Równowaga chemiczna

Stała równowagi

stała równowagi ★ $$K_c = \frac{[\mathrm{C}]^c[\mathrm{D}]^d}{[\mathrm{A}]^a[\mathrm{B}]^b}$$

Układ w równowadze reaguje na zmianę warunków tak, żeby osłabić jej skutek. Dodanie substratu w fazie gazowej lub roztworze może przesunąć równowagę ku produktom; dosypanie istniejącej czystej fazy stałej nie zmienia jej aktywności i nie przesuwa równowagi. Ogrzanie sprzyja kierunkowi endotermicznemu. Sprężanie układu gazowego przy stałej temperaturze sprzyja stronie z mniejszą liczbą moli gazu, o ile liczby te są różne. Dodanie gazu obojętnego przy stałej objętości nie przesuwa równowagi. Katalizator przyspiesza ustalanie się równowagi, nie zmieniając jej położenia ani stałej równowagi. Zapis stężeniowy dotyczy równowagi aA + bB ⇌ cC + dD. Czystych ciał stałych i czystych cieczy nie wpisuj do ilorazu; ich aktywności wynoszą 1.

Równowagi fazowe

reguła faz Gibbsa $$f = s - \varphi + 2$$

Ogólna reguła uwzględnia temperaturę i ciśnienie jako dwie zmienne intensywne; składniki są niezależne, a fazy w równowadze. Ustalenie jednej z tych zmiennych wymaga odjęcia jednego stopnia swobody; przy dodatkowych więzach nie stosuj bezpośrednio postaci +2. f to liczba stopni swobody, s to liczba niezależnych składników, φ to liczba faz.

Równowagi fazowe i roztwory

siła jonowa roztworu $$I = \frac{1}{2}\sum_i c_i z_i^2$$

Sumujemy po wszystkich jonach; c_i w spójnych jednostkach stężenia, z_i to liczba ładunkowa.

prawo Raoulta $$p_i = x_i p_i^*$$

Roztwór idealny; x_i ułamek molowy w cieczy, p_i* prężność pary czystego składnika w tej temperaturze.

ciśnienie osmotyczne $$\pi = icRT$$

Rozcieńczony roztwór idealny; c w mol/m³ przy R w J/(mol·K); i współczynnik van 't Hoffa.

obniżenie temperatury krzepnięcia $$\Delta T_f = iK_f b$$

Rozcieńczony roztwór; ΔT_f dodatnie obniżenie, b molalność.

podwyższenie temperatury wrzenia $$\Delta T_b = iK_b b$$

Rozcieńczony roztwór nielotnej substancji; b molalność.

związek Kp i Kc $$K_p = K_c(RT)^{\Delta n}$$

Konwencja stałych opartych na ciśnieniach i stężeniach dla gazów doskonałych; Δn to suma współczynników gazowych produktów minus substratów. Dla bezwymiarowych stałych uwzględnij standardy. W kalkulatorze użyj T w kelwinach, stężeń w mol/m³, ciśnień w paskalach i R w Pa·m³/(mol·K). Jednostki K_p i K_c zależą od Δn; nie mieszaj tej konwencji ze stałymi bezwymiarowymi. Przy Δn = 0 jest Kp = Kc w każdej temperaturze, więc T nie da się z tego wzoru wyznaczyć; analogicznie przy RT = 1 nie da się wyznaczyć Δn.

równanie van 't Hoffa $$\ln\frac{K_2}{K_1} = -\frac{\Delta H^\circ}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Standardowa entalpia reakcji w przybliżeniu stała w przedziale temperatur; temperatury w kelwinach. K_1 i K_2 to bezwymiarowe termodynamiczne stałe równowagi. ΔH° podaj w J/mol, a R w J/(mol·K), np. 8,314 J/(mol·K). Entalpię w kJ/mol przelicz na J/mol: 1 kJ = 1000 J.

równanie Clausiusa–Clapeyrona $$\ln\frac{p_2}{p_1} = -\frac{\Delta H_{\mathrm{vap}}}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Para idealna, pomijalna objętość cieczy; entalpia parowania przybliżona jako stała. Temperatury T_1 i T_2 są ściśle dodatnie w kelwinach; oba ciśnienia i stała gazowa są dodatnie. p_1 i p_2 to prężności pary nasyconej w równowadze z cieczą, odpowiednio w temperaturach T_1 i T_2.

potencjał chemiczny i aktywność $$\mu_i = \mu_i^\circ + RT\ln a_i$$

Aktywność bezwymiarowa względem określonego stanu standardowego; a_i > 0.

izoterma Langmuira $$\theta = \frac{Kc}{1 + Kc}$$

Jednorodne miejsca adsorpcji, monowarstwa, brak oddziaływań bocznych; Kc bezwymiarowe. θ to ułamek zajętych miejsc adsorpcji, c to stężenie równowagowe adsorbatu, K to stała równowagi adsorpcji dla danej temperatury (w jednostce odwrotnej do c).

Stałe dysocjacji kwasów i zasad w 25 °C

rodzaj	wzór	nazwa	etap	K	pK
kwas	HF	kwas fluorowodorowy	1	$6{,}31 \cdot 10^{-4}$	3,20
kwas	HCl	kwas chlorowodorowy	1	10^{7}	-7,0
kwas	HBr	kwas bromowodorowy	1	10^{9}	-9,0
kwas	HI	kwas jodowodorowy	1	10^{10}	-10,0

rodzaj	wzór	nazwa	etap	K	pK
kwas	H_2S	kwas siarkowodorowy	1	$8{,}91 \cdot 10^{-8}$	7,05
kwas	H_2S	kwas siarkowodorowy	2	10^{-19}	19,0
kwas	H_2Se	kwas selenowodorowy	1	$1{,}29 \cdot 10^{-4}$	3,89
kwas	H_2Se	kwas selenowodorowy	2	10^{-11}	11,0
kwas	H_2Te	kwas tellurowodorowy	1 (18 °C)	$2{,}51 \cdot 10^{-3}$	2,6
kwas	H_2Te	kwas tellurowodorowy	2	10^{-11}	11,0
kwas	$HClO$	kwas chlorowy(I)	1	$3{,}98 \cdot 10^{-8}$	7,40
kwas	$HClO_2$	kwas chlorowy(III)	1	$1{,}15 \cdot 10^{-2}$	1,94
kwas	HNO_2	kwas azotowy(III)	1	$5{,}62 \cdot 10^{-4}$	3,25
kwas	H_2SO_3	kwas siarkowy(IV)	1	$1{,}41 \cdot 10^{-2}$	1,85
kwas	H_2SO_3	kwas siarkowy(IV)	2	$6{,}31 \cdot 10^{-8}$	7,2
kwas	H_2SO_4	kwas siarkowy(VI)	2	$1{,}02 \cdot 10^{-2}$	1,99
kwas	H_3BO_3	kwas borowy (20 °C)	1	$5{,}37 \cdot 10^{-10}$	9,27
kwas	H_3AsO_4	kwas ortoarsenowy(V)	1	$5{,}50 \cdot 10^{-3}$	2,26
kwas	H_3AsO_4	kwas ortoarsenowy(V)	2	$1{,}74 \cdot 10^{-7}$	6,76
kwas	H_3AsO_4	kwas ortoarsenowy(V)	3	$5{,}13 \cdot 10^{-12}$	11,29
kwas	H_3PO_4	kwas ortofosforowy(V)	1	$6{,}92 \cdot 10^{-3}$	2,16
kwas	H_3PO_4	kwas ortofosforowy(V)	2	$6{,}17 \cdot 10^{-8}$	7,21
kwas	H_3PO_4	kwas ortofosforowy(V)	3	$4{,}79 \cdot 10^{-13}$	12,32
kwas	H_4SiO_4	kwas ortokrzemowy (30 °C)	1	$1{,}26 \cdot 10^{-10}$	9,9
kwas	H_4SiO_4	kwas ortokrzemowy (30 °C)	2	$1{,}58 \cdot 10^{-12}$	11,8
kwas	H_4SiO_4	kwas ortokrzemowy (30 °C)	3	10^{-12}	12
kwas	H_4SiO_4	kwas ortokrzemowy (30 °C)	4	10^{-12}	12
kwas	H_2CO_3	kwas węglowy	1	$4{,}47 \cdot 10^{-7}$	6,35
kwas	H_2CO_3	kwas węglowy	2	$4{,}68 \cdot 10^{-11}$	10,33
kwas	$H_2C_2O_4$	kwas szczawiowy	1	$5{,}62 \cdot 10^{-2}$	1,25
kwas	$H_2C_2O_4$	kwas szczawiowy	2	$1{,}55 \cdot 10^{-4}$	3,81
kwas	$HCOOH$	kwas mrówkowy	1	$1{,}78 \cdot 10^{-4}$	3,75
kwas	CH_3COOH	kwas octowy	1	$1{,}75 \cdot 10^{-5}$	4,756
kwas	CH_3CH_2COOH	kwas propanowy	1	$1{,}35 \cdot 10^{-5}$	4,87
kwas	C_6H_5COOH	kwas benzoesowy	1	$6{,}25 \cdot 10^{-5}$	4,204

rodzaj	wzór	nazwa	etap	K	pK
kwas	C_6H_5OH	fenol	1	$1{,}02 \cdot 10^{-10}$	9,99
zasada	NH_3	amoniak	1	$1{,}78 \cdot 10^{-5}$	4,75
zasada	CH_3NH_2	metanoamina	1	$4{,}57 \cdot 10^{-4}$	3,34
zasada	$CH_3CH_2NH_2$	etanoamina	1	$4{,}47 \cdot 10^{-4}$	3,35
zasada	$CH_3CH_2CH_2NH_2$	propano-1-amina	1	$3{,}47 \cdot 10^{-4}$	3,46
zasada	$(CH_3)_2NH$	N-metylometanoamina	1	$5{,}37 \cdot 10^{-4}$	3,27
zasada	$(CH_3)_3N$	N,N-dimetylometanoamina	1	$6{,}31 \cdot 10^{-5}$	4,20
zasada	$C_6H_5NH_2$	anilina	1	$7{,}41 \cdot 10^{-10}$	9,13

Stałe dysocjacji kwasów i zasad w 25 °C. Dla kwasów K oznacza K_a, dla zasad K oznacza K_β. W kolumnie pK podano $-\log_{10} K$, odpowiednio pK_a lub pK_β. Stałe dotyczą 25 °C, chyba że w wierszu podano inną temperaturę. Dla pierwszego etapu kwasu węglowego pKa = 6,35 jest wartością pozorną dla układu $CO_2(aq) + H_2CO_3$, stosowaną w zadaniach szkolnych; nie dotyczy wyłącznie cząsteczek H_2CO_3.

Tablica rozpuszczalności soli i wodorotlenków w wodzie: aniony, część 1

kation	Cl^-	Br^-	I^-	NO_3^-	CH_3COO^-	S^{2-}
Ag^+	T	T	T	R (234)	S (1,0) 20 °C	T
Al^{3+}	R (45,1)	R → d	R → d	R (68,9)	d	d
Ba^{2+}	R (37,0)	R (100)	R (221)	R (10,3)	R (79,2)	R → d
Ca^{2+}	R (81,3)	R (156)	R (215)	R (144)	R (34,7)	T → d
Cr^{3+}	R	R	R	R (81,2)	R	T → d
Cu^{2+}	R (75,7)	R (126)	—	R (145)	R (6,8)	T
Fe^{2+}	R (65,0)	R (120)	R	R (87,5)	R	T
Fe^{3+}	R (91,2)	R (455)	d	R (87,2)	—	d
K^+	R (35,5)	R (67,8)	R (148)	R (38,3)	R (269)	R → d
Mg^{2+}	R (56,0)	R (102)	R (146)	R (71,2)	R (65,6)	d
Mn^{2+}	R (77,3)	R (151)	R → d	R (161)	R (41)	T
NH_4^+	R (39,5)	R (78,3)	R (178)	R (213)	R (148) 4 °C	R → d
Na^+	R (36,0)	R (94,6)	R (184)	R (91,2)	R (50,4)	R (20,6)
Pb^{2+}	S (1,1)	S (1,0)	S (0,1)	R (59,7)	R (44,3) 20 °C	T
Sn^{2+}	R (178) 10 °C	R (85) 0 °C	S (0,98) 20 °C	R → d	—	T
Zn^{2+}	R (408)	R (488)	R (438)	R (120)	R (30,0) 20 °C	T

Tablica rozpuszczalności soli i wodorotlenków w wodzie: aniony, część 2

kation	SO_3^{2-}	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	CrO_4^{2-}	PO_4^{3-}	OH^-
Ag^+	T	S (0,8)	T	T	T	T → d
Al^{3+}	—	R (38,5)	—	T	T	T
Ba^{2+}	T	T	T	T	T	R (4,9)
Ca^{2+}	T	S (0,2)	T	S (2,0)	T	S (0,2) 20 °C
Cr^{3+}	—	R (64)	—	T	T	T
Cu^{2+}	T	R (22)	T → d	T	T	T
Fe^{2+}	T	R (29,5)	T	—	T	T
Fe^{3+}	—	R (440) 20 °C	—	T	T	T
K^+	R (106)	R (12,0)	R (111)	R (65,0)	R (106)	R (121)
Mg^{2+}	S (0,5)	R (35,7)	T	R (54,8)	T	T
Mn^{2+}	T	R (63,7)	T	T	T	T
NH_4^+	R (64,2)	R (76,4)	R → d	R (37,0)	R (18,3)	R (44,9)
Na^+	R (30,7)	R (28,1)	R (30,7)	R (87,6)	R (14,4)	R (100)
Pb^{2+}	T	T	T	T	T	T
Sn^{2+}	—	R (18,8) 19 °C	—	—	T	T
Zn^{2+}	S (0,2)	R (57,7)	T	R (3,1)	T	T

Tablica rozpuszczalności soli i wodorotlenków w wodzie. Rozpuszczalność w g/100 g wody, zwykle w 25 °C (inne temperatury podano w komórkach). R: >2; S: 0,1–2; T: <0,1. d: rozkład w wodzie; —: związek nietrwały, nieotrzymany lub brak danych.

Symbole i jednostki

symbol	znaczenie	jednostka
$a,\ b,\ c,\ d$	współczynniki stechiometryczne przy A, B, C i D	$-$
a_i	aktywność składnika	1
$[\mathrm{A}]$	stężenie równowagowe substratu A	$\mathrm{mol/dm^3}$
b	molalność	$\mathrm{mol/kg}$
$[\mathrm{B}]$	stężenie równowagowe substratu B	$\mathrm{mol/dm^3}$
c	stężenie molowe	$\mathrm{mol/m^3}$
c_i	stężenie jonu	$\mathrm{mol/m^3}$
$[\mathrm{C}]$	stężenie równowagowe produktu C	$\mathrm{mol/dm^3}$
$[\mathrm{D}]$	stężenie równowagowe produktu D	$\mathrm{mol/dm^3}$
f	liczba stopni swobody układu	$-$
ΔH°	standardowa entalpia reakcji	$\mathrm{J/mol}$

symbol	znaczenie	jednostka
p_1	prężność w temperaturze T_1	hPa
p_2	prężność w temperaturze T_2	hPa
p_i	ciśnienie cząstkowe pary	hPa
p_i^*	prężność pary czystego składnika	hPa
R	stała gazowa ≈ 8,314	$\mathrm{J/(K{\cdot}mol)}$
R	stała gazowa ≈ 8,314 J/(K · mol)	$\mathrm{Pa{\cdot}m^3/(K{\cdot}mol)}$
s	liczba niezależnych składników	$-$
T	temperatura bezwzględna	K
T_1	pierwsza temperatura	K
T_2	druga temperatura	K
ΔT_b	podwyższenie temperatury wrzenia	K

symbol	znaczenie	jednostka
ΔH_{vap}	molowa entalpia parowania	$\mathrm{J/mol}$
i	indeks	1
I	siła jonowa	$\mathrm{mol/m^3}$
K	stała adsorpcji	$\mathrm{m^3/mol}$
K_1	termodynamiczna stała równowagi w temperaturze T_1	1
K_2	termodynamiczna stała równowagi w temperaturze T_2	1
K_b	stała ebulioskopowa	$\mathrm{K{\cdot}kg/mol}$
K_c	stała równowagi (wyrażona przez stężenia; jednostka zależy od reakcji)	zależy od reakcji
K_f	stała krioskopowa	$\mathrm{K{\cdot}kg/mol}$
K_p	stała ciśnieniowa	
Δn	zmiana liczby moli gazu według stechiometrii	

symbol	znaczenie	jednostka
ΔT_f	obniżenie temperatury krzepnięcia	K
x_i	ułamek molowy cieczy	1
z_i	liczba ładunkowa jonu	1
θ	stopień pokrycia	1
μ_i	potencjał chemiczny	$\mathrm{J/mol}$
μ_i°	potencjał standardowy	$\mathrm{J/mol}$
π	ciśnienie osmotyczne	Pa
φ	liczba faz	$-$