

**ТЕМА ЗАНЯТИЯ «ПРОИЗВЕДЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ»**

**1). ЗАПИШИТЕ ТЕМУ ЗАНЯТИЯ.**

---

**2). ИЗУЧИТЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ.**

Растворимость твердых веществ в определенных жидких растворителях - важная характеристика индивидуальных свойств веществ. Сведения о растворимости позволяют выбрать подходящий растворитель для реагентов, участвующих в реакции, определить возможность и направление ионно-обменной реакции. Абсолютно нерастворимых веществ нет, каждое растворяется в определенном растворителе в некотором количестве.

Количественно растворимость характеризуется составом (концентрацией) насыщенного раствора. Насыщенный раствор - такой, в котором при данной температуре вещество растворяться уже не может. Имеются различные способы количественного выражения растворимости. Ее можно выражать в молях на 1 л раствора, в г на 1 л раствора. Иногда растворимость выражают в молях на 1 л растворителя или на 100 г растворителя. Растворимость твердых веществ выражают числом частей массы безводного вещества, насыщающих при данных условиях 100 частей массы растворителя, это число называется коэффициентом растворимости.

Растворимость твердых веществ в жидкостях зависит от природы растворенного вещества, от природы растворителя и от температуры, для различных веществ она изменяется в широких пределах.

При растворении твердых веществ в жидкостях объём раствора меняется очень мало, поэтому растворимость твердых веществ в жидкостях практически не зависит от давления. Предсказать растворимость нельзя. Обычно полярные вещества лучше растворяются в полярных растворителях, а неполярные - в неполярных: работает принцип «подобное растворяется в подобном».

Данные по растворимости различных веществ в различных растворителях содержатся в специальных справочниках. Зависимость растворимости любого вещества от температуры может быть выражено графически.

Различают вещества растворимые и малорастворимые. К малорастворимым в воде относятся вещества, растворимость которых не превышает  $10^{-2}$  моль/л. Насыщенные растворы малорастворимых веществ - электролитов очень разбавлены. Та часть электролита, которая растворилась, находится в растворе в виде ионов. Между твердой фазой  $[A_mB_n]$  и ионами  $\{A^{+n}\}$ ,  $\{B^{-m}\}$  в растворе устанавливается равновесие растворимости. В общем виде это равновесие можно записать так:



Если электролит малорастворим, то равновесие характеризуется константой равновесия, в выражение которой не входит концентрация вещества в конденсированной фазе.

Константа гетерогенного равновесия для процесса растворения малорастворимого электролита называется произведением растворимости.

$$K_c = C_{A^{+n}}^m C_{B^{-m}}^n = ПР.$$

Произведение растворимости малорастворимого электролита (ПР), как всякая константа равновесия, зависит только от природы растворителя и температуры, она выражается через равновесные концентрации ионов и по форме является произведением концентрации ионов в насыщенном растворе малорастворимого электролита.

Значение ПР для малорастворимых электролитов приведены в специальных справочниках. Понятие ПР не используется для хорошо растворимых веществ, поскольку в таких растворах насыщение достигается при

высоких концентрациях растворимых веществ, между ионами растворенного вещества возникают дополнительные взаимодействия.

Произведение растворимости связано с растворимостью малорастворимого электролита, то есть молярной концентрацией его насыщенного раствора.

*Равновесие в системе осадок – раствор.*

Например, гетерогенная (неоднородная) система состоит из двух фаз: насыщенного раствора электролита и осадка  $\text{BaSO}_4$ . В этой системе устанавливается динамическое равновесие:



Для этой равновесной системы произведение концентраций ионов труднорастворимого электролита в его насыщенном растворе есть величина постоянная при данной температуре:

$$\text{ПР} = [\text{Ba}^{2+}] \cdot [\text{SO}_4^{2-}]$$

Если в формуле имеются стехиометрические коэффициенты, то они входят в уравнение как показатели степени, в которые необходимо возвести концентрации ионов, например для  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

$$\text{ПР} = [\text{Ca}^{2+}]^3 \cdot [\text{PO}_4^{3-}]^2$$

Произведение растворимости характеризует растворимость вещества: чем больше значение ПР, тем больше растворимость.

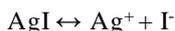
---

### 3). ИЗУЧИТЕ ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ.

#### Расчет ПР по растворимости

*Пример 1.* Вычислить произведение растворимости иодида серебра  $\text{AgI}$ , если растворимость этой соли при температуре  $25^\circ\text{C}$  равна  $2,865 \cdot 10^{-6}$  г/л.

Решение. Химическое равновесие в насыщенном растворе  $\text{AgI}$  описывается уравнением



Запишем выражение произведения растворимости для иодида серебра:

$$\text{ПР}(\text{AgI}) = [\text{Ag}^+] \cdot [\text{I}^-]$$

Вычислим растворимость иодида серебра (моль/л). Так как молярная масса  $\text{AgI}$  составляет 234,772 г/моль, то концентрация  $\text{AgI}$  в растворе составит

$$[\text{AgI}] = 2,865 \cdot 10^{-6} / 234,772 = 1,22 \cdot 10^{-8} \text{ моль/л.}$$

При диссоциации каждого моля иодида серебра образуется 1 моль  $\text{Ag}^+$  и 1 моль  $\text{I}^-$ . Следовательно, их концентрации равны:

$$[\text{Ag}^+] = [\text{I}^-] = [\text{AgI}] = 1,22 \cdot 10^{-8} \text{ моль/л.}$$

Подставляя значения  $[\text{Ag}^+]$  и  $[\text{I}^-]$  в уравнение произведения растворимости, получим:

$$\text{ПР}(\text{AgI}) = 1,22 \cdot 10^{-8} \cdot 1,22 \cdot 10^{-8} = 1,5 \cdot 10^{-16}.$$

*Пример 2.* Вычислить произведение растворимости  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ , если в 100 мл насыщенного раствора его содержится 0,002156 г.

Решение. Найдем растворимость хромата серебра (моль/л): в 100 мл насыщенного раствора содержится 0,002156 г соли

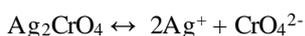
в 1000 мл - x г соли

$$x = 1000 \cdot 0,002156/100 = 0,02156 \text{ г/л.}$$

Молярная масса  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  равна 331,73 г/моль, тогда растворимость  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  (моль/л) будет

$$[\text{Ag}_2\text{CrO}_4] = 0,02156/331,73 \text{ моль/л} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Хромат серебра диссоциирует следующим образом:



Тогда

$$[\text{Ag}^+] = 2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-5} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л;}$$

$$[\text{CrO}_4^{2-}] = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л;}$$

$$\text{ПР} = [\text{Ag}^+]^2 [\text{CrO}_4^{2-}] = (1,3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-5} \approx 1,1 \cdot 10^{-11}.$$

#### Расчет растворимости осадков в воде

*Пример 3.* Вычислить растворимость оксалата кальция, массовую концентрацию ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и массу кальция в 100 мл раствора, если произведение растворимости его равно  $2,57 \cdot 10^{-9}$ .

Решение. Химическое равновесие в насыщенном растворе  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  описывается уравнениями:



$$\text{ПР} = [\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{C}_2\text{O}_4^{2-}] = 2,57 \cdot 10^{-9}$$

Обозначим растворимость  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  через x моль/л. При диссоциации x молей  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  образуется x молей  $\text{Ca}^{2+}$  и x молей  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ . Подставляя эти значения в уравнение произведения растворимости, получим

$$\text{ПР} = x \cdot x = 2,57 \cdot 10^{-9};$$

$$x^2 = 2,57 \cdot 10^{-9};$$

$$x = 5,07 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Чтобы найти растворимость  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  (г/л), необходимо молярную концентрацию (моль/л) умножить на молярную массу  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ :

$$5,07 \cdot 10^{-5} \cdot 128,10 \approx 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/л.}$$

Чтобы найти массовую концентрацию ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , нужно умножить молярную концентрацию на атомную массу  $\text{Ca}^{2+}$ :

$$5,07 \cdot 10^{-5} \cdot 40,08 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ г/л.}$$

Массу кальция в 100 мл раствора находим из пропорции:

в 1000 мл раствора –  $2 \cdot 10^{-3}$  г кальция;

в 100 мл раствора – x г кальция;

$$x = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 100/1000 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ г.}$$

**Задачи на применение условия выпадения осадка.**

В насыщенном растворе малорастворимого электролита при установлении равновесия произведение концентраций равно произведению растворимости, т.е.  $PC = PR$ .

Малорастворимые соли и гидроксиды часто получают при сливании растворов двух хорошо растворимых электролитов. Если при этом произведение концентраций ионов образующегося малорастворимого электролита ( $PC$ ) меньше  $PR$  данного электролита, то раствор ненасыщен:

$PC < PR$  - раствор ненасыщен, осадок не выпадает.

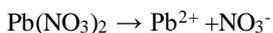
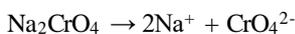
Условие образования осадка:

$$PC (A_m B_n) = C_A^{+m} C_B^{-n} \geq PR (A_m B_n).$$

Задачи на условия выпадения осадка бывают двух типов.

*Пример 4.* При какой молярной концентрации хромата натрия начнется выпадение осадка из раствора нитрата свинца с молярной концентрацией соли 0,001 моль/л?

Решение. Составим уравнения диссоциации хромата натрия и нитрата свинца:



Следовательно, молярные концентрации ионов  $Pb^{2+}$  и  $CrO_4^{2-}$  совпадают с молярными концентрациями солей.

Составим уравнение диссоциации хромата свинца:



$$PR = [Pb^{2+}] \cdot [CrO_4^{2-}] = 1,8 \cdot 10^{-14}.$$

Следовательно,  $[CrO_4^{2-}] = PR / [Pb^{2+}] = 1,8 \cdot 10^{-14} / 0,001 = 1,8 \cdot 10^{-11}$  моль/л.

Молярная концентрация хромата натрия равна молярной концентрации хромат-ионов. т.е.  $1,8 \cdot 10^{-11}$  моль/л.

*Пример 5.* Выпадет ли осадок при сливании 100 мл фильтрата, оставшегося от осаждения иодида свинца, с 200 мл раствора хромата натрия с молярной концентрацией 0,1 моль/л?

Решение.

$$PR (PbI_2) = [Pb^{2+}] \cdot [I^-]^2 = 1,1 \cdot 10^{-9}.$$

Химическое равновесие в насыщенном растворе  $PbI_2$  описывается уравнением



Если растворимость  $PbI_2$  равна  $x$  моль/л, то  $[Pb^{2+}] = x$  моль/л, а

$[I^-] = 2x$  моль/л. Следовательно,

$$PR = x \cdot (2x)^2 = 4x^3 = 1,1 \cdot 10^{-9};$$

$x = \sqrt[3]{1,1 \cdot 10^{-9} / 4} = 6,5 \cdot 10^{-4}$  моль/л (столько содержится соли в фильтрате).

После сливания растворов объем составит

$$V = 100 + 200 = 300 \text{ мл,}$$

а концентрация ионов  $Pb^{2+}$  уменьшится:

$$C(PbI_2) = 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot 100/300 = 2,17 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л.}$$

Соответственно уменьшится и концентрация иона  $CrO_4^{2-}$ :

$$[CrO_4^{2-}] = 0,1 \cdot 200/300 = 0,067 \text{ моль/л.}$$

Для ответа на вопрос о возможности выпадения осадка найдем произведение концентраций (ПС) ионов  $Pb^{2+}$  и  $CrO_4^{2-}$  и сравним полученное значение с

$$ПР(PbCrO_4) = 1,8 \cdot 10^{-14}.$$

$$ПС = 2,17 \cdot 10^{-4} \cdot 0,067 = 1,45 \cdot 10^{-5} > 1,8 \cdot 10^{-14}.$$

Так как  $ПС > ПР$  - раствор насыщен. Следовательно, осадок выпадет.

---

#### 4. РЕШИТЕ СЛЕДУЮЩИЕ ЗАДАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНО.

1. Рассчитать растворимость фосфата серебра(1) (в г на л насыщенного раствора), если произведение растворимости этой соли равна  $1,46 \cdot 10^{-21}$ .
2. Вычислите произведение растворимости фторида кальция, если его растворимость равна 0,0016 г на 100 г воды.
3. Определите растворимость  $As_2S_3$  в воде в моль/л и в г/л, если известно, что ПР этой соли составляет  $3,84 \cdot 10^{-29}$  при 25°C.
4. В 50 мл насыщенного раствора карбоната серебра(1) содержится  $1,586 \cdot 10^{-3}$  г соли. Вычислить ПР растворимости этой соли.
5. Будет ли выпадать осадок при смешивании равных объёмов раствора  $AgNO_3$  с молярной концентрацией соли 0,01 моль/л и раствора  $K_3PO_4$  с молярной концентрацией соли 0,02 моль/л? Произведение растворимости фосфата серебра(1) равна  $1,46 \cdot 10^{-21}$ .
6. Образуется ли осадок, если к 10 мл раствора  $AgNO_3$  с молярной концентрацией 0,02 моль/л добавить 20 мл раствора  $K_2CrO_4$  с молярной концентрацией 0,02 моль/л? Произведение растворимости хромата серебра(1) равна  $4,05 \cdot 10^{-12}$ .
7.  $ПР(Ag_3AsO_4) = 11 \cdot 10^{-21}$ . Вычислите молярные концентрации ионов  $Ag^+$  и  $AsO_4^{3-}$  в насыщенном растворе данной соли.
8. Какой должна быть минимальная концентрация раствора  $NaOH$ , чтобы при прибавлении его к равному объёму раствора  $CuSO_4$  с молярной концентрацией соли 0,01 моль/л, началось образование осадка гидроксида меди(2)?  $ПР(Cu(OH)_2) = 5 \cdot 10^{-19}$ .

---

#### 5. ПРОВЕРЬТЕ ПРАВИЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, СВЕРИВ С ОТВЕТАМИ.

Ответы:

- 1).  $1,135 \cdot 10^{-3}$  г
- 2).  $3,44 \cdot 10^{-11}$
- 3).  $8,1 \cdot 10^{-7}$  моль/л;  $1,99 \cdot 10^{-4}$  г
- 4).  $6,08 \cdot 10^{-12}$
- 5). Будет
- 6). Образуется
- 7).  $2,537 \cdot 10^{-6}$  моль/л;  $7,58 \cdot 10^{-6}$  моль/л
- 8).  $2 \cdot 10^{-8}$  моль/л