

Карагандинский Государственный  
Технический Университет

Кафедра ПЭиХ

# Химическая кинетика

Выполнил:  
Ст.гр. ХТОВ-13-2  
Ахметалимов А.М.  
Проверила:  
Рахимберлинова Ж.Б.

Караганда 2015

---



# Содержание:

---

- Что изучает химическая кинетика ?;
- Скорость химической реакции ;
- Элементарные реакции;
- Молекулярность реакции;
- Механизм реакции;
- Факторы влияющие на скорость химической реакции;
- Постулаты химической кинетики;
- Влияние концентрации реагирующих веществ на скорость реакции;
- Порядок сложных реакций;
- Реакция нулевого порядка;
- Реакции первого порядка;
- Реакции второго порядка;
- Реакции n-го порядка;

# Содержание:

---

- Реакции других порядков;
- Определение порядка реакций;
- Метод Вант-Гоффа;
- Метод подстановки;
- Метод Оствальда Нойеса;
- Метод полупревращения;
- Влияние температуры на скорости реакции;
- Уравнение Аррениуса
- Определение энергии активации

# Что изучает химическая кинетика?

---

- Химическая кинетика изучает скорости протекания химических процессов и их механизм
- Основные задачи химической кинетики:
  - расчёт скоростей реакций и определение кинетических кривых, т.е. зависимости концентраций реагирующих веществ от времени (прямая задача)
  - определение механизмов реакций по кинетическим кривым (обратная задача)
- Знание механизма реакции, факторов, влияющих на скорость реакции позволяет управлять скоростью химической реакции

# Скорость химической реакции

- **Скорость гомогенной химической реакции** (в газовой фазе или в растворе) – это изменение концентрации одного из реагентов или продуктов реакции в единицу времени в единице объёма:

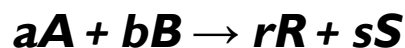
$$v = \pm \frac{1}{V} \frac{dn_i}{d\tau}$$

- Знак (+) используют, если скорость определяют по продукту, а (-) – если по исходному веществу
- Скорость химической реакции может быть измерена по любому компоненту, участвующему в реакции. Она всегда положительна, поэтому знак перед производной  $dn/d\tau$  определяется тем, является ли вещество исходным реагентом (тогда  $dn/d\tau$  отрицательна) или продуктом (тогда  $dn/d\tau$  положительна)
- Если реакция протекает при постоянном объёме, скорость определяют как изменение молярной концентрации  $c_i$  в единицу времени:

$$v = \pm \frac{d\left(\frac{n_i}{V}\right)}{d\tau} = \pm \frac{dc_i}{d\tau}$$

# Скорость химической реакции

- Если химическая реакция описывается стехиометрическим уравнением



то изменение количеств реагентов и продуктов  $\Delta n_i$  в результате её протекания связаны между собой соотношениями:

$$\frac{\Delta n_A}{a} = \frac{\Delta n_B}{b} = \frac{\Delta n_R}{r} = \frac{\Delta n_S}{s}$$

- С учётом стехиометрических коэффициентов скорость реакции равна

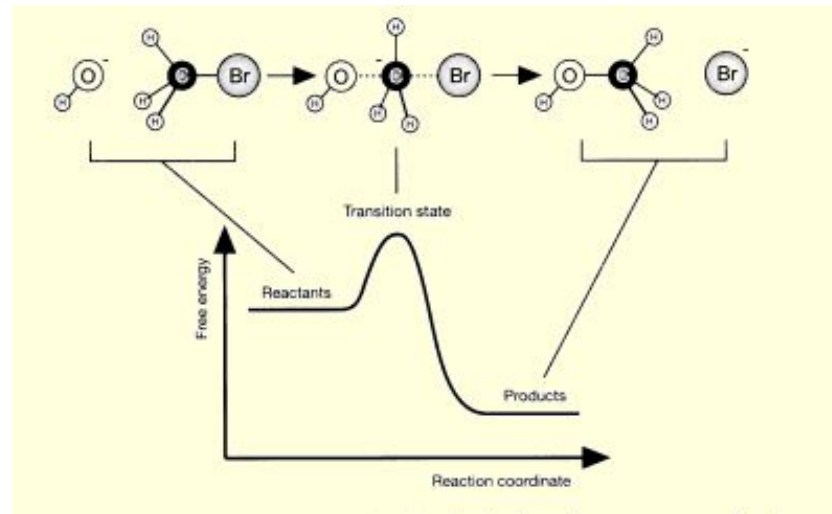
$$v = \pm \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{V} \frac{dn_i}{d\tau} = \pm \frac{1}{i} \cdot \frac{dc_i}{d\tau}$$

где  $i$  – стехиометрический коэффициент у вещества, по которому рассчитывают скорость реакции

- Тогда скорость приводится к общему знаменателю и независимо от того, по изменению какого конкретного реагента или продукта она определялась, будет численно одинакова, т.е.  
 $v_A = v_B = v_R = v_S$

# Элементарные реакции

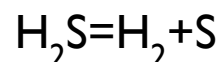
- Большинство химических реакций состоит из нескольких стадий, называемых элементарными реакциями
- **Элементарная (простая) реакция** – единичный акт образования или разрыва химической связи, протекающий через образование переходного комплекса (т.е. реакция, протекающая в одну стадию)
- Переходный или активированный комплекс – конфигурация ядер, соответствующих переходу от реагентов к продуктам
- Обычно переходному комплексу отвечает область вблизи максимума на энергетической кривой химической реакции



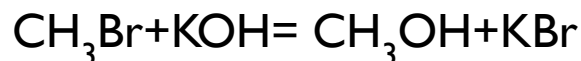
# Молекулярность реакции

□ **Молекулярностью реакции** называют число частиц, участвующих в элементарной реакции. Молекулярность реакции бывает трех видов: мономолекулярные реакции, бимолекулярные реакции, тримолекулярные реакции.

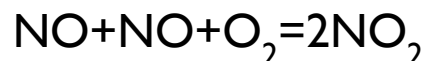
□ Мономолекулярные реакции – это элементарные реакции, в которых изменяется состав или строение только одной молекулы, радикала или иона. Например: реакции разложения, реакции изомеризации.



□ Бимолекулярные реакции – это химические реакции, в элементарном акте которых превращению подвергаются две частицы (молекулы, радикалы и ионы). Например: реакции соединения, реакции обмена.



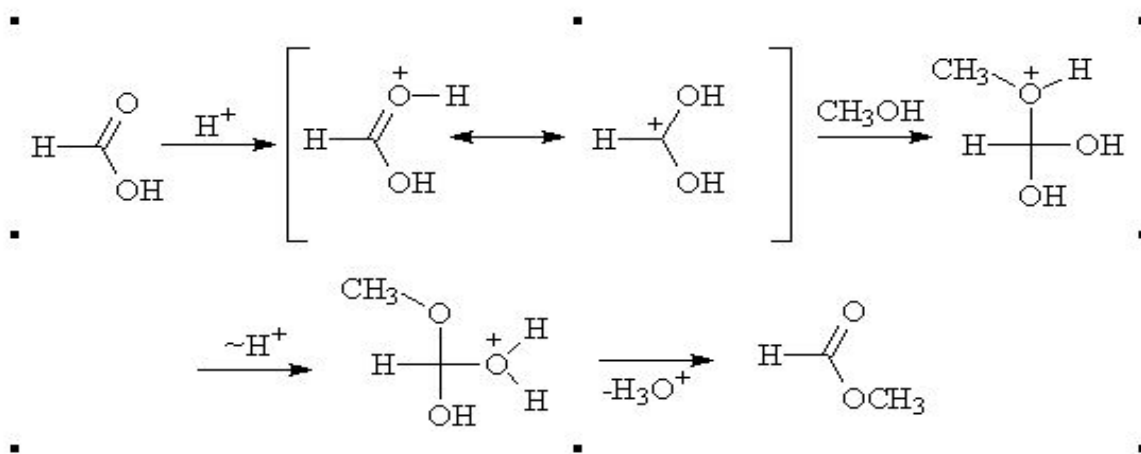
□ Тримолекулярные реакции – это реакции, элементарный акт которых осуществляется при столкновении трех частиц (молекулы, радикалы и ионы).





# Механизм реакции

- ❑ Сложная реакция состоит из нескольких элементарных реакций
- ❑ Совокупность элементарных реакций называют **механизмом реакции**
- ❑ Скорость сложной реакции определяется скоростью самой медленной её стадии (лимитирующая стадия)
- ❑ Уравнение химической реакции не отражает её механизма
- ❑ По уравнению реакции нельзя сказать, является ли реакция элементарной или сложной



# Факторы, влияющие на скорость реакции

---

- Природа реагирующих веществ (тип химических связей в молекулах реагентов, прочность связей, строение кристаллической решётки, строение электронной оболочки атома, прочность связывания внешних электронов и др.
- Концентрация реагентов
- Температура
- Давление
- Катализатор
- Степень перемешивания веществ

# Постулаты химической кинетики

---

- Законы химической кинетики основаны на двух принципах (постулатах):
- *скорость химической реакции пропорциональна концентрациям реагентов*
- *суммарная скорость нескольких последовательных превращений, широко различающихся по скорости, определяется скоростью наиболее медленной стадии*

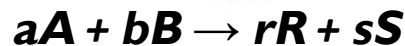
# Влияние концентрации реагирующих веществ на скорость реакции

- Функциональная зависимость скорости химической реакции от концентраций компонентов называется *кинетическим уравнением реакции*

$$v = f(c_A, c_B, \dots c_i)$$

- Основной постулат химической кинетики или закон действующих масс:  
***скорость химической реакции при постоянной температуре в каждый момент времени пропорциональна текущим концентрациям реагирующих веществ, возведённым в некоторые степени***

- Для необратимой элементарной химической реакции



скорость равна

где ***k*** – константа скорости химической реакции; зависит только от температуры

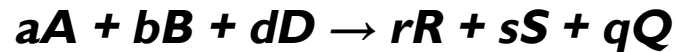
***a*** и ***b*** – порядки реакции по реагентам (частные порядки) соответственно

▶ ***a*** и ***b***, совпадают со стехиометрическим коэффициентом

Их сумма ***a + b = n*** называется общим порядком реакции

# Порядок сложной реакции

- Порядок сложной реакции по веществу в общем случае не совпадает с коэффициентами в уравнении реакции
- Общий порядок реакции равен сумме показателей степеней в уравнении скорости реакции
- Для реакции



кинетическое уравнение

$$v = kc_A^\alpha c_B^\beta c_D^\delta$$

где частные порядки  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  находят экспериментально

- В общем случае  $\alpha \neq a$ ,  $\beta \neq b$  и  $\delta \neq d$ , т.е. молекулярность и порядок реакции не совпадают
- Общий порядок реакции равен сумме показателей степеней в уравнении скорости реакции:  $n = \alpha + \beta + \delta$
- Порядок реакции может быть положительным и отрицательным, целым и дробным



# Реакции нулевого порядка

- Реакциями нулевого порядка по данному веществу являются реакции в закрытой системе при постоянном подводе одного из веществ, обеспечивающем его концентрацию постоянной, или при содержании малорастворимой твёрдой фазы при условии, что скорость растворения вели  $C_{A_i} = \text{const}$  )
- Скорость этих реакций не зависит от концентрации реагирующих веществ и равна константе скорости:  $v=k$

- Кинетическое уравнение:

$$v = -\frac{dC_A}{d\tau} = k$$

- Разделяя переменные и интегрируя, получим  $C_A = C_{A_0} - k\tau$  (и  $C_i = C_0 - k\tau_i$  )

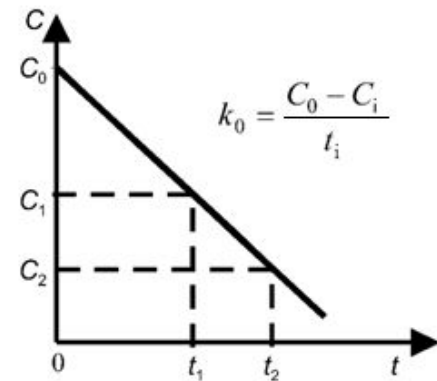
- Особенности реакций нулевого порядка:

1. Концентрация исходного вещества линейно уменьшается во времени
2. Константа скорости и время, необходимое для достижения заданной концентрации

$$k = \frac{C_0 - C}{\tau} \quad \tau = \frac{C_0 - C}{k}$$

3. Время полупревращения (период полураспада) – время, за которое превращается половина вещества (т. е.  $C=1/2 C_0$ )

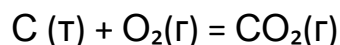
$$\tau_{1/2} = \frac{C_0}{2k}$$



Кинетическая кривая реакции нулевого порядка

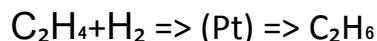
# Примеры реакций нулевого порядка

- Реакции нулевого порядка встречаются в гетерогенных процессах, гетерогенном катализе и всегда указывают на протекание сложной реакции, состоящей из нескольких последовательных стадий
- Лимитирующей стадией является диффузия, поэтому химическое превращение не влияет на скорость
- Гетерогенная реакция горения углерода



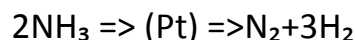
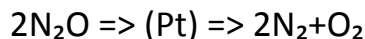
при большом парциальном давлении кислорода (например, когда применяют дутье), израсходованный кислород практически сразу восполняется; при уменьшении парциального давления кислорода до определенной величины порядок реакции становится первым

- Гидрирование этилена на платине:



Скорость реакции здесь определяется площадью поверхности катализатора и не зависит от концентрации реагирующих веществ

- Разложение на платиновой проволоке оксида азота (I) или аммиака



- Омыление малорастворимого сложного эфира водой в разбавленном водном растворе (эфир в избытке), чтобы в системе присутствовал эфирный слой, то расход эфира будет постоянно восполняться из эфирного слоя

- ▶ 15. Фотохимические реакции (скорость процесса лимитируется подачей энергии, необходимой для активации реагирующих молекул)

# Реакции первого порядка

- Это реакции типа  $A \Rightarrow$  продукты
- Скорость реакции прямо пропорциональна концентрации, т.е. кинетическое уравнение:

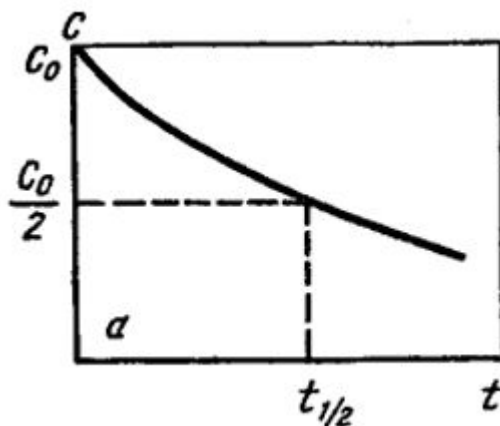
$$v = -\frac{dC_A}{d\tau} = kC_A$$

- Разделяя переменные  $-\frac{dC_A}{C_A} = k d\tau$

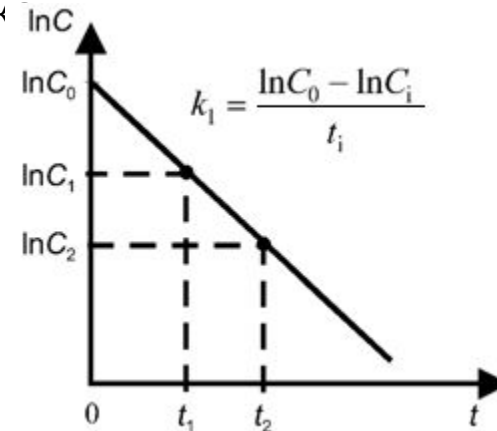
- и интегрируя, получим  $\ln C_A = \ln C_{A_0} - k\tau$

$$C_A = C_{A_0} \exp(-k\tau)$$

- Кинетическ



- порядк





# Реакции первого порядка

□ Особенности реакций первого порядка:

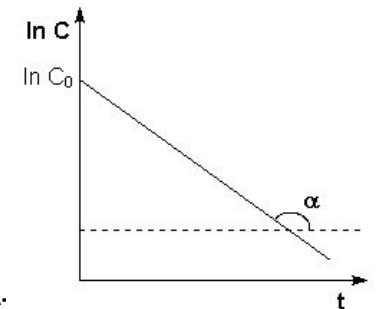
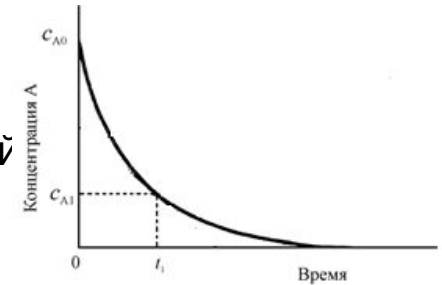
1. Скорость реакции экспоненциально зависит от концентрации
2. График зависимости  $\ln C$  от времени выражается прямой линией
3. Концентрация исходного вещества стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$
4. Время полупревращения при  $C=C_0/2$

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

т.е. не зависит от начальной концентрации реагирующего вещества.

5. Кинетическая кривая инвариантна, т.е. кинетическое уравнение остаётся неизменным при умножении концентрации на какую-либо постоянную величину; поэтому для оценки скорости реакции вместо концентрации можно использовать любую другую пропорциональную её величину, например, электропроводность, спектральную оптическую плотность, объём раствора, израсходованного на титрование.

Например: Разложение  $N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + 0,5O_2$  газовой фазе



# Реакции второго порядка

---

- В реакции участвуют два реагента
- Возможны два случая

## **Случай 1.**

A+B→продукты, начальные концентрации веществ равны,  $C_{A_0} = C_{B_0}$

Кинетическое уравнение

$$v = -\frac{dC_A}{d\tau} = -\frac{dC_B}{d\tau} = kC_A \cdot C_B = kC^2$$

Разделяя переменные и интегрируя в пределах от  $C_0$  до  $C$ , получим

$$\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} = k\tau$$

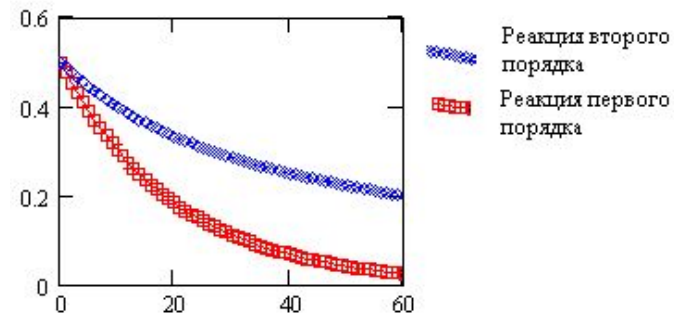
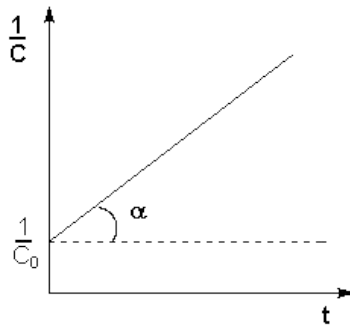
Из этого уравнения следует, что концентрация исходных веществ зависит от времени следующим образом:

$$C = \frac{C_0}{1 + kC_0\tau}$$

# Реакции второго порядка

□ Особенности реакций второго порядка:

1. Скорость реакции гиперболически зависит от концентрации
2. При равенстве начальных концентраций реагирующих веществ обратная концентрация линейно зависит от времени  
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + k\tau$$

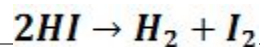


3. Константа скорости 
$$k = \frac{1}{\tau} \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} \right) = \frac{1}{\tau} \frac{C_0 - C}{C \cdot C_0}$$

4. Время полупревращения при  $C=C_0/2$  обратно пропорционально начальной концентрации

$$\tau_{1/2} = \frac{1}{kC_0}$$

Например: Газофазное разложение иодоводорода



# Реакции второго порядка

---

## Случай 2.

A+B→продукты, начальные концентрации веществ не равны,  $C_{A_0} \neq C_{B_0}$

Кинетическое уравнение

$$v = -\frac{dC_A}{d\tau} = -\frac{dC_B}{d\tau} = kC_A \cdot C_B$$

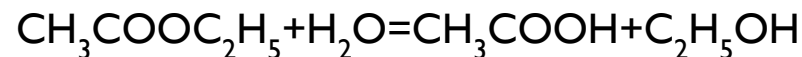
Разделяя переменные и интегрируя, получим

$$\frac{1}{C_{B_0} - C_{A_0}} \ln \frac{C_{A_0} C_B}{C_{B_0} C_A} = k\tau$$

Время полупревращения

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln \frac{2C_{B_0} - C_{A_0}}{C_{B_0}}}{k(C_{B_0} - C_{A_0})}$$

Например:



# Реакции n-го порядка

---

- Это реакции типа  $nA \rightarrow \text{продукты}$
- Кинетическое уравнение

$$v = -\frac{1}{n} \frac{dC_A}{d\tau} = k(C_{A_0} - C_A)^n$$

- Решение уравнения:

$$(n-1)k\tau = \frac{1}{C_A^{n-1}} - \frac{1}{C_{A_0}^{n-1}}$$

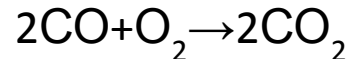
- Время полупревращения

$$\tau_{1/2} = \frac{2^{n-1} - 1}{k(n-1)C_{A_0}^{n-1}}$$

# Реакции других порядков

---

- Необычный — дробный или отрицательный — порядок реакции однозначно указывает на её сложный механизм
- В растворах, если реакция происходит между молекулой и ионом, возможен порядок 3/2
- Реакция окисления СО кислородом на поверхности платины



имеет отрицательный (минус первый) порядок по СО:

$$v = k \frac{C_{\text{O}_2}}{C_{\text{CO}}}$$

т. е. при увеличении концентрации СО скорость реакции уменьшается



# Определение порядка реакции

- Методы определения порядка реакции базируются на методах вычислительной математики, которые позволяют по кинетическим кривым, полученным экспериментально, найти порядки реакции по отдельным реагентам

## Дифференциальные методы

- Используют дифференциальные кинетические уравнения для обработки экспериментальных данных о зависимости концентраций реагирующих веществ от времени
- Метод Вант-Гоффа

## Интегральные методы

- Используют интегральные кинетические уравнения для обработки экспериментальных данных о зависимости концентраций реагирующих веществ от времени
- Метод подстановки
- Метод Оствальда-Нойеса
- Метод полупревращения

# Метод Вант-Гоффа

- Порядок реакции определяют по скоростям превращения
- Для реакции  $A+B \rightarrow \text{продукты}$  записывают уравнение закона действующих масс:

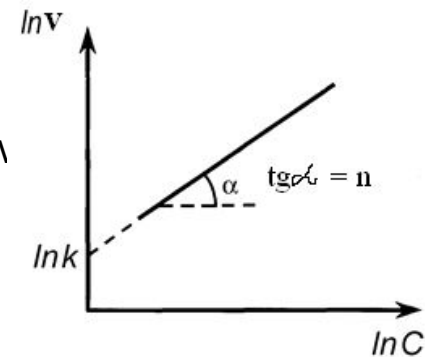
$$v = kC_A^n \cdot C_B^m$$

- Для определения порядка реакции по веществу А проводят серию экспериментов при постоянной начальной концентрации вещества  $C_{B_0} = \text{const}$  )
- В этих условиях

$$\ln v_0 = \ln k + \ln C_{B_0}^m + n \ln C_{A_0} = \ln k' + n \ln C_{A_0}$$

- При различных значениях  $C_{A_0}$  измеряют начальные скорости и строят график зависимости  $\ln v_0$  от  $\ln C_{A_0}$ , который выражается прямой линией
- Тангенс угла наклона прямой равен порядку реакции по веществу А ( $\text{tg} \alpha = n$ )
- Аналогично по данным другой серии экспериментов определяют порядок реакции по веществу В
- Порядок реакции можно определить и расчётным путём

$$n = \frac{\ln \frac{v_{02}}{v_{01}}}{\ln \frac{C_{A_01}}{C_{A_02}}}$$





# Метод подстановки

---

- Заключается в том, что экспериментальные данные последовательно подставляют в интегральные кинетические уравнения для реакций целых порядков и рассчитывают константу скорости  $k$
- Если для выбранного порядка значения  $k$  приблизительно постоянны, то изучаемая реакция имеет данный порядок
- Если ни одно из кинетических уравнений не даёт удовлетворительного результата, то порядок реакции не является целым, т.е. реакция описывается более сложным кинетическим уравнением
- Правильность выбора уравнения проверяется графически по линейности получаемого графика в соответствующих координатах
- Способ трудоёмок и позволяет определить только целые порядки реакции

# Метод Оствальда-Нойеса

---

- Порядок реакции определяют по времени достижения определённой доли превращения  $\alpha$ :

$$\tau_{\alpha} = \frac{1}{kn(n-1)C_{Ao}^{n-1}} \left[ \frac{1}{(1-\alpha)^{n-1}} \right]$$

- Отсюда порядок реакции

$$n = 1 + \frac{\ln \frac{\tau_{\alpha_2}}{\tau_{\alpha_1}}}{\ln \frac{C_{Ao1}}{C_{Ao2}}}$$

# Метод полупревращения

---

- Частный случай метода Оствальда-Нойеса
- Порядок реакции определяют по периоду полупревращения ( $\alpha=1/2$ )

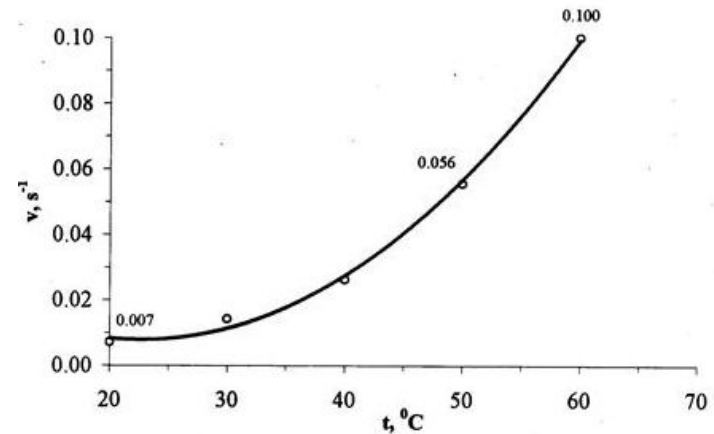
$$n = 1 + \frac{\ln \frac{\tau_{0,5_2}}{\tau_{0,5_1}}}{\ln \frac{C_{Ao1}}{C_{Ao2}}}$$

- Метод Оствальда-Нойеса и метод полупревращения позволяют определять любые значения порядка реакции, включая дробные и отрицательные

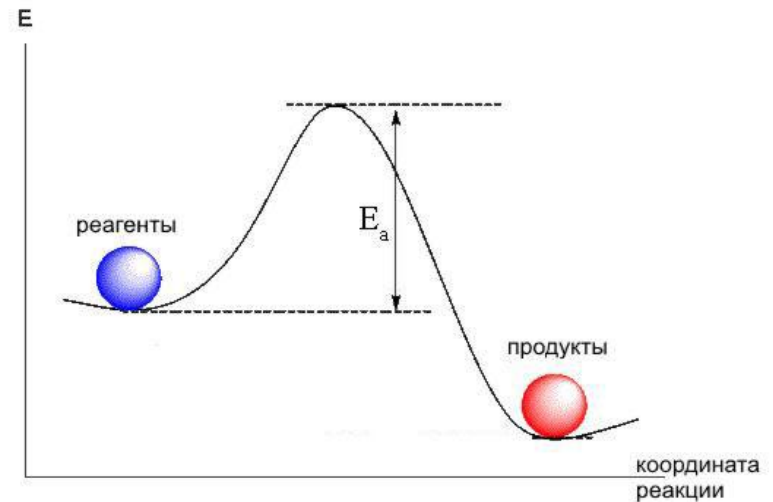
# Уравнение Аррениуса

- Описывает зависимость константы скорости  $k$  от температуры (экспоненциальная):

$$k = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}}$$



- Энергия активации** – энергетический барьер на пути реакции, избыток энергии по сравнению со средней энергией молекул при данной температуре, необходимый для того, чтобы реакция произошла
- Энергия активации определяется свойствами реагирующих частиц, их энергетическим состоянием



# Определение энергии активации

- Уравнение Аррениуса

в логарифмической форме:

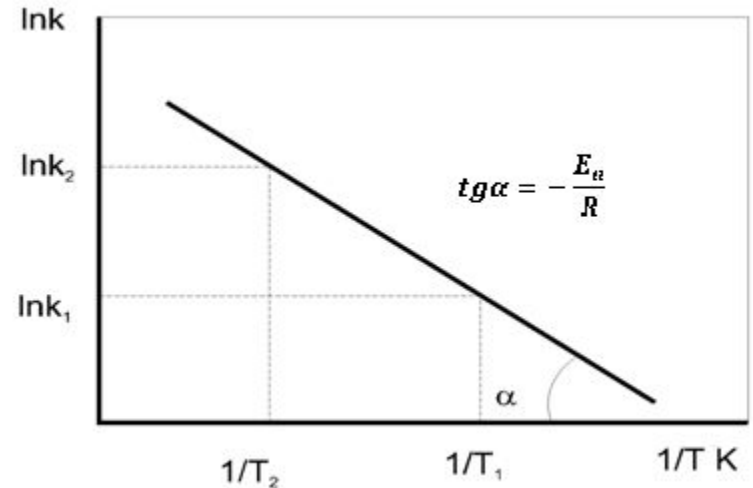
$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT}$$

и в дифференциальной форме

$$\frac{d \ln k}{dT} = -\frac{E_a}{RT^2}$$

- Энергию активации вычисляют по значениям константы скорости, измеренным при нескольких разных температурах
- По экспериментальным данным строят  $\ln k$  график от  $1/T$
- Тангенс угла наклона равен  $-\frac{E_a}{R}$
- Энергию активации можно вычислить по формуле:

$$E_a = \frac{RT_1 T_2 \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}{T_2 - T_1}$$



Графическое определение энергии активации

Константа скорости, а следовательно, и скорость реакции увеличивается с увеличением температуры и уменьшением энергии активации

# Кинетика сложных реакций

---

- При изучении сложных реакций, включающих несколько элементарных стадий, используют принцип независимости химических реакций:

*если в системе протекает несколько простых реакций, то каждая из них подчиняется основному постулату химической кинетики независимо от других реакций*

- Рассмотрим основные типы сложных реакций на примере реакций первого порядка

---

Спасибо за внимание !