

## СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ

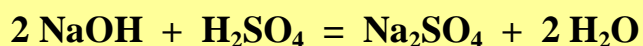
### 1. Виды концентраций, используемые в аналитической химии

Основной единицей измерения **количества вещества** является **моль**.

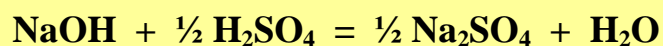
**Эквивалентом** называется такая часть атома, иона или молекулы, которая химически равноценна (эквивалентна):

- одному **иону водорода** в данной **кислотно-основной** реакции
- одному **электрону** в данной **окислительно-восстановительной** реакции.

**Единицей** количества эквивалента вещества является **моль-экв**.  
Вещества реагируют между собой в эквивалентных количествах.



или



Данную реакцию можно прочесть: «на 1 моль щелочи приходится  $\frac{1}{2}$  моль кислоты»

Эквивалент серной кислоты будет равен  $\frac{1}{2} \text{H}_2\text{SO}_4$ , где  $\frac{1}{2}$  – фактор эквивалентности

**Фактор эквивалентности** ( $f$ ) – это число, показывающее, какая часть моля вещества равноценна:

- одному **иону водорода** в данной **кислотно-основной** реакции

$$f_{\text{к/о}} = \frac{1}{[H^+]} \quad (1)$$

где  $[H^+]$  – число ионов водорода, отдаваемое или присоединяемое одной молекулой или одним ионом в данной *реакции*.

- одному **электрону** в данной **окислительно-восстановительной** реакции.

$$f_{\text{овр}} = \frac{1}{z} \quad (2)$$

где  $z$  – число электронов, отдаваемое или присоединяемое одной молекулой или одним ионом в данной *полуреакции*.

**Молярная масса** вещества ( $M$ ) – масса одного моль вещества .

**Молярная масса эквивалента** вещества ( $M_{\text{э}}$ ) – масса одного моль эквивалента вещества.

$$M = \frac{m}{n} \text{ (г/моль)} ; \quad M_{\text{э}} = M \cdot f \text{ (г экв/моль)}$$

**Внимание!** Фактор эквивалентности не может больше 1. Для нахождения фактора эквивалентности вещества необходимо не только *определить реакцию*, в которой данное вещество участвует, но и *знать какие продукты образуются* в данной реакции (полуреакции).

**Пример 1.** Рассчитать фактор эквивалентности и молярную массу эквивалента реагирующих веществ

**К/О**



$$f_{\text{HCl}} = \frac{1}{[H^+]} = \frac{1}{1} = 1; \quad M_{\text{эHCl}} = 36,5 \text{ гЭКВ/моль};$$

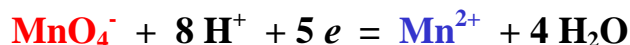
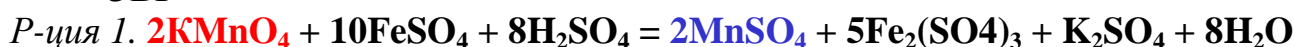
$$f_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{1}{[H^+]} = \frac{1}{1} = 1; \quad M_{\text{эNa}_2\text{CO}_3} = 106 \text{ гЭКВ/моль}$$



$$f_{\text{HCl}} = \frac{1}{[H^+]} = \frac{1}{1} = 1; \quad M_{\text{эHCl}} = 36,5 \text{ гЭКВ/моль};$$

$$f_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{1}{[H^+]} = \frac{1}{2}; \quad M_{\text{эNa}_2\text{CO}_3} = 53 \text{ гЭКВ/моль}$$

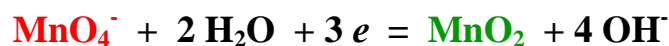
**ОВР**



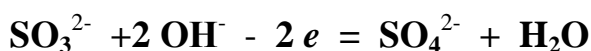
$$f_{\text{KMnO}_4} = \frac{1}{z} = \frac{1}{5}; \quad M_{\text{эKMnO}_4} = 31,6 \text{ гЭКВ/моль}$$



$$f_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{1}{z} = \frac{1}{1} = 1; \quad M_{\text{эMnO}_4^-} = 56 \text{ гЭКВ/моль}$$



$$f_{\text{KMnO}_4} = \frac{1}{z} = \frac{1}{3}; \quad M_{\text{эKMnO}_4} = 52,7 \text{ гЭКВ/моль}$$



$$f_{\text{K}_2\text{SO}_3} = \frac{1}{z} = \frac{1}{2}; \quad M_{\text{эK}_2\text{SO}_3} = 79 \text{ гЭКВ/моль}$$



$$f_{\text{J}_2} = \frac{1}{2}; \quad \text{но} \quad f_{\text{J}^-} = \frac{1}{1} = 1 \quad \text{тк два иодид иона отдают два электрона}$$

**Концентрация раствора (C)** – это отношение количества растворенного вещества к объему раствора, показывает количество вещества в единице объема раствора.

В системе **СИ** основной единицей выражения концентрации растворов является **молярная концентрации** (моль/м<sup>3</sup>), на практике – моль/дм<sup>3</sup>, допускается моль/л или М.

**Молярная концентрация, C<sub>М</sub>** (моль/л, М) – это количество моль вещества, содержащегося в 1 л раствора:

$$C_M = \frac{n}{V} = \frac{m \cdot 1000}{M \cdot V} \quad (3)$$

**Молярная концентрация эквивалента, C<sub>Н</sub>** (моль-эвк/л, Н) – это количество моль эквивалентов вещества, содержащегося в 1 л раствора:

$$C_H = \frac{n_{\text{эвк}}}{V} = \frac{m \cdot 1000}{M_{\text{эвк}} \cdot V} = \frac{m \cdot 1000}{M \cdot f \cdot V} \quad (4)$$

*m* – масса вещества, г

*M* – молярная масса вещества, г/моль

*V* – объем раствора, мл

*f* – фактор эквивалентности

Взаимосвязь между концентрациями

$$C_M = C_H \cdot f \quad (5)$$

Таким образом, зная массу навески вещества и объем, в котором растворили эту навеску можно рассчитать концентрацию полученного раствора. И, наоборот, можно рассчитать массу навески вещества, которую необходимо взять для приготовления известного раствора с заданной концентрацией

**Пример 2.** Рассчитать молярную концентрацию и молярную концентрацию эквивалента при растворении 2,5000 г Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> в 500 мл дистиллированной воды.

*Решение:* Для расчета используем формулы (3) и (5)

$$C_M = \frac{m \cdot 1000}{M \cdot V} = \frac{2,5 \cdot 1000}{106 \cdot 500} = 0,0472 \text{ моль/л}$$

$$C_H = \frac{C_M}{f} = \frac{0,0472}{1/2} = 0,0944 \text{ моль – эвк/л}$$

**Пример 3.** Рассчитать навеску  $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ , необходимую для приготовления 200 см<sup>3</sup> 0,1 Н раствора.

*Решение:* Для расчета используем формулу (4). Взвешиваемое вещество является кристаллогидратом, поэтому при расчете молярной массы вещества учитываем молярную массу воды.

$$m = \frac{C_H \cdot M \cdot f \cdot V}{1000} = \frac{0,1 \cdot 126 \cdot \frac{1}{2} \cdot 200}{1000} = 1,2600 \text{ г}$$

Расчет результатов титриметрического анализа основан на *принципе эквивалентности*, в соответствии с которым вещества реагируют между собой строго в эквивалентных соотношениях.

Количество моль-эквивалентов одного вещества (*A*) равно количеству моль-эквивалентов другого вещества (*B*), если они взаимодействуют между собой без остатка.

Отсюда получается важное уравнение, которое лежит в основе всех расчетов в титриметрическом анализе и представляет собой **математическое выражение ЗАКОНА ЭКВИВАЛЕНТОВ в титриметрии**.

$$n_A = n_B \quad \text{или} \quad (C_H \cdot V)_A = (C_H \cdot V)_B \quad (6)$$

**Пример 4.** Рассчитать молярную концентрацию титранта, если титрование раствора содержащего 1,0240 г  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  расходуется 13,16 мл раствора  $HCl$ .

*Решение:* Для расчета используем формулы (6), (4) и (3). При расчете молярной массы кристаллогидрата учитываем молярную массу воды.

Подставив выражение (4) в выражение для закон эквивалентов (6):

$$\text{получаем выражение } \left( \frac{m \cdot 1000}{M \cdot f} \right)_{Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O} = (C_H \cdot V)_{HCl} ,$$

$$\text{находим } C_{H(HCl)} = \frac{1,0240 \cdot 1000}{382 \cdot \frac{1}{2} \cdot 13,16} = 0,4074 \quad \text{моль} - \text{экв/л.}$$

Поскольку для  $HCl$   $f = 1$ ,  $C_{M(HCl)} = 0,4074 \quad \text{моль/л}$

**Массовая концентрация,  $C_m$** —отношение массы растворенного вещества к объему раствора.

Численное значение этой концентрации выражается в г/л, мг/мл, ppm и тд. В титриметрическом анализе применяют **титр раствора,  $T$**  (г/мл).

$$T_A = \frac{m_A}{V} \quad (7)$$

Зная титр раствора, можно вычислить молярную концентрацию и молярную концентрацию эквивалента раствора вещества (A) и наоборот:

$$C_{M(A)} = \frac{T_A \cdot 1000}{M_A} \quad (8)$$

$$C_{H(A)} = \frac{T_A \cdot 1000}{M_{\text{ЭКВ}(A)}} \quad (9)$$

В титриметрическом анализе для расчета массы определяемого вещества в серийных анализах используют **титр рабочего раствора (B) по определяемому веществу (A),  $T_{B/A}$**  (г/мл) – отношение массы определяемого вещества  $m_{(A)}$  к эквивалентному объему рабочего раствора  $V_{(B)}$ .

$$T_{B/A} = \frac{m_A}{V_B} \quad (10)$$

$T_{B/A}$  показывает, какая масса (г) анализируемого вещества (A) реагирует с 1 мл рабочего раствора вещества (B).

Более часто при титровании используют формулы:

$$T_{B/A} = \frac{C_{H(B)} \cdot M_{\text{ЭКВ}(A)}}{1000} \quad (11)$$

$$T_{B/A} = \frac{T_{(B)} \cdot M_{\text{ЭКВ}(A)}}{M_{\text{ЭКВ}(B)}} \quad (12)$$

**Пример 5.** Сколько граммов щелочи  $\text{NaOH}$  необходимо взять для приготовления 300 мл раствора, чтобы титр гидроксида натрия по оксиду кальция был равен 0.002245 г/мл? Рассчитать титр полученного раствора.

*Решение:* Для расчета используем формулы (11), (4) и (7).

Из выражения (11) с учетом, что  $f(\text{CaO}) = \frac{1}{2}$  получаем

$$C_{H(\text{NaOH})} = \frac{T_{B/A} \cdot 1000}{M_{\text{ЭКВ}(\text{CaO})}} = \frac{0,002245 \cdot 1000}{56 \cdot \frac{1}{2}} = 0,0802 \text{ мольЭКВ/л}$$

Подставим в (4)  $m_{\text{NaOH}} = \frac{C_H \cdot M \cdot f \cdot V}{1000} = \frac{0,0802 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 300}{1000} = 0,9624 \text{ г}$

Титр раствора из (7)  $T_{\text{NaOH}} = \frac{m_{\text{NaOH}}}{V} = \frac{0,9624}{300} = 0,003208 \text{ г/мл}$

**Массовая доля вещества,  $\omega_A$**  – это отношение массы вещества к общей массе раствора, навески или смеси веществ. В количественном анализе массовую долю измеряют в процентах:

$$\omega_A = \frac{m_A}{m_{\text{общ}}} \cdot 100 \% \quad (13)$$

В справочных таблицах [Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии] для растворов кислот, оснований и некоторых солей приведены значения плотностей этих растворов  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>) и соответствующие массовые доли  $\omega$  (%) веществ. Используя эти величины, можно рассчитать  $C_M$ ,  $C_N$  и  $T$  вещества в растворе выполнив определенные преобразования, учитывая, что  $m_{\text{раствора}} = \rho \cdot V$ , где объем раствора указан в мл.

$$\omega_A = \frac{T}{\rho} \cdot 100 \quad (14)$$

$$\omega_A = \frac{C_M \cdot M}{\rho \cdot 10} \quad (15)$$

$$\omega_A = \frac{C_N \cdot M \cdot f}{\rho \cdot 10} \quad (16)$$

**Пример 6.** Сколько грамм, молей, молей эквивалентов соляной кислоты содержится в 10 мл раствора с концентрацией равной 10,56%? Рассчитать титр соляной кислоты по соде и молярную концентрацию эквивалента раствора  $HCl$ .

*Решение:* Для расчета используем формулы (13), (16) и (11).

Из таблицы плотностей и концентрация для  $HCl$  [Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии] данной концентрации соответствует  $\rho = 1,050$  г/см<sup>3</sup>.

Учитывая, что  $m_{\text{раствора}} = \rho \cdot V$  из выражения (13) находим

$$m_{HCl} = \frac{\omega \cdot \rho \cdot V}{100} = \frac{10,56 \cdot 1,050 \cdot 10}{100} = 1,1088 \text{ г.}$$

$$n_{HCl} = \frac{m_{HCl}}{M_{HCl}} = \frac{1,1088}{36,5} = 0,03038 \text{ моль, учитывая, что } f_{HCl} = 1$$

$$\text{то } n_{\text{экв}HCl} = \frac{m_{HCl}}{M_{HCl} \cdot f} = \frac{1,1088}{36,5 \cdot 1} = 0,03038 \text{ моль экв}$$

$$\text{Из (16) } C_{H(HCl)} = \frac{\omega \cdot \rho \cdot 10}{M \cdot f} = \frac{10,56 \cdot 1,050 \cdot 10}{36,5 \cdot 1} = 3,038 \text{ мольэкв/л}$$

Из (11), с учетом  $f_{Na_2CO_3} = \frac{1}{2}$  получаем

$$T_{HCl/Na_2CO_3} = \frac{C_{H(HCl)} \cdot M_{\text{экв}(Na_2CO_3)}}{1000} = \frac{3,038 \cdot 106 \cdot \frac{1}{2}}{1000} = 0,1610 \text{ г/мл}$$

## 2. Разбавление и смешивание растворов одного и того же вещества

При приготовлении разбавленных растворов из более концентрированных используют в расчетах **математическое выражение ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ количества вещества**, т.к. количество вещества, выраженное в *моль-эквивалентах, молях*, а также в *граммах*, до разбавления и после разбавления **остается постоянным**, **изменяются только концентрация и объем** раствора.

Вычисляют объем концентрированного раствора ( $V_{\text{конц}}$ ), необходимый для приготовления заданного объема ( $V_{\text{разб}}$ ) и концентрации ( $C_{\text{Нразб}}$ ) разбавленного раствора.

$$n_{\text{конц}} = n_{\text{разб}} \quad \text{или} \quad (C_{\text{Н}} \cdot V)_{\text{конц}} = (C_{\text{Н}} \cdot V)_{\text{разб}} \quad (17)$$

$C_{\text{Н(конц)}}$ ,  $C_{\text{Н(разб)}}$ ,  $V_{\text{(конц)}}$ ,  $V_{\text{(разб)}}$  – молярные концентрации эквивалентов и объемы концентрированного и разбавленного растворов

При смешивании растворов одного и того же вещества **математическое выражение ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ количества вещества будет** иметь вид:

$$n_1 + n_2 = n_3 \quad \text{или} \quad (C_{\text{Н}} \cdot V)_1 + (C_{\text{Н}} \cdot V)_2 = (C_{\text{Н}} \cdot V)_3 \quad (18)$$

**Пример 7.** Сколько мл 10,06 % раствора  $\text{HClO}_4$  необходимо взять для приготовления 250 мл 0,25 Н раствора?

*Решение:* Для расчета используем формулу (17), но сначала нужно рассчитать, используя формулу (16) молярную концентрацию эквивалента раствора  $\text{HClO}_4$  с массовой долей 10,06 %.

Из таблицы плотностей и концентрация для  $\text{HClO}_4$  [Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии] данной концентрации соответствует  $\rho = 1,060 \text{ г/см}^3$ .

$$\text{Из (16)} \quad C_{\text{Н(HClO}_4)} = \frac{\omega \cdot \rho \cdot 10}{M \cdot f} = \frac{10,06 \cdot 1,060 \cdot 10}{100,5 \cdot 1} = 1,061 \text{ мольэкв/л}$$

$$\text{Из (17)} \quad V_{\text{конц(HClO}_4)} = \frac{(C_{\text{Н}} \cdot V)_{\text{разб}}}{(C_{\text{Н}})_{\text{конц}}} = \frac{0,25 \cdot 250}{1,061} = 58,9 \text{ мл}$$

**Пример 8.** Сколько мл раствора  $\text{NaOH}$  с плотностью  $\rho = 1,110 \text{ г/см}^3$  необходимо добавить к 100 мл 0,1 Н раствора, чтобы получить 0,50 Н раствор.

*Решение:* В данном случае происходит сливание двух растворов одного и того же вещества. Для расчета используем формулу (18), но сначала нужно рассчитать, используя формулу (16) молярную концентрацию эквивалента раствора  $\text{NaOH}$  с плотностью  $1,110 \text{ г/см}^3$

Из таблицы плотностей и концентрация для  $NaOH$  [Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии] данной плотности соответствует массовая доля 10,10 %.

$$\text{Из (16)} \quad C_{H(NaOH)} = \frac{\omega \cdot \rho \cdot 10}{M \cdot f} = \frac{10,10 \cdot 1,110 \cdot 10}{40 \cdot 1} = 2,8 \text{ мольэкв/л}$$

Из (18) с учетом, что  $V_1 + V_2 = V_3$  решаем уравнение  
 $2,8 \cdot V_1 + 0,1 \cdot 100 = 0,50(V_1 + 100)$  получаем  $V_1 = 17,4$  мл

Таблица Формулы пересчета концентрации растворов

Определяемая концентрация	Исходная концентрация			
	$\omega$ , %	$c_M$	$c_H$	$T$
Массовая доля $\omega$ , %	$\frac{m_{\text{вещества}}}{m_{\text{раствора}}} \cdot 100$	$\frac{c_M \cdot M}{10 \cdot \rho}$	$\frac{c_H \cdot M \cdot f}{10 \cdot \rho}$	$\frac{T \cdot 100}{\rho}$
Молярная $c_M$ , моль/л	$\frac{\omega \cdot 10 \cdot \rho}{M}$	моль/л	$c_H \cdot f$	$\frac{T \cdot 1000}{M}$
Молярная концентрация эквивалента $c_H$ , моль экв/л	$\frac{\omega \cdot 10 \cdot \rho}{M \cdot f}$	$\frac{c_M}{f}$	моль экв/л	$\frac{T \cdot 1000}{M \cdot f}$
Титр $T$ , г/мл	$\frac{\omega \cdot \rho}{100}$	$\frac{c_M \cdot M}{1000}$	$\frac{c_H \cdot M \cdot f}{1000}$	г/мл
Примечание	$\rho$ – плотность раствора, г/см <sup>3</sup> ; $f$ – фактор эквивалентности вещества; $M$ – молярная масса вещества, г/моль; $m$ – масса вещества, г			



*Таблица Расчет фактора эквивалентности*

Частица	Фактор эквивалентности	Примеры
Элемент	$f_{\text{Э}}(B) = 1/B(\text{Э})$ где $B(\text{Э})$ – валентность элемента	Фактор эквивалентности хрома в оксиде хрома $\text{Cr}_2\text{O}_3$ (III): $f_{\text{Э}}(\text{Cr}) = 1/3$
Простое вещество	$f_{\text{Э}}(B) = 1/n(\text{Э}) \cdot B(\text{Э})$ где $n(\text{Э})$ – число атомов элемента (индекс в химической формуле), $B(\text{Э})$ – валентность элемента	$f_{\text{Э}}(\text{H}_2) = 1/(2 \times 1) = 1/2$ $f_{\text{Э}}(\text{O}_2) = 1/(2 \times 2) = 1/4$ $f_{\text{Э}}(\text{Cl}_2) = 1/(2 \times 1) = 1/2$ $f_{\text{Э}}(\text{O}_3) = 1/(3 \times 2) = 1/6$
Оксид	$f_{\text{Э}}(B) = 1/n(\text{Э}) \cdot B(\text{Э})$ где $n(\text{Э})$ – число атомов элемента (индекс в химической формуле оксида), $B(\text{Э})$ – валентность элемента	$f_{\text{Э}}(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 1/(3 \times 2) = 1/6$ $f_{\text{Э}}(\text{CrO}) = 1/(1 \times 2) = 1/2$ $f_{\text{Э}}(\text{H}_2\text{O}) = 1/(1 \times 2) = 1/2$ $f_{\text{Э}}(\text{P}_2\text{O}_5) = 1/(5 \times 2) = 1/10$
Соль	$f_{\text{Э}}(B) = 1/n(\text{Me}) \cdot B(\text{Me}) = 1/n(\text{A}) \cdot B(\text{A})$ где $n(\text{Me})$ – число атомов металла (индекс в химической формуле соли), $B(\text{Me})$ – валентность металла; $n(\text{A})$ – число кислотных остатков, $B(\text{A})$ – валентность кислотного остатка	$f_{\text{Э}}(\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3) = 1/(2 \times 3) = 1/6$ (расчет по металлу) или $f_{\text{Э}}(\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3) = 1/(3 \times 2) = 1/6$ (расчет по кислотному остатку)
Частица в ОВР	$f_{\text{Э}}(B) = 1/z$ где $z$ – число электронов, участвующих в процессе окисления или восстановления	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$ $f_{\text{Э}}(\text{Fe}^{2+}) = 1/2;$
Ион	$f_{\text{Э}}(B) = 1/z$ где $z$ – заряд иона	$f_{\text{Э}}(\text{SO}_4^{2-}) = 1/2$