

# Энергетика химических реакций

Волобуев Максим Николаевич  
vmn2007@ukr.net

Сделано с использованием L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

Кафедра общей и неорганической химии,  
НТУ «ХПИ»

Харьков 2017

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства **макросистем**
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосиным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!



# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосиным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!



# Определения

- Существует 2 подхода к описанию свойств объекта
  - **микроскопический** – основан на свойствах отдельных составляющих (атомов, молекул)
  - **макроскопический** – оперирует понятиями, применимыми к большой группе частиц
- Термодинамика изучает общие свойства макросистем
  - возможность протекания процесса
  - последствия протекания процесса
- **Система** – совокупность веществ, взаимодействующих между собой, выделенная для рассмотрения:
  - раствор = растворитель + растворённое вещество
  - человек: совокупность взаимодействующих частей (органов), покрытых кожей, волосяным покровом и ногтями
- Сложность системы определяется задачей!

# Понятие фазы

- **Фаза** – часть системы, с одинаковым составом и свойствами, отделенная от остальных частей поверхностями раздела
- Классификация систем по количеству фаз:
  - гомогенная система – одна фаза
  - гетерогенная – две и более фазы
- Превращение гетерогенной системы в гомогенную:



2 фазы

1 фаза

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Понятие фазы

- **Фаза** – часть системы, с одинаковым составом и свойствами, отделенная от остальных частей поверхностями раздела
- Классификация систем по количеству фаз:
  - гомогенная система – одна фаза
  - гетерогенная – две и более фазы
- Превращение гетерогенной системы в гомогенную:



2 фазы

1 фаза

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Понятие фазы

- **Фаза** – часть системы, с одинаковым составом и свойствами, отделенная от остальных частей поверхностями раздела
- Классификация систем по количеству фаз:
  - гомогенная система – одна фаза
  - гетерогенная – две и более фазы
- Превращение гетерогенной системы в гомогенную:



2 фазы

1 фаза

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Понятие фазы

- **Фаза** – часть системы, с одинаковым составом и свойствами, отделенная от остальных частей поверхностями раздела
- Классификация систем по количеству фаз:
  - гомогенная система – одна фаза
  - гетерогенная – две и более фазы
- Превращение гетерогенной системы в гомогенную:



2 фазы

1 фаза

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Понятие фазы

- **Фаза** – часть системы, с одинаковым составом и свойствами, отделенная от остальных частей поверхностями раздела
- Классификация систем по количеству фаз:
  - гомогенная система – одна фаза
  - гетерогенная – две и более фазы
- Превращение гетерогенной системы в гомогенную:



2 фазы



1 фаза



# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени

равновесное      псевдоравновесное

- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - **изолированная** – нет обмена массой и энергией
  - **закрытая** – нет обмена массой
  - **открытая** – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

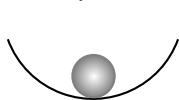
- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени

равновесное      псевдоравновесное

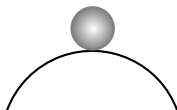
- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - изолированная – нет обмена массой и энергией
  - закрытая – нет обмена массой
  - открытая – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени



равновесное



псевдоравновесное

- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - изолированная – нет обмена массой и энергией
  - закрытая – нет обмена массой
  - открытая – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени



равновесное

псевдоравновесное

- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - *изолированная* – нет обмена массой и энергией
  - *закрытая* – нет обмена массой
  - *открытая* – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени



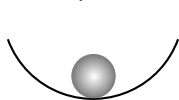
равновесное

псевдоравновесное

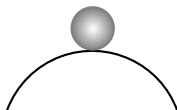
- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - **изолированная** – нет обмена массой и энергией
  - **закрывая** – нет обмена массой
  - **открытая** – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «**МНОЖЕСТВО**»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени



равновесное



псевдоравновесное

- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - **изолированная** – нет обмена массой и энергией
  - **закрытая** – нет обмена массой
  - **открытая** – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени



- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - **изолированная** – нет обмена массой и энергией
  - **закрыва́тая** – нет обмена массой
  - **открытая** – есть обмен и массой, и энергией

# Характеристика состояния системы

- Состояние характеризуется термодинамическими параметрами:  $T, P, V, U$
- $T$  и  $P$  характеризуют не одну частицу, а совокупность частиц (см. математическое понятие «множество»)!)
- Равновесное состояние: устойчивость к возмущению, неизменность во времени



- Параметры состояния не зависят от пути перехода системы в данное состояние
- Типы систем по взаимодействию с окружающей средой:
  - **изолированная** – нет обмена массой и энергией
  - **закрывтая** – нет обмена массой
  - **открытая** – есть обмен и массой, и энергией



# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - кинетическую энергию поступательного движения молекул
    - энергию вращательного движения молекул
    - энергию колебательного движения молекул
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A$ ,  $Q$ ,  $\Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$



# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - изохорный:  $V = \text{const}$
  - изотермический:  $T = \text{const}$
  - изобарный:  $P = \text{const}$
  - адиабатический:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_P$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - **работа** ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - **теплота** ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_P$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A$ ,  $Q$ ,  $\Delta U$
- Формы энергии
  - **работа** ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - **теплота** ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A$ ,  $Q$ ,  $\Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A$ ,  $Q$ ,  $\Delta U$
- Формы энергии
  - **работа** ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - **теплота** ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$

# Общая характеристика процессов

- Характеристики процесса:  $A, Q, \Delta U$
- Формы энергии
  - работа ( $A$ ) – упорядоченное движение частиц
  - теплота ( $Q$ ) – хаотическое движение частиц
  - внутренняя энергия  $U$  включает в себя:
    - энергию межмолекулярного взаимодействия;
    - энергию химической связи;
    - энергию взаимодействия электронов и ядер
- Типы процессов
  - **изохорный**:  $V = \text{const}$
  - **изотермический**:  $T = \text{const}$
  - **изобарный**:  $P = \text{const}$
  - **адиабатический**:  $Q = 0$
- Обозначение типа – нижним индексом:
  - $\Delta U_V$  – изменение при  $V = \text{const}$
  - $Q_p$  – теплота процесса при  $P = \text{const}$



# Первый закон термодинамики

- Изменение внутренней энергии системы происходит за счёт переданной ей теплоты ( $Q$ ) и работы системы ( $A$ ):

$$\Delta U = Q - A$$

- Процесс можно провести таким образом, что единственной работой будет работа расширения:  $A = p\Delta V$
- Тогда 1-й закон термодинамики запишется так:  
 $Q_p = \Delta U + p\Delta V, (p = \text{const})$
- Введём новую функцию состояния – **энтальпию**  
 $H = U + pV$   
 $Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$
- Важные отношения:  
 $Q_p = \Delta H, (p = \text{const})$   
 $Q_v = \Delta U, (V = \text{const}, \Delta V = 0)$
- Результаты измерений ( $Q$ ) не зависят от способа проведения реакции, ведь  $U$  и  $H$  – функции состояния!

# Первый закон термодинамики

- Изменение внутренней энергии системы происходит за счёт переданной ей теплоты ( $Q$ ) и работы системы ( $A$ ):

$$\Delta U = Q - A$$

- Процесс можно провести таким образом, что единственной работой будет работа расширения:  $A = p\Delta V$
- Тогда 1-й закон термодинамики запишется так:  
 $Q_p = \Delta U + p\Delta V, (p = \text{const})$
- Введём новую функцию состояния – **энтальпию**  
 $H = U + pV$   
 $Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$
- Важные отношения:  
 $Q_p = \Delta H, (p = \text{const})$   
 $Q_v = \Delta U, (V = \text{const}, \Delta V = 0)$
- Результаты измерений ( $Q$ ) не зависят от способа проведения реакции, ведь  $U$  и  $H$  – функции состояния!

# Первый закон термодинамики

- Изменение внутренней энергии системы происходит за счёт переданной ей теплоты ( $Q$ ) и работы системы ( $A$ ):

$$\Delta U = Q - A$$

- Процесс можно провести таким образом, что единственной работой будет работа расширения:  $A = p\Delta V$

- Тогда 1-й закон термодинамики запишется так:

$$Q_p = \Delta U + p\Delta V, (p = \text{const})$$

- Введём новую функцию состояния – **энтальпию**

$$H = U + pV$$

$$Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$$

- Важные отношения:

$$Q_p = \Delta H, (p = \text{const})$$

$$Q_v = \Delta U, (V = \text{const}, \Delta V = 0)$$

- Результаты измерений ( $Q$ ) не зависят от способа проведения реакции, ведь  $U$  и  $H$  – функции состояния!

# Первый закон термодинамики

- Изменение внутренней энергии системы происходит за счёт переданной ей теплоты ( $Q$ ) и работы системы ( $A$ ):

$$\Delta U = Q - A$$

- Процесс можно провести таким образом, что единственной работой будет работа расширения:  $A = p\Delta V$

- Тогда 1-й закон термодинамики запишется так:

$$Q_p = \Delta U + p\Delta V, (p = \text{const})$$

- Введём новую функцию состояния – **энтальпию**

$$H = U + pV$$

$$Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$$

- Важные отношения:

$$Q_p = \Delta H, (p = \text{const})$$

$$Q_v = \Delta U, (V = \text{const}, \Delta V = 0)$$

- Результаты измерений ( $Q$ ) не зависят от способа проведения реакции, ведь  $U$  и  $H$  – функции состояния!

# Первый закон термодинамики

- Изменение внутренней энергии системы происходит за счёт переданной ей теплоты ( $Q$ ) и работы системы ( $A$ ):

$$\Delta U = Q - A$$

- Процесс можно провести таким образом, что единственной работой будет работа расширения:  $A = p\Delta V$

- Тогда 1-й закон термодинамики запишется так:

$$Q_p = \Delta U + p\Delta V, (p = \text{const})$$

- Введём новую функцию состояния – **энтальпию**

$$H = U + pV$$

$$Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$$

- Важные отношения:

$$Q_p = \Delta H, (p = \text{const})$$

$$Q_v = \Delta U, (V = \text{const}, \Delta V = 0)$$

- Результаты измерений ( $Q$ ) не зависят от способа проведения реакции, ведь  $U$  и  $H$  – функции состояния!

# Первый закон термодинамики

- Изменение внутренней энергии системы происходит за счёт переданной ей теплоты ( $Q$ ) и работы системы ( $A$ ):

$$\Delta U = Q - A$$

- Процесс можно провести таким образом, что единственной работой будет работа расширения:  $A = p\Delta V$

- Тогда 1-й закон термодинамики запишется так:

$$Q_p = \Delta U + p\Delta V, (p = \text{const})$$

- Введём новую функцию состояния – **энтальпию**

$$H = U + pV$$

$$Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$$

- Важные отношения:

$$Q_p = \Delta H, (p = \text{const})$$

$$Q_v = \Delta U, (V = \text{const}, \Delta V = 0)$$

- Результаты измерений ( $Q$ ) не зависят от способа проведения реакции, ведь  $U$  и  $H$  – функции состояния!

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения



# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения



# Применение энтальпии

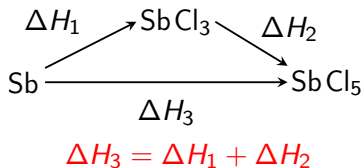
- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

# Применение энтальпии

- Запись уравнений в термохимии и термодинамике
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 476 \text{ кДж}$
  - $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(g)}, \Delta H = -476 \text{ кДж}$
- $\Delta H$  – тепловой эффект реакции определяет ее тип:
  - $\Delta H > 0$  – эндотермическая (теплота поглощается)
  - $\Delta H < 0$  – экзотермическая (теплота выделяется)
- Стандартная энтальпия образования  $\Delta H_f^\circ$ 
  - $\Delta H$  реакции получения 1 моль вещества из простых веществ:  $0,5\text{H}_{2(g)} + 0,5\text{I}_{2(g)} = \text{HI}_{(g)}, \Delta H_f^\circ(\text{HI}) = -5,19 \text{ кДж}$
  - устойчивых при стандартных условиях (ст.у.)  
 $T = 298 \text{ К}, P = 101,3 \text{ кПа}$
  - $[H] = \text{кДж}$  – размерность энтальпии
  - $\Delta H_f^\circ$  простых веществ при ст.у. равны 0
  - $\Delta H_f^\circ, \text{кДж/моль}$  – мера устойчивости соединения

## Закон Гесса

- $\Delta H$  реакции не зависит от пути ее протекания, а зависит лишь от природы и состояния ее участников



Два возможных пути:

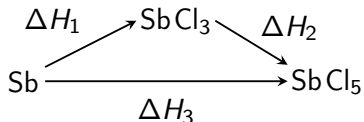
1.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_5$
2.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_3 \rightarrow \text{SbCl}_5$

Результат ( $\Delta H$ ) не зависит от выбора!

- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$ 
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = c\Delta H_f^\circ(C) + d\Delta H_f^\circ(D) - a\Delta H_f^\circ(A) - b\Delta H_f^\circ(B)$
  - $\Delta H_f^\circ$  веществ – табличные величины! При необходимости их можно найти даже в Internet.

## Закон Гесса

- $\Delta H$  реакции не зависит от пути ее протекания, а зависит лишь от природы и состояния ее участников



$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

Два возможных пути:

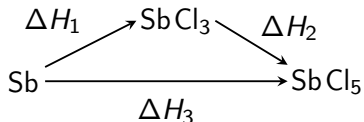
1.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_5$
2.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_3 \rightarrow \text{SbCl}_5$

Результат ( $\Delta H$ ) не зависит от выбора!

- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$ 
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = c\Delta H_f^\circ(C) + d\Delta H_f^\circ(D) - a\Delta H_f^\circ(A) - b\Delta H_f^\circ(B)$
  - $\Delta H_f^\circ$  веществ – табличные величины! При необходимости их можно найти даже в [Internet](#).

# Закон Гесса

- $\Delta H$  реакции не зависит от пути ее протекания, а зависит лишь от природы и состояния ее участников



$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

Два возможных пути:

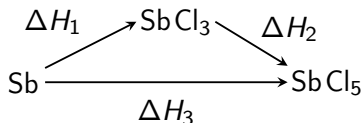
1.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_5$
2.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_3 \rightarrow \text{SbCl}_5$

Результат ( $\Delta H$ ) не зависит от выбора!

- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$ 
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = c\Delta H_f^\circ(\text{C}) + d\Delta H_f^\circ(\text{D}) - a\Delta H_f^\circ(\text{A}) - b\Delta H_f^\circ(\text{B})$
  - $\Delta H_f^\circ$  веществ – табличные величины! При необходимости их можно найти даже в [Internet](#).

## Закон Гесса

- $\Delta H$  реакции не зависит от пути ее протекания, а зависит лишь от природы и состояния ее участников



$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

Два возможных пути:

1.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_5$
2.  $\text{Sb} \rightarrow \text{SbCl}_3 \rightarrow \text{SbCl}_5$

Результат ( $\Delta H$ ) не зависит от выбора!

- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$ 
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = c\Delta H_f^\circ(C) + d\Delta H_f^\circ(D) - a\Delta H_f^\circ(A) - b\Delta H_f^\circ(B)$
  - $\Delta H_f^\circ$  веществ – табличные величины! При необходимости их можно найти даже в [Internet](#).

# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией**  $S$ . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q/T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - мера неупорядоченности системы, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)

# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией  $S$** . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q / T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - мера неупорядоченности системы, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)



# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией**  $S$ . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q/T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - мера неупорядоченности системы, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)

# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией**  $S$ . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q/T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - мера неупорядоченности системы, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)

# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией  $S$** . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q/T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - мера неупорядоченности системы, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)

# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией  $S$** . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q/T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - **мера неупорядоченности системы**, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)

# Энтропия

- Второй закон термодинамики содержит информацию про направление возможного протекания процесса
- Математически эта информация связана с новой функцией состояния **энтропией**  $S$ . Существует 2 определения энтропии:
  - $dS = \delta Q/T$  – макроскопическое определение
  - $S = k_B \ln W$  – микроскопическое определение (Больцман!)
- Физический смысл энтропии:
  - мера неупорядоченности системы, ведь с  $S$  связана теплота  $Q$
  - увеличение энтропии может происходить без передачи теплоты за счёт перемешивания веществ (увеличение  $W$ !)

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_T < S_{ж} \ll S_{г}$
  - $S^\circ$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^\circ \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^\circ$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{p-ции} = cS^\circ(C) + dS^\circ(D) - aS^\circ(A) - bS^\circ(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{p-ции}$  можно оценить:**  
 $2\text{SO}_{2(г)} + \text{O}_{2(г)} = 2\text{SO}_{3(г)},$   
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{p-ции} < 0$

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_T < S_{ж} \ll S_{г}$
  - $S^\circ$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^\circ \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^\circ$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{Дж}{\text{моль} \cdot К}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{p-ции} = cS^\circ(C) + dS^\circ(D) - aS^\circ(A) - bS^\circ(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{p-ции}$  можно оценить:**  
 $2SO_{2(г)} + O_{2(г)} = 2SO_{3(г)},$   
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{p-ции} < 0$

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_{\text{т}} < S_{\text{ж}} \ll S_{\text{г}}$
  - $S^{\circ}$  – энтропия вещества при стандартных условиях
    - для простых веществ  $S^{\circ} \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^{\circ}$ )
    - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
    - $[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = cS^{\circ}(C) + dS^{\circ}(D) - aS^{\circ}(A) - bS^{\circ}(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  можно оценить:**  
 $2\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{SO}_{3(\text{г})}$ ,  
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{\text{р-ции}} < 0$



# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_{\text{т}} < S_{\text{ж}} \ll S_{\text{г}}$
  - $S^{\circ}$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^{\circ} \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^{\circ}$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = cS^{\circ}(C) + dS^{\circ}(D) - aS^{\circ}(A) - bS^{\circ}(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  можно оценить:**  
 $2\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{SO}_{3(\text{г})}$ ,  
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{\text{р-ции}} < 0$

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_{\text{т}} < S_{\text{ж}} \ll S_{\text{г}}$
  - $S^{\circ}$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^{\circ} \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^{\circ}$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = cS^{\circ}(C) + dS^{\circ}(D) - aS^{\circ}(A) - bS^{\circ}(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  можно оценить:**  
 $2\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{SO}_{3(\text{г})}$ ,  
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{\text{р-ции}} < 0$

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_T < S_{ж} \ll S_{г}$
  - $S^\circ$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^\circ \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^\circ$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{Дж}{\text{моль} \cdot К}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{p-ции} = cS^\circ(C) + dS^\circ(D) - aS^\circ(A) - bS^\circ(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{p-ции}$  можно оценить:**  
 $2SO_{2(г)} + O_{2(г)} = 2SO_{3(г)},$   
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{p-ции} < 0$

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_T < S_{ж} \ll S_{г}$
  - $S^\circ$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^\circ \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^\circ$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{Дж}{\text{моль} \cdot К}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{p-ции} = cS^\circ(C) + dS^\circ(D) - aS^\circ(A) - bS^\circ(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{p-ции}$  можно оценить:**  
 $2SO_{2(г)} + O_{2(г)} = 2SO_{3(г)},$   
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{p-ции} < 0$

# Свойства энтропии

- Что нужно ещё знать про энтропию:
  - $S_T < S_{ж} \ll S_r$
  - $S^\circ$  – энтропия вещества при стандартных условиях
  - для простых веществ  $S^\circ \neq 0$  (в отличие от  $\Delta H_f^\circ$ )
  - $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$
  - $[S] = \frac{Дж}{\text{моль} \cdot К}$  – размерность отличается от  $H$
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta S_{p-ции} = cS^\circ(C) + dS^\circ(D) - aS^\circ(A) - bS^\circ(B)$
- Иногда **знак  $\Delta S_{p-ции}$  можно оценить:**  
 $2SO_{2(г)} + O_{2(г)} = 2SO_{3(г)},$   
 3 моль газов  $\rightarrow$  2 моль  
 Газов становится меньше, значит  $\Delta S_{p-ции} < 0$

# Второй закон термодинамики



Невозможно протекание процесса, единственным результатом которого являлась бы передача тепла от более холодного тела к более горячему.

В изолированной системе самопроизвольно может протекать только процесс, для которого  $\Delta S > 0$ .

# Направление протекания процессов

- Принцип минимума энергии: любая система **самопроизвольно** стремится минимизировать свою энергию
- Два пути уменьшения энергии системы:
  - образование более прочных связей; это соответствует понижению энтальпии ( $\Delta H_{p-ции} < 0$ )
  - увеличение хаотичности в системе – повышение энтропии ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Пример: образование идеального раствора ( $\Delta H_{p-ции} = 0$ ) связано исключительно с энтропийным фактором ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Для большинства реальных систем нужно учитывать оба фактора

# Направление протекания процессов

- Принцип минимума энергии: любая система **самопроизвольно** стремится минимизировать свою энергию
- Два пути уменьшения энергии системы:
  - образование более прочных связей; это соответствует понижению энтальпии ( $\Delta H_{p-ции} < 0$ )
  - увеличение хаотичности в системе – повышение энтропии ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Пример: образование идеального раствора ( $\Delta H_{p-ции} = 0$ ) связано исключительно с энтропийным фактором ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Для большинства реальных систем нужно учитывать оба фактора



# Направление протекания процессов

- Принцип минимума энергии: любая система **самопроизвольно** стремится минимизировать свою энергию
- Два пути уменьшения энергии системы:
  - образование более прочных связей; это соответствует понижению энтальпии ( $\Delta H_{p-ции} < 0$ )
  - увеличение хаотичности в системе – повышение энтропии ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Пример: образование идеального раствора ( $\Delta H_{p-ции} = 0$ ) связано исключительно с энтропийным фактором ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Для большинства реальных систем нужно учитывать оба фактора

# Направление протекания процессов

- Принцип минимума энергии: любая система **самопроизвольно** стремится минимизировать свою энергию
- Два пути уменьшения энергии системы:
  - образование более прочных связей; это соответствует понижению энтальпии ( $\Delta H_{p-ции} < 0$ )
  - увеличение хаотичности в системе – повышение энтропии ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Пример: образование идеального раствора ( $\Delta H_{p-ции} = 0$ ) связано исключительно с энтропийным фактором ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Для большинства реальных систем нужно учитывать оба фактора

# Направление протекания процессов

- Принцип минимума энергии: любая система **самопроизвольно** стремится минимизировать свою энергию
- Два пути уменьшения энергии системы:
  - образование более прочных связей; это соответствует понижению энтальпии ( $\Delta H_{p-ции} < 0$ )
  - увеличение хаотичности в системе – повышение энтропии ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Пример: образование идеального раствора ( $\Delta H_{p-ции} = 0$ ) связано исключительно с энтропийным фактором ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Для большинства реальных систем нужно учитывать оба фактора

# Направление протекания процессов

- Принцип минимума энергии: любая система **самопроизвольно** стремится минимизировать свою энергию
- Два пути уменьшения энергии системы:
  - образование более прочных связей; это соответствует понижению энтальпии ( $\Delta H_{p-ции} < 0$ )
  - увеличение хаотичности в системе – повышение энтропии ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Пример: образование идеального раствора ( $\Delta H_{p-ции} = 0$ ) связано исключительно с энтропийным фактором ( $\Delta S_{p-ции} > 0$ )
- Для большинства реальных систем нужно учитывать оба фактора

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   

$$\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$



# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$ 

$$\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$   
 $\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Функция Гиббса

- Функция Гиббса  $G$  (изобарно-изотермический потенциал) включает  $H$  и  $S$ 
  - $G = H - TS$ ,  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$
  - $\Delta G_f^\circ = 0$  для простых веществ
  - $[G] = \text{кДж/моль}$
  - $\Delta G_{p-ции}$  – максимальная полезная работа процесса
- Для реакции  $aA + bB = cC + dD$ 

$$\Delta G_{p-ции} = c\Delta G_f^\circ(C) + d\Delta G_f^\circ(D) - a\Delta G_f^\circ(A) - b\Delta G_f^\circ(B)$$
- Критерий самопроизвольности протекания процесса
  - В изолированной системе:  $\Delta S_{p-ции} > 0$
  - В закрытой системе без выделения газов:  $\Delta H_{p-ции} < 0$
  - В открытой системе:  $\Delta G_{p-ции} < 0$

# Анализ влияния $T$

- Открытые системы наиболее важны для химии
- $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T \Delta S_{p-ции}$  – линейная зависимость
- Для построения требуется 2 точки
  - $A(0, \Delta H_{p-ции})$
  - $B(T_p, 0)$ , где  $T_p = \Delta H_{p-ции} / \Delta S_{p-ции}$   
 $T_p$  – равновесная температура ( $\Delta G_{p-ции}(T_p) = 0$ )

# Анализ влияния $T$

- Открытые системы наиболее важны для химии
- $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$  – линейная зависимость
- Для построения требуется 2 точки
  - $A(0, \Delta H_{p-ции})$
  - $B(T_p, 0)$ , где  $T_p = \Delta H_{p-ции} / \Delta S_{p-ции}$   
 $T_p$  – равновесная температура ( $\Delta G_{p-ции}(T_p) = 0$ )



# Анализ влияния $T$

- Открытые системы наиболее важны для химии
- $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T \Delta S_{p-ции}$  – линейная зависимость
- Для построения требуется 2 точки
  - $A(0, \Delta H_{p-ции})$
  - $B(T_p, 0)$ , где  $T_p = \Delta H_{p-ции} / \Delta S_{p-ции}$   
 $T_p$  – равновесная температура ( $\Delta G_{p-ции}(T_p) = 0$ )





# Задача 1

При сжигании графита образовался оксид углерода (IV) массой 8,86 г. Вычислите энтальпию образования  $\text{CO}_2$  из элементов, если  $\Delta H_{p-ции} = -79,2$  кДж.

- Энтальпией образования  $\text{CO}_2$  является тепловой эффект такой реакции



- Зная количество теплоты, связанное с определенной массой продукта, можно вычислить количество теплоты, связанное с 1 молем продукта:



- Ответ:  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,3$  кДж/моль.

# Задача 1

При сжигании графита образовался оксид углерода (IV) массой 8,86 г. Вычислите энтальпию образования  $\text{CO}_2$  из элементов, если  $\Delta H_{p-ции} = -79,2$  кДж.

- Энтальпией образования  $\text{CO}_2$  является тепловой эффект такой реакции
  - $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ . Т.е. количество теплоты, выделяющееся при образовании 1 моль  $\text{CO}_2$  и будет величиной  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)$ .
- Зная количество теплоты, связанное с определенной массой продукта, можно вычислить количество теплоты, связанное с 1 молем продукта:
  - $$\frac{8,86}{-79,2} = \frac{44}{\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)}, \quad \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = \frac{-79,2 \cdot 44}{8,86} = -393,3 \text{ кДж/моль.}$$
- Ответ:  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,3$  кДж/моль.

# Задача 1

При сжигании графита образовался оксид углерода (IV) массой 8,86 г. Вычислите энтальпию образования  $\text{CO}_2$  из элементов, если  $\Delta H_{p-ции} = -79,2$  кДж.

- Энтальпией образования  $\text{CO}_2$  является тепловой эффект такой реакции
  - $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ . Т.е. количество теплоты, выделяющееся при образовании 1 моль  $\text{CO}_2$  и будет величиной  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)$ .
- Зная количество теплоты, связанное с определенной массой продукта, можно вычислить количество теплоты, связанное с 1 молем продукта:

$$\bullet \frac{8,86}{-79,2} = \frac{44}{\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)}, \quad \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = \frac{-79,2 \cdot 44}{8,86} = -393,3 \text{ кДж/моль.}$$

- Ответ:  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,3$  кДж/моль.

# Задача 1

При сжигании графита образовался оксид углерода (IV) массой 8,86 г. Вычислите энтальпию образования  $\text{CO}_2$  из элементов, если  $\Delta H_{p-ции} = -79,2$  кДж.

- Энтальпией образования  $\text{CO}_2$  является тепловой эффект такой реакции
  - $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ . Т.е. количество теплоты, выделяющееся при образовании 1 моль  $\text{CO}_2$  и будет величиной  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)$ .
- Зная количество теплоты, связанное с определенной массой продукта, можно вычислить количество теплоты, связанное с 1 молем продукта:

$$\bullet \frac{8,86}{-79,2} = \frac{44}{\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)}, \quad \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = \frac{-79,2 \cdot 44}{8,86} = -393,3 \text{ кДж/моль.}$$

- Ответ:  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,3$  кДж/моль.

# Задача 1

При сжигании графита образовался оксид углерода (IV) массой 8,86 г. Вычислите энтальпию образования  $\text{CO}_2$  из элементов, если  $\Delta H_{p-ции} = -79,2$  кДж.

- Энтальпией образования  $\text{CO}_2$  является тепловой эффект такой реакции
  - $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ . Т.е. количество теплоты, выделяющееся при образовании 1 моль  $\text{CO}_2$  и будет величиной  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)$ .
- Зная количество теплоты, связанное с определенной массой продукта, можно вычислить количество теплоты, связанное с 1 молем продукта:
  - $$\frac{8,86}{-79,2} = \frac{44}{\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)}, \quad \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = \frac{-79,2 \cdot 44}{8,86} = -393,3 \text{ кДж/моль.}$$
- Ответ:  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,3$  кДж/моль.



# Задача 1

При сжигании графита образовался оксид углерода (IV) массой 8,86 г. Вычислите энтальпию образования  $\text{CO}_2$  из элементов, если  $\Delta H_{p-ции} = -79,2$  кДж.

- Энтальпией образования  $\text{CO}_2$  является тепловой эффект такой реакции
  - $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ . Т.е. количество теплоты, выделяющееся при образовании 1 моль  $\text{CO}_2$  и будет величиной  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)$ .
- Зная количество теплоты, связанное с определенной массой продукта, можно вычислить количество теплоты, связанное с 1 молем продукта:
  - $$\frac{8,86}{-79,2} = \frac{44}{\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2)}, \quad \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = \frac{-79,2 \cdot 44}{8,86} = -393,3 \text{ кДж/моль.}$$
- Ответ:  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,3$  кДж/моль.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:

- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$$
 – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
• $\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла)
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла!).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
• $\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла!).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.



## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла!).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 2. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_2$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $\text{PbS} + \text{PbO}_2 = 2\text{Pb} + \text{SO}_2$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{\text{р-ции}} < 0$ .  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$ :  

$$\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta H_{\text{р-ции}} - T \Delta S_{\text{р-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	PbS	PbO <sub>2</sub>	Pb	SO <sub>2</sub>
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-100,4	-276,6	0	-296,9
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	91,2	74,9	64,8	248,1

- Вычисление  $\Delta H_{\text{р-ции}}$  и  $\Delta S_{\text{р-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{\text{р-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Pb}) + \Delta H_f^\circ(\text{SO}_2) - \Delta H_f^\circ(\text{PbS}) - \Delta H_f^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta H_{\text{р-ции}} = 0 - 296,9 + 100,4 + 276,6 = 80,1$  кДж (выделение тепла!).
  - $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2S^\circ(\text{Pb}) + S^\circ(\text{SO}_2) - S^\circ(\text{PbS}) - S^\circ(\text{PbO}_2)$ ;  
 $\Delta S_{\text{р-ции}} = 2 \cdot 64,8 + 248,1 - 91,2 - 74,9 = 211,6$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} = 80,1 - 298 \cdot 211,6/1000 = 17$  кДж;  
 $\Delta G_{\text{р-ции}} > 0$  – самопроизвольное протекание реакции невозможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p-ции}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p-ции} < 0$ .  
 $\Delta G_{p-ции}$  вычисляется через  $\Delta H_{p-ции}$  и  $\Delta S_{p-ции}$ :  

$$\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T \Delta S_{p-ции}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

- Вычисление  $\Delta H_{p-ции}$  и  $\Delta S_{p-ции}$  проводится по одинаковой схеме:

- $\Delta H_{p-ции} = \sum \nu_i \Delta H_{f,i}^\circ(\text{продукты}) - \sum \nu_j \Delta H_{f,j}^\circ(\text{реагенты})$

- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p-ции}$  и сделать вывод:  

$$\Delta G_{p-ции} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8 \text{ кДж}$$

$$\Delta G_{p-ции} < 0$$
 – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ :  
 $\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4$  кДж (теплота выделяется).
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ :  
 $\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8$  кДж:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$  – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ :  

$$\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4 \text{ кДж (теплота выделяется)}$$
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ :  

$$\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0 \text{ Дж/К}$$
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8 \text{ кДж}$$
  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$$
 – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
• $\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ :  
 $\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4$  кДж (теплота выделяется).
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ :  
 $\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8$  кДж:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$  – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T \Delta S_{p\text{-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
• $\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ :  

$$\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4 \text{ кДж (теплота выделяется)}$$
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ :  

$$\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0 \text{ Дж/К}$$
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8 \text{ кДж}$$
  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$$
 – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
• $\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4$  кДж (теплота выделяется).
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8$  кДж;  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$  – самопроизвольное протекание реакции возможно.



## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T \Delta S_{p\text{-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4$  кДж (теплота выделяется).
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8$  кДж;  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$  – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T \Delta S_{p\text{-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4$  кДж (теплота выделяется).
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8$  кДж;  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$  – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Коэффициенты в уравнении реакции:  $4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .
- Возможность протекания процесса определяется условием  $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$ .  
 $\Delta G_{p\text{-ции}}$  вычисляется через  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$ :  

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T \Delta S_{p\text{-ции}}$$
- Используем табличные значения  $\Delta H_f^\circ$  и  $S^\circ$  для участников реакции:

	HCl	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	-91,8	0	0	-241,8
$S^\circ$ , Дж/(моль·К)	186,8	205,0	111,9	188,7

- Вычисление  $\Delta H_{p\text{-ции}}$  и  $\Delta S_{p\text{-ции}}$  проводится по одинаковой схеме:
  - $\Delta H_{p\text{-ции}} = 2\Delta H_f^\circ(\text{Cl}_2) + 2\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H_f^\circ(\text{HCl}) - \Delta H_f^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta H_{p\text{-ции}} = 0 - 483,6 + 367,2 - 0 = -116,4$  кДж (теплота выделяется).
  - $\Delta S_{p\text{-ции}} = 2S^\circ(\text{Cl}_2) + 2S^\circ(\text{H}_2\text{O}) - 4S^\circ(\text{HCl}) - S^\circ(\text{O}_2)$ ;  
 $\Delta S_{p\text{-ции}} = 223,8 + 377,4 - 747,2 - 205,0 = -351,0$  Дж/К.
- Далее можно вычислить значение  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  и сделать вывод:  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} = -116,4 - 298 \cdot (-351,0)/1000 = -11,8$  кДж;  
 $\Delta G_{p\text{-ции}} < 0$  – самопроизвольное протекание реакции возможно.

## Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p-ции}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Установлено, что  $\Delta H_{p-ции} = -116,4$  кДж и  $\Delta S_{p-ции} = -351,0$  Дж/К.
- Равновесная температура соответствует условию  $\Delta G_{p-ции} = 0$ :  

$$\Delta G_{p-ции} = 0 \Rightarrow \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции} = 0; T_p = \frac{\Delta H_{p-ции}}{\Delta S_{p-ции}}$$

$$T_p = -116,4 / (-0,351) = 331,6 \text{ К.}$$
- Зависимость  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$  является прямойлинейной в координатах  $(T, \Delta G)$ :



Реакция может протекать самопроизвольно при  $T < 331,6$  К, т.к. в этой области температур (отмечена цветом)  $\Delta G < 0$ .

# Задача 3. Термодинамические расчеты

Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

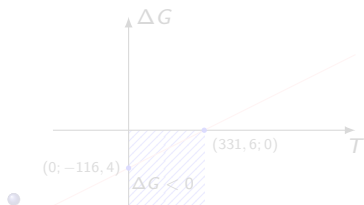
- Установлено, что  $\Delta H_{p\text{-ции}} = -116,4$  кДж и  $\Delta S_{p\text{-ции}} = -351,0$  Дж/К.

- Равновесная температура соответствует условию  $\Delta G_{p\text{-ции}} = 0$ :

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = 0 \Rightarrow \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}} = 0; T_p = \frac{\Delta H_{p\text{-ции}}}{\Delta S_{p\text{-ции}}}$$

$$T_p = -116,4 / (-0,351) = 331,6 \text{ К.}$$

- Зависимость  $\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$  является прямолинейной в координатах  $(T, \Delta G)$ :



Реакция может протекать самопроизвольно при  $T < 331,6$  К, т.к. в этой области температур (отмечена цветом)  $\Delta G < 0$ .

# Задача 3. Термодинамические расчеты

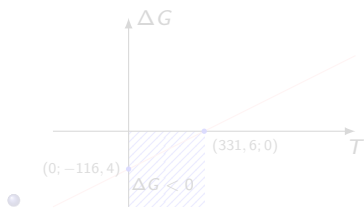
Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p-ции}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Установлено, что  $\Delta H_{p-ции} = -116,4$  кДж и  $\Delta S_{p-ции} = -351,0$  Дж/К.
- Равновесная температура соответствует условию  $\Delta G_{p-ции} = 0$ :

$$\Delta G_{p-ции} = 0 \Rightarrow \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции} = 0; T_p = \frac{\Delta H_{p-ции}}{\Delta S_{p-ции}}.$$

$$T_p = -116,4 / (-0,351) = 331,6 \text{ К.}$$

- Зависимость  $\Delta G_{p-ции} = \Delta H_{p-ции} - T\Delta S_{p-ции}$  является прямойлинейной в координатах  $(T, \Delta G)$ :



Реакция может протекать самопроизвольно при  $T < 331,6$  К, т.к. в этой области температур (отмечена цветом)  $\Delta G < 0$ .

## Задача 3. Термодинамические расчеты

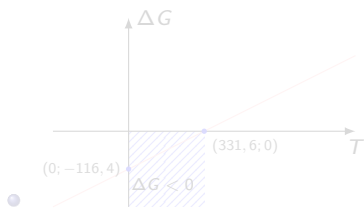
Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Установлено, что  $\Delta H_{p\text{-ции}} = -116,4$  кДж и  $\Delta S_{p\text{-ции}} = -351,0$  Дж/К.
- Равновесная температура соответствует условию  $\Delta G_{p\text{-ции}} = 0$ :

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = 0 \Rightarrow \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}} = 0; T_p = \frac{\Delta H_{p\text{-ции}}}{\Delta S_{p\text{-ции}}}$$

$$T_p = -116,4 / (-0,351) = 331,6 \text{ К.}$$

- Зависимость  $\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$  является прямойлинейной в координатах  $(T, \Delta G)$ :



Реакция может протекать самопроизвольно при  $T < 331,6$  К, т.к. в этой области температур (отмечена цветом)  $\Delta G < 0$ .

# Задача 3. Термодинамические расчеты

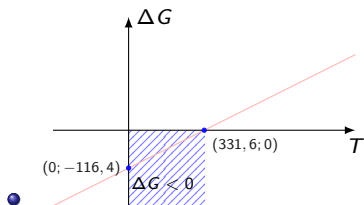
Возможно ли протекание процесса  $\text{HCl}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} \rightarrow \text{Cl}_{2(r)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)}$  при стандартных условиях? При какой температуре система могла бы находиться в состоянии равновесия? Приведите график зависимости  $\Delta G_{p\text{-ции}}$  от температуры и дайте соответствующие пояснения.

- Установлено, что  $\Delta H_{p\text{-ции}} = -116,4$  кДж и  $\Delta S_{p\text{-ции}} = -351,0$  Дж/К.
- Равновесная температура соответствует условию  $\Delta G_{p\text{-ции}} = 0$ :

$$\Delta G_{p\text{-ции}} = 0 \Rightarrow \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}} = 0; T_p = \frac{\Delta H_{p\text{-ции}}}{\Delta S_{p\text{-ции}}}.$$

$$T_p = -116,4 / (-0,351) = 331,6 \text{ К.}$$

- Зависимость  $\Delta G_{p\text{-ции}} = \Delta H_{p\text{-ции}} - T\Delta S_{p\text{-ции}}$  является прямолинейной в координатах  $(T, \Delta G)$ :



Реакция может протекать самопроизвольно при  $T < 331,6$  К, т.к. в этой области температур (отмечена цветом)  $\Delta G < 0$ .