_b \cdot \Delta_f G^0_B) + R \cdot T \cdot (v_c \cdot \ln C_C + v_d \cdot \ln C_D - v_a \cdot \ln C_A - v_b \cdot \ln C_B)$$

$$\Delta_r G = \Delta_r G^0 + R \cdot T \cdot \ln \frac{C_C^{v_c} \cdot C_D^{v_d}}{C_A^{v_a} \cdot C_B^{v_b}}$$

4.7 Равновесие – термодинамические условия ($\Delta_r G = 0$)

$$\Delta_r G = \Delta_r G^0 + R \cdot T \cdot \ln \frac{(C_C)_p^{v_c} \cdot (C_D)_p^{v_d}}{(C_A)_p^{v_a} \cdot (C_B)_p^{v_b}} = 0$$

$$K^0 = \frac{(C_C)_p^{v_c} \cdot (C_D)_p^{v_d}}{(C_A)_p^{v_a} \cdot (C_B)_p^{v_b}}$$

**Стандартная(термодинамическая)
константа равновесия хим.реакции**

$$\Delta_r G^0_T + R \cdot T \cdot \ln K^0 = 0 \quad \longrightarrow \quad \ln K^0 = -\frac{\Delta_r G^0_T}{R \cdot T} \quad \longrightarrow \quad K^0 = e^{-\frac{\Delta_r G^0_T}{R \cdot T}}$$

$$\Delta_r G^0_T = \Delta_r H^0_T - T \cdot \Delta_r S^0_T \quad \longrightarrow \quad \ln K^0 = -\frac{\Delta_r H^0_T}{R \cdot T} + \frac{\Delta_r S^0_T}{R}$$

Константа равновесия K , её размерность. Связь между K (кинетич.) и стандартной K^0 (термодинам.)

$$K = \frac{(C_C)_p^{v_c} \cdot (C_D)_p^{v_d}}{(C_A)_p^{v_a} \cdot (C_B)_p^{v_b}}$$

$K \equiv K_x$ - концентрации задаются мольными долями [безразмерная величина]

$K \equiv K_p$ - концентрации задаются парциальными давлениями - $[(\text{Па})^{\Delta v}]$

$$\Delta v = (v_c + v_d) - (v_a + v_b)$$

$K \equiv K_c$ - концентрации задаются молярной концентрацией - $[(\text{моль/л})^{\Delta v}]$

$$K_x = K^0 \cdot \left(\frac{p}{p^0}\right)^{-\Delta v} \quad K_p = K^0 \cdot (p^0)^{\Delta v} \quad K_c = K^0 \cdot \left(\frac{R \cdot T}{p^0}\right)^{-\Delta v}$$

$p/p^0 = \tilde{p}$ физ.атм., относит.давл. $p^0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па
стандарт.давление

Сдвиг равновесия

$$K^0 = \frac{(C_C)_p^{v_c} \cdot (C_D)_p^{v_d}}{(C_A)_p^{v_a} \cdot (C_B)_p^{v_b}}$$

Изобара реакции P-const

$$\ln K^0 = -\frac{\Delta_r H^0_T}{R \cdot T} + \frac{\Delta_r S^0_T}{R} \quad \longrightarrow \quad \frac{d \ln K^0}{dT} = \frac{\Delta_r H^0}{R \cdot T^2}$$

$\Delta_r H^0 < 0$ (экзотерм. реакция) – $K^0(T)$ убывающая функция ($\uparrow T, K^0 \downarrow$)

$\Delta_r H^0 > 0$ (эндотерм. реакция) – $K^0(T)$ возрастающая функция ($\uparrow T, K^0 \uparrow$)

Изотерма реакции T-const

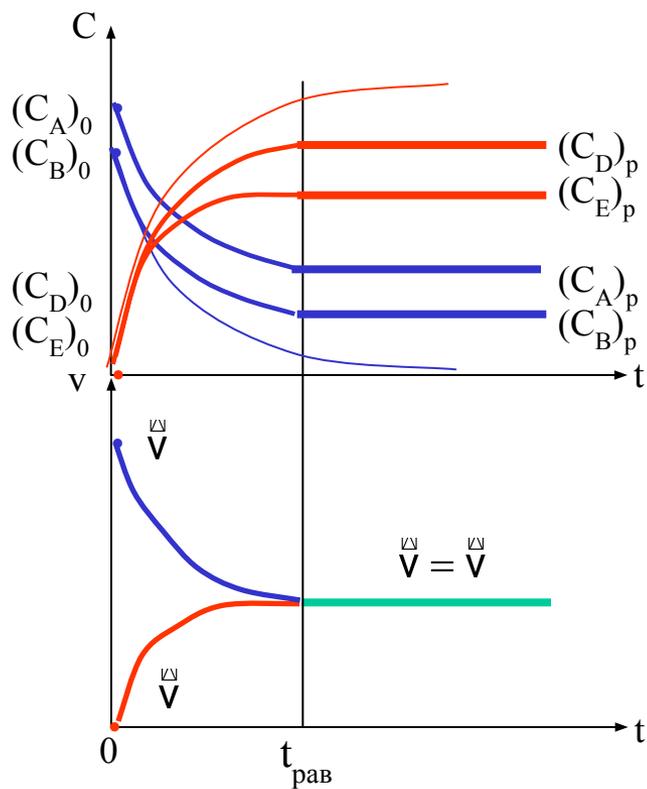
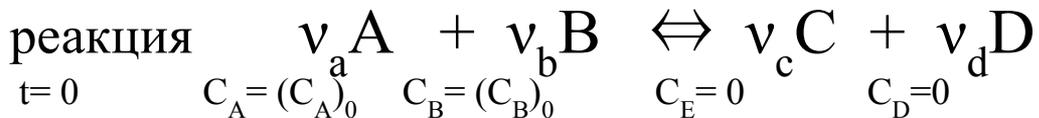
$$\Delta_r G = \Delta_r G^0 + R \cdot T \cdot \ln \frac{C_C^{v_c} \cdot C_D^{v_d}}{C_A^{v_a} \cdot C_B^{v_b}} \neq 0$$

$$\Delta_r G^0_T = -R \cdot T \cdot \ln K^0$$

$$\Delta_r G = R \cdot T \cdot \left(\ln \frac{C_C^{v_c} \cdot C_D^{v_d}}{C_A^{v_a} \cdot C_B^{v_b}} - \ln K^0 \right)$$

$$\begin{aligned} \Delta_r G < 0 & \longrightarrow \\ \Delta_r G > 0 & \longleftarrow \\ \Delta_r G = 0 & \end{aligned}$$

Динамическое равновесие



Расчет равновесного состава (концентраций) газовой смеси

1. Расчет $K^0(T)$ Для определенной T рассчитывают \rightarrow
 $\Delta_r G^0(T) = \Delta_r H^0(T) - T \cdot \Delta_r S^0(T)$. Затем \rightarrow

$$K^0(T) = e^{-\frac{\Delta G^0(T)}{R \cdot T}}$$

2. Расчет K_X или K_p

$K_X \rightarrow X_i$ при $P = \text{const}$
($p^0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па-стандартн.давление)

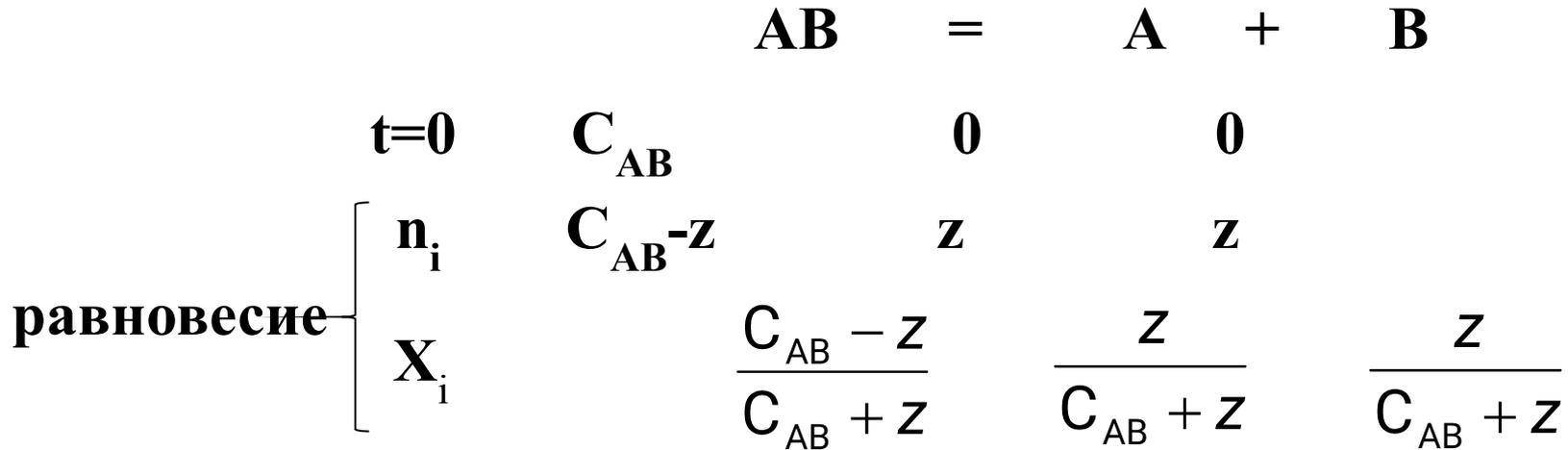
$K_p \rightarrow p_i$ - при $V = \text{const}$

$$K_X(T, p) = K^0(T) \cdot \left(\frac{p}{p^0}\right)^{-\Delta \nu}$$

$$K_p(T) = K^0(T) \cdot (p^0)^{\Delta \nu}$$

Пример.

Диссоциация АВ при Р -const и температуре Т



$$X_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad \sum n_i = (C_{AB} - z) + (z) + (z) = C_{AB} + z$$

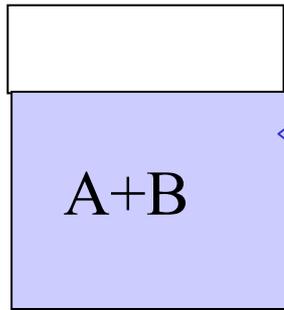
$$K_X = \frac{z \cdot z \cdot (C_{AB} + z)}{(C_{AB} + z) \cdot (C_{AB} + z) \cdot (C_{AB} - z)} = \frac{z^2}{C_{AB}^2 - z^2}$$

$$K_X \cdot C_{AB}^2 - K_X \cdot z^2 = z^2$$

$$z = \sqrt{\frac{K_X \cdot C_{AB}^2}{K_X + 1}}$$

Равновесие в растворах(дисперсных системах)

Раствор - гомогенная однофазная многокомпонентная система, образованная двумя или более веществами. По агрегатному состоянию - газовые, жидкие и твёрдые растворы. Основн. способ получения жидк.р-ров - растворение



A - растворенное вещество-твёрдое, жидкое, газ
(дисперсная фаза)

B - растворитель (дисперсионная среда)

A+B - раствор (дисперсная система)

Концентрация раствора – важная характеристика раствора
(относительное соотношение количеств растворенного вещества и растворителя)

• **массовая доля** $\omega\% = \frac{m_A}{m_{A+B}} \cdot 100\%$ • **мольная доля** $X\% = \frac{V_A}{V_A + V_B} \cdot 100\%$

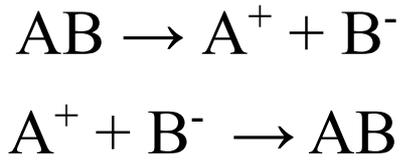
• **молярная концентрация** $C_M = \frac{V_A}{V_{A+B}} \left[\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} \right]$

• **нормальная концентр.**

• **моляльная концентрация** $C_m = \frac{V_A}{m_B} \left[\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{КГ}} \right]$

• **массовая конц. (г/л), процент.конц.**

Электродиссоциация



C_0 - общая концентрация
 C_D - конц.молекул в виде ионов

$C_D = [A^+] = [B^-] = \alpha C_0$

$[AB] = C_0 - \alpha C_0$

Степень диссоциации - $\alpha = \frac{C_D}{C_0}$

$\alpha > 50\%$, $< 5\%$, $5 < \alpha < 50\%$

Сильные, слабые, средней силы электролиты

Константа диссоциации (равновесия) - $K_D = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]}$

Вместо $[A_i] = a_i = \gamma_i C_i$,

где a_i - активность, γ_i - коэфф. активности

$$K_D = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]} = \frac{\alpha \cdot C_0 \cdot \alpha \cdot C_0}{C_0 - \alpha \cdot C_0} = \frac{\alpha^2 \cdot C_0}{1 - \alpha}$$

$\alpha \rightarrow 1 \quad K_D \rightarrow \infty$

$\alpha \rightarrow 0 \quad K_D = \alpha^2 C_0 \quad \alpha = \sqrt{\frac{K_D}{C_0}}$

Ионное произведение воды



$$K_{\text{д}} = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]}$$

$\alpha \rightarrow 0$ $[\text{H}_2\text{O}]$ -const

$$[\text{H}_2\text{O}] = 1000/18 \text{ [моль/л]} \quad [(\text{моль/л})^2]$$

$$K_{\text{д}} = 1.8 \cdot 10^{-16}$$

$$K_{\text{w}} = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 1.0 \cdot 10^{-14}$$

K_{w} - ионное произведение воды

Нейтральная среда $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7} \text{ [моль/л]}$

Кислая среда $[\text{H}^+] > 10^{-7} (10^{-6,-5,-4} \dots)$; $[\text{OH}^-] < 10^{-7} (10^{-8,-9,-10} \dots)$
[моль/л]

Щелочная среда $[\text{H}^+] < 10^{-7}$ $[\text{OH}^-] > 10^{-7} \text{ [моль/л]}$

Водородный показатель

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$$

Нейтральная среда $\text{pH} = 7$

Кислая среда $\text{pH} < 7$

Щелочная среда $\text{pH} > 7$

$$\text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-]$$

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

Растворы кислот и оснований



$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{An}^-]}{[\text{HAn}]}$$



$$K_b = \frac{[\text{Me}^+][\text{OH}^-]}{[\text{MeOH}]}$$

Слабые электролиты $\alpha \rightarrow 0$

$$K_a = \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{HAn}]}$$

$$[\text{H}^+] \approx \sqrt{K_a \cdot C_{\text{кисл}}}$$

$$K_b = \frac{[\text{OH}^-]^2}{[\text{MeOH}]}$$

$$[\text{OH}^-] \approx \sqrt{K_b \cdot C_{\text{осн}}}$$

$$\text{pH} \approx -\lg[\sqrt{K_a \cdot C_{\text{кисл}}}]$$

$$\text{pH} \approx 14 + \lg[\sqrt{K_b \cdot C_{\text{осн}}}]$$

Сильные электролиты $\alpha \rightarrow 1$

$$\text{pH} = -\lg[\alpha \cdot C_{\text{кисл}}]$$

$$\text{pH} = 14 + \lg[\alpha \cdot C_{\text{осн}}]$$

Многоосновные кислоты и основания



$$K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HAn}^-]}{[\text{H}_2\text{An}]}$$



$$K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{An}^{2-}]}{[\text{HAn}^-]}$$

$$K_{a1} \gg K_{a2}$$



$$K_{b1} = \frac{[\text{MeOH}^+][\text{OH}^-]}{[\text{Me}(\text{OH})_2]}$$



$$K_{b2} = \frac{[\text{Me}^{2+}][\text{OH}^-]}{[\text{MeOH}^+]}$$

$$K_{b1} \gg K_{b2}$$

Гидролиз солей

$\alpha \rightarrow 1$



$$K = \frac{1}{K_b}$$

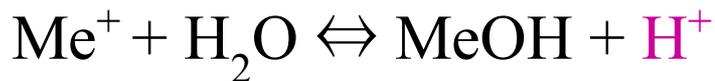


$$K = \frac{1}{K_a}$$



$$K_W = [\text{H}^+][\text{OH}^-]$$

Гидролиз по катиону



$$K_r = \frac{K_W}{K_b} = \frac{[\text{MeOH}] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{Me}^+]} \approx \frac{[\text{H}^+]^2}{C_{\text{соль}}}$$

Гидролиз по аниону

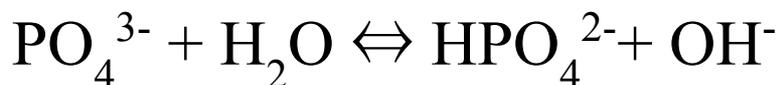


$$K_r = \frac{K_W}{K_a} = \frac{[\text{HAn}] \cdot [\text{OH}^-]}{[\text{An}^-]} \approx \frac{[\text{OH}^-]^2}{C_{\text{соль}}}$$

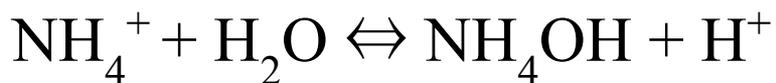
Примеры гидролиза солей



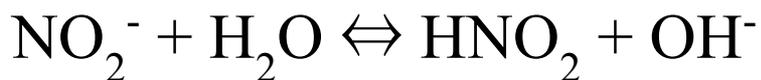
pH < 7



pH > 7

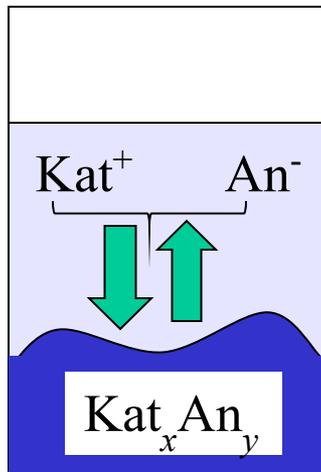


pH ≈ 7

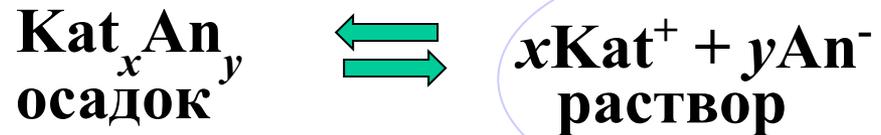


pH = 7

Произведение растворимости - ПР



S [моль/л] - растворимость осадка



$$K = \frac{[\text{Kat}^+]^x \cdot [\text{An}^-]^y}{\text{Kat}_x \text{An}_y}$$

$$\text{ПР} = [\text{Kat}^+]^x \cdot [\text{An}^-]^y$$

S -растворимость осадка [моль/л]

$$[\text{Kat}^+] = x \cdot S \text{ [моль/л]}$$

$$[\text{An}^-] = y \cdot S \text{ [моль/л]}$$

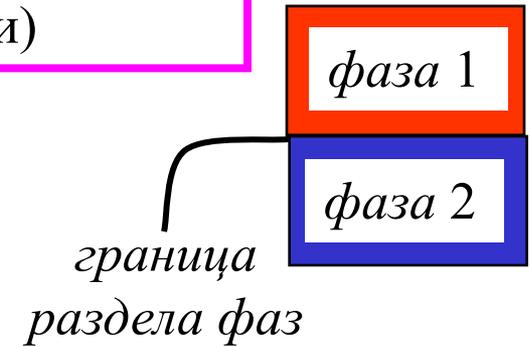
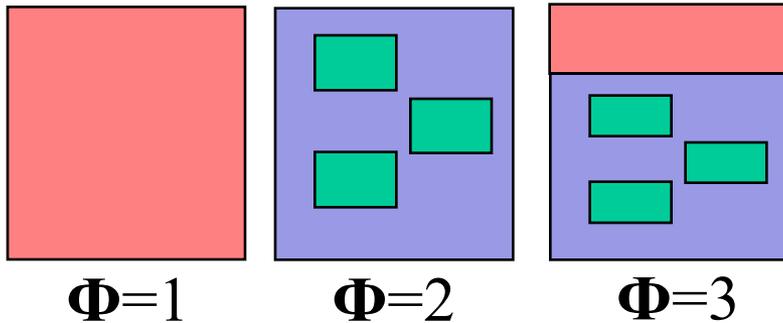
$$S = \sqrt[x+y]{\frac{\text{ПР}}{x^x y^y}}$$

$$\text{ПР} = [x \cdot S]^x \cdot [y \cdot S]^y$$

Фазовые равновесия

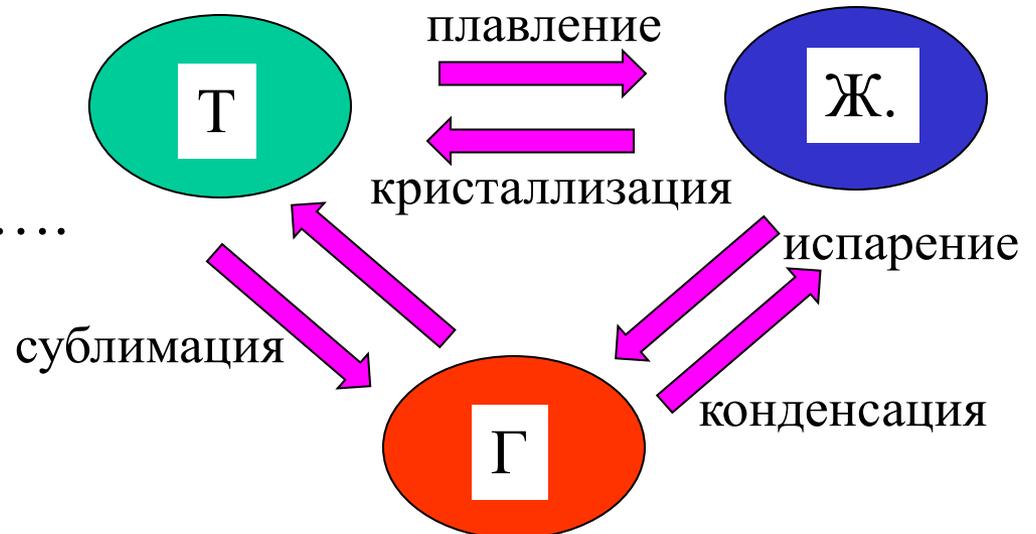
$$\Delta G=0$$

Число фаз в системе – Φ (фаза-совокупность однородных частей системы с одинаковыми физ.и хим.свойствами)



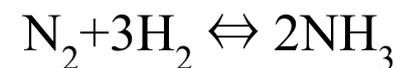
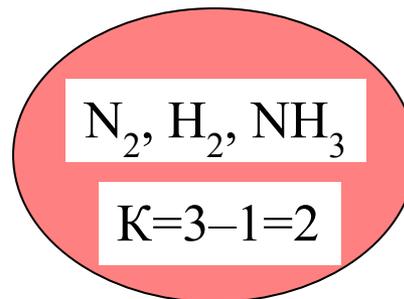
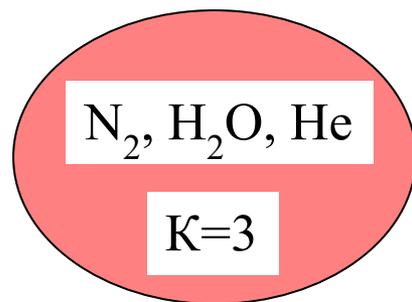
Фазовый переход

скачек: ΔH , ΔS , Δc , ΔV



Число компонентов – К (независимые составные части системы)

Число видов молекул, необходимое и достаточное для образования всех фаз системы, за вычетом числа независимых реакций в системе

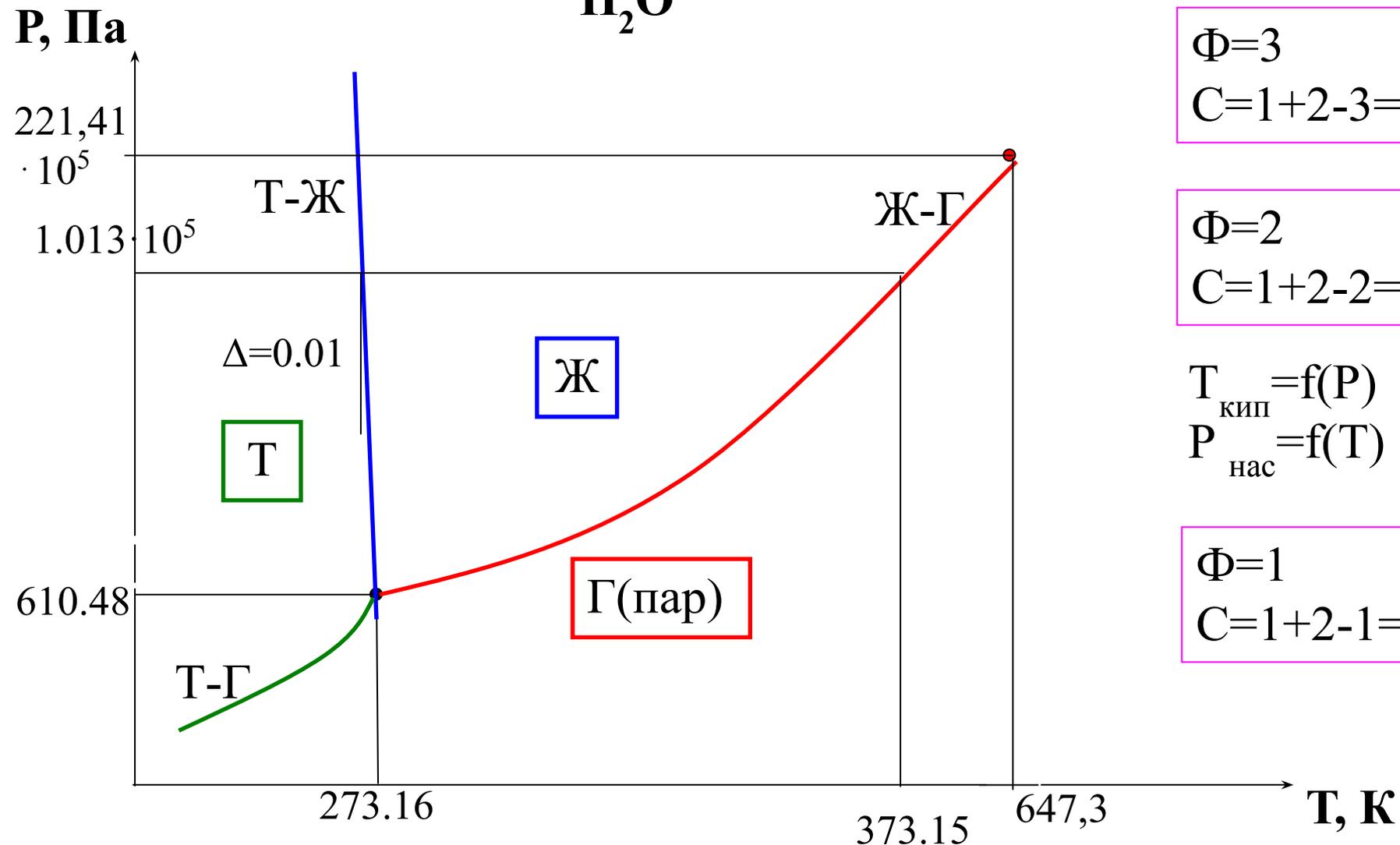


Число термодинамических степеней свободы - С

Число независимых параметров равновесия (p, T, C), которые могут произвольно изменяться (в определенном интервале) и при этом не изменяется число фаз в системе и ее строение

$$\text{Правило фаз Гиббса} - C = K + 2 - \Phi$$

Диаграмма состояния однокомпонентной системы (K=1)



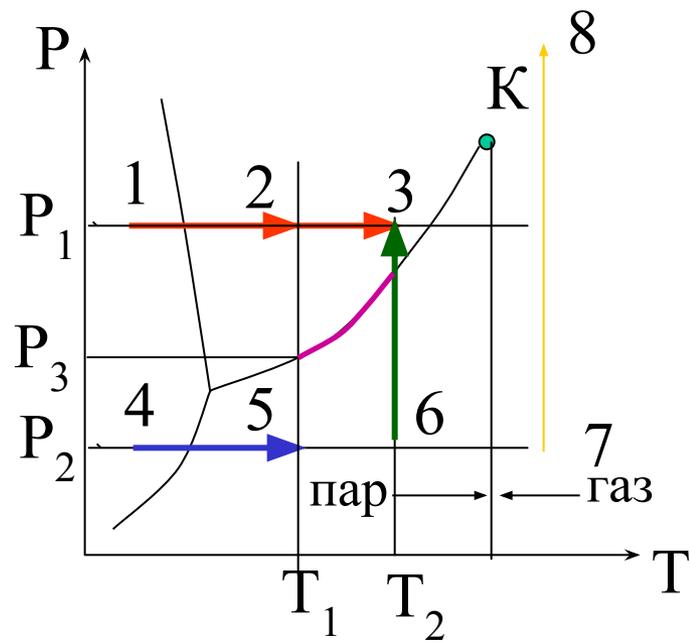
$\Phi=3$
 $C=1+2-3=0$

$\Phi=2$
 $C=1+2-2=1$

$T_{\text{кип}} = f(P)$
 $P_{\text{нас}} = f(T)$

$\Phi=1$
 $C=1+2-1=2$

Примеры процессов.

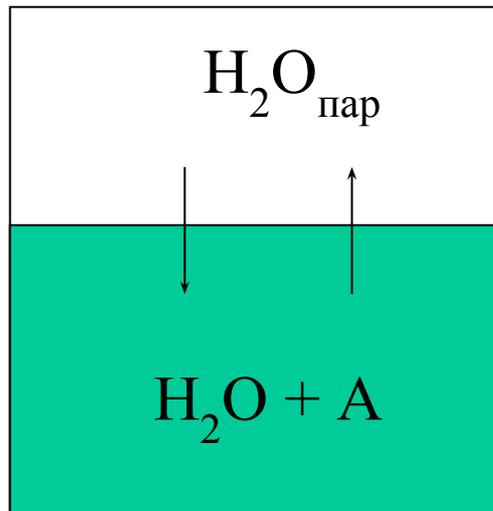


Двухкомпонентная система [K=2(вода+ растворенное вещество A)], молекулярный раствор.

$\alpha \rightarrow 0$

p_0 — давление насыщенного пара ($H_2O_{\text{пар}}$) над растворителем H_2O

p_A — давление ($H_2O_{\text{пар}}$) над раствором (H_2O+A)



$$\frac{\Delta p}{p_0} = X_A$$

Закон

$\frac{p_0 - p_A}{p_0} = \frac{v_A}{v_A + v_p}$

Двухфазное равновесие

1) $T \Leftrightarrow Ж; Ж \Leftrightarrow Г$ $C = 2 + 2 - 2 = 2$

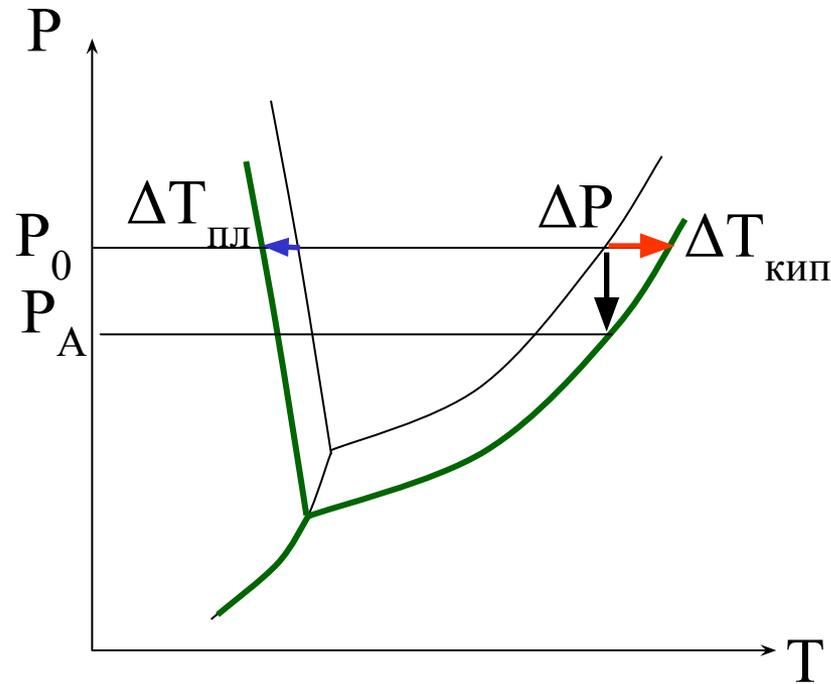
$$T_{\text{пл}} = f(p, C_A)$$

$$T_{\text{кип}} = f(p, C_A)$$

2) $T \Leftrightarrow Г$ $\Phi=3$ $C = 2 + 2 - 3 = 1$

Диаграмма состояния молекулярного раствора ($K=2$)

C_A



Кипение и кристаллизация растворов

- Повышение температуры кипения раствора по сравнению с чистым растворителем ($\Delta T_{\text{кип}}$) прямо пропорционально концентрации растворенного вещества

$$\Delta T_{\text{кип}} =$$

$K_{\text{эб}} \cdot C_{\text{м}}$ [моль/кг] – моляльная концентрация

$K_{\text{эб}}$ [К · кг/моль] – эбуллиоскопическая постоянная растворителя

- Понижение температуры кристаллизации раствора по сравнению с чистым растворителем прямо пропорционально концентрации растворенного вещества

$$\Delta T_{\text{кр}} = K_{\text{кр}} \cdot C_{\text{м}}$$

$K_{\text{кр}}$ [К · кг/моль] – криоскопическая постоянная растворителя

$$K_{\text{эб}} = \frac{R \cdot (T_{\text{кип}})^2 \cdot M}{1000 \cdot \Delta_{\text{v}} H}$$

$$\frac{\Delta_{\text{v}} H}{\Delta_{\text{m}} H} - [\text{Дж} / \text{кг}]$$

$$K_{\text{кр}} = \frac{R \cdot (T_{\text{кр}})^2 \cdot M}{1000 \cdot \Delta_{\text{m}} H}$$

Эбуллиоскопические и криоскопические постоянные некоторых растворителей

Растворитель	$T_{\text{кип}}$ °C	$K_{\text{эб}}$ К·кг/моль	$T_{\text{кр}}$ °C	$K_{\text{кр}}$ К·кг/моль
Вода H_2O	100	0,51	0	1,86
Ацетон $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	56,3	1,71	-95	2,40
Бензол C_6H_6	80,1	2,53	5,53	5,12
Четыреххлористый углерод CCl_4	76,7	4,95	-23	30

Изотонический коэффициент – i (растворы электролитов)

- показывает увеличение числа частиц в растворе электролита по сравнению с раствором не электролита той же концентрации (изменение коллигативных свойств)



N_0 - число молекул растворенного вещества; $\alpha N_0 (x + y) + (N_0 - \alpha N_0)$ - суммарное число частиц (ионов и недиссоциированных молекул)

α - степень диссоциации

$$m = x + y$$

$$i = \frac{\alpha \cdot N_0 \cdot (x + y) + (N_0 - \alpha \cdot N_0)}{N_0} = \alpha \cdot m + 1 - \alpha = \alpha \cdot (m - 1) + 1$$

$$\alpha \rightarrow 1$$

$$i = m$$

$$\Delta T_{\text{кип}} = i \cdot K_{\text{эб}} \cdot C_{\text{м}}$$

$$\Delta T_{\text{кр}} = i \cdot K_{\text{кр}} \cdot C_{\text{м}}$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = i \cdot X_A$$