



УДК 543

Составитель: Бурыкина О.В.

Рецензент:

Кандидат химических наук, доцент Кувардин Н.В.

**Химическая термодинамика:** методические указания по выполнению лабораторных и самостоятельной работ по дисциплине «Неорганическая химия» для направления подготовки 04.03.01 Химия / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Бурыкина О.В., Курск, 2019, 63с.: 3 ил., табл. Библиогр.: 63с.

Излагаются основные теоретические положения по теме «Химическая термодинамика». Приведены примеры решения задач по данному разделу химии, условия индивидуальных домашних заданий, описание лабораторных работ по данной теме. Предназначены для студентов направления 04.03.01 «Химия».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 22.07.19. Форма 60x84 1/16.  
Усл. Пес. Л. 3,3. Уч.-изд.л. 3,1. Тираж 50 экз. Заказ 534. Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Вопросы для самоподготовки.....	5
1. Система как объект изучения термодинамики.....	6
2. Внутренняя энергия. Тепловой эффект реакции.....	8
3. Термохимические расчеты.....	10
4. Энтропия.....	15
5. Направление протекания химического процесса в неизолированной системе. Энергия Гиббса.....	18
Лабораторная работа №1 Определение энтальпии гидратации .....	23
Лабораторная работа №2 Определение энтальпии реакции нейтрализации.....	27
Индивидуальные задания.....	28
Приложение.....	38
Таблица 1 Термодинамические характеристики некоторых неорганических веществ.....	38
Таблица 2 Термодинамические характеристики некоторых органических веществ.....	60
Таблица 3 Теплоты сгорания органических веществ в стандартных условиях.....	61
Литература.....	63

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания предназначены для студентов 1 курса спец. 04.03.01 «Химия», изучающих дисциплину «Неорганическая химия».

Цель методических указаний - научить студентов вести расчеты, связанные с расчетом тепловых эффектов реакции, прогнозировать возможность и определять условия протекания химического процесса.

Материал обучающей программы разбит на 5 разделов. В каждом разделе дан разбор решения типовых примеров.

Данные методические указания могут быть использованы для лабораторных работ, индивидуальной и аудиторной самостоятельной работы студентов, а так же в качестве пособия для внеаудиторной подготовки.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Что называется системой?
2. Виды систем и их отличительные особенности.
3. Что называется компонентами системы?
4. Как рассчитывается число независимых компонентов в системе?
5. Какие величины называются функциями состояния системы и почему?
6. Сформулируйте определение внутренней энергии.
7. С помощью каких параметров можно определить внутреннюю энергию? Дайте им определения.
8. Сформулируйте I-ый закон термодинамики и его приведите его математическое выражение.
9. Сформулируйте определение энтальпии.
10. Какое состояние системы называется стандартным?
11. Сформулируйте определение стандартной энтальпии.
12. Приведите отличительные признаки термохимических уравнений.
13. Сформулируйте закон Гесса и следствий из него.
14. Приведите уравнение, связывающее энтальпию и внутреннюю энергию.
14. Дайте определение понятия энтропии.
15. Дайте определение понятия термодинамическая вероятность
16. Приведите уравнение, связывающее термодинамическую вероятность и энтропию.
17. Сформулируйте III –ий закон термодинамики.
18. Как рассчитывается изменение энтропии в ходе протекания реакции? О чем нам говорит полученное значение  $\Delta S$ ?
19. Сформулируйте II закон термодинамики.
20. Что называется термодинамическим фактором протекания процесса? Как он рассчитывается в различных условиях?

## 1. Система - объект изучения термодинамики

Химическая термодинамика изучает энергетические эффекты химических процессов, даёт ответы на вопрос, возможно или нет самопроизвольное протекание реакций

Объектом изучения в термодинамике является система.

Система - это совокупность находящихся во взаимодействии веществ, мысленно или фактически обособленная от окружающей среды.

Это может быть и осколок кристалла и смесь газов в определенном объёме, и раствор в колбе и др. Система должна быть отделена от внешнего мира, как реально существующими, так и воображаемыми поверхностями раздела.

По способности к обмену с окружающим миром веществом и энергией различают системы 3-х типов:

1) изолированная - не обменивается ни веществом, ни энергией (в природе такие системы не существуют);

2) закрытая — обменивается только энергией (запаянная ампула с каким-либо веществом);

3) открытая - обменивается и веществом и энергией (открытая пробирка с веществом).

Химические вещества, входящие в состав системы, называются компонентами.

В химической системе число независимых компонентов (нез. комп.) равно числу содержащихся в ней веществ за вычетом числа реакций между ними.

Например, хранящийся на воздухе CaO можно рассматривать как химическую систему из-за взаимодействия CaO с водой и CO<sub>2</sub>.



Число нез. комп. = число веществ - число реакций = 5-2 = 3.

Термодинамические системы можно разделять на подсистемы, части.

В зависимости от того существуют ли между частями системы физические (реальные) границы системы делят на гомогенные и гетерогенные.

Гомогенная система одинакова по составу, структуре и, следовательно, по свойствам во всех своих микроучастках.

Свойства таких систем, находящихся в равновесии, либо одинаковы во всех её точках, либо изменяются монотонно (нескачко-

образно).

В этом случае говорят, что система состоит из одной фазы.

**Фаза** - часть системы, однородная во всех точках по составу и свойствам и отделенная от других частей системы поверхностью раздела.

В системе может быть газовая фаза - одна, жидкие фазы - одна или несколько и твёрдые фазы - одна или несколько.

**Гетерогенная система** состоит из нескольких фаз, разграниченных поверхностями раздела.

Для гетерогенных систем характерно резкое изменение свойств на границе раздела фаз.

В рассмотренном выше примере система 3-х компонентная, но 4-х фазная ( кристаллы CaO, кристаллы Ca(OH)<sub>2</sub>, кристаллы CaCO<sub>3</sub>, газовая смесь воды и углекислого газа).

В термодинамике свойства системы рассматриваются при её равновесном состоянии.

Термодинамическое состояние системы называют **равновесным**, если его термодинамические параметры одинаковы во всех точках системы, и не изменяются самопроизвольно (без затраты работы) во времени.

Одна и та же система может находиться в различных состояниях. Каждое состояние задаётся набором значений **термодинамических параметров**: температура, давление, массовый состав системы, плотности, концентрации и т.п. Каждому набору независимых переменных соответствует своя термодинамическая функция.

Переходы осуществляются очень медленно, при этом могут изменяться все параметры состояния системы, либо некоторые параметры остаются без изменения.

1)  $P = \text{const}$  - процесс изобарический

2)  $V = \text{const}$  - процесс изохорический

3)  $T = \text{const}$  - процесс изотермический

4)  $P = \text{const}, T = \text{const}$  - процесс изобарно-изотермический и

т.д.

Химические реакции обычно протекают при постоянном давлении (например, в открытой колбе) или при постоянном объеме (например, в автоклаве), т.е. являются соответственно изобарными или изохорными.

Термодинамические свойства системы можно выразить с по-

мощью нескольких функций состояния системы, называемых **характеристическими функциями**. К их особенностям относятся их независимость от способа (пути) достижения данного состояния системы. Их значения определяются состоянием системы, т.е.  $p$ ,  $T$  и др., они зависят от количества и массы вещества, поэтому их относят к 1 молю вещества.

К важнейшим величинам, характеризующим свойства системы, относятся: внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал).

## 2. Внутренняя энергия

**Внутренняя энергия ( $U$ ) системы** представляет собой её полную энергию, которая складывается из кинетической и потенциальной энергий молекул, атомов, атомных ядер, электронов, ионов и др. частиц, составляющих систему.

Внутреннюю энергию измерить нельзя. Но можно определить изменение внутренней энергии при переходе из одного состояния системы в другое:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (1),$$

где  $U_1$  и  $U_2$  - внутренняя энергия системы в начальном и конечном состояниях,

$\Delta U$  - изменение внутренней энергии в ходе химического процесса.

Если внутренняя энергия возрастает ( $\Delta U > 0$ ), то процесс сопровождается поглощением энергии из внешней среды (эндотермические реакции), если внутренняя энергия системы уменьшается ( $\Delta U < 0$ ), то реакция протекает с выделением энергии (экзотермические реакции).

Внутренняя энергия в макросистемах представляет собой способность системы к совершению работы или передаче теплоты, поэтому её можно измерить с помощью работы и теплоты, т.к. система может обмениваться с окружающей средой веществом и энергией в форме теплоты  $Q$  и работы  $A$ .

**Теплота  $Q$  (Дж)** является количественной мерой хаотического движения частиц данной системы и тела. Энергия более нагретого тела в форме теплоты передается менее нагретому телу. При этом не происходит переноса вещества от одной системы к другой или от одного тела к другому.



Работа  $A$  (Дж) является количественной мерой направленного движения частиц, мерой энергии, передаваемой от одной системы к другой за счет перемещения вещества от одной системы к другой под действием тех или иных сил, например, гравитационных.

Количественное соотношение между изменением внутренней энергией, теплотой и работой устанавливает I-ый закон термодинамики:

Теплота  $Q$ , подведённая к системе, расходуется на увеличение её внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение системой работы  $A$  над внешней средой.

$$Q = \Delta U + A \quad (2)$$

Для химических реакций под работой над внешней средой в основном подразумевается работа против внешнего давления - работа расширения при постоянном давлении она равна:

$$A = p \cdot \Delta V \quad (3),$$

где  $A$  - работа расширения; кДж/моль;

$p$  - давление, кПа;

$\Delta V$  - изменение объема системы при переходе из начального состояния системы в конечное, м<sup>3</sup>.

Если реакция протекает при постоянном объеме ( $\Delta V=0$ , изохорный процесс), то работа расширения системы равна нулю. Если при этом не совершаются и другие виды работы (например, электрическая), то  $\Delta U=Q_v$ , где  $Q_v$ -тепловой эффект реакции, протекающей при постоянном объеме. Для экзотермической реакции  $Q_v < 0$ ; для эндотермической реакции  $Q_v > 0$ .

При изобарном процессе ( $p=\text{const}$ ) тепловой эффект  $Q_p$  равен:

$$Q = \Delta U + p\Delta V \quad (4),$$

где  $Q$  - тепловой эффект реакции; кДж/моль;

$\Delta U$  - изменение внутренней энергии системы; кДж/моль;

$p \cdot \Delta V$  - работа расширения; кДж/моль.

С учётом того, что  $\Delta U = U_2 - U_1$  и  $\Delta V = V_2 - V_1$  уравнение (4.10) преобразуется в:

$$Q = (U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1) \quad (5)$$

Сумму  $(U+pV)$  называют энтальпией системы или энергосодержанием системы.

Изменение энтальпии ( $\Delta H$ ) - является мерой энергии, переданной от одного тела к другому, за счёт разницы температур этих тел. Измеряется энтальпия в кДж/моль.

$$Q = H_2 - H_1 = \Delta H \quad (6),$$

где  $H_2$  - энтальпия продуктов реакции, кДж/моль;

$H_1$  - энтальпия исходных веществ, кДж/моль;

$\Delta H$  - тепловой эффект реакции, кДж/моль.

**Тепловой эффект** или **энтальпия реакции** - это изменение энергии системы при протекании в ней химических реакций при условии, что система не совершает никакой другой работы кроме работы расширения.

Если теплота подводится к системе, реакцию называю **эндотермической** ( $\Delta H > 0$ ,  $\Delta U > 0$ ). Если теплота выделяется при реакции, её называют **экзотермической** ( $\Delta H < 0$ ,  $\Delta U < 0$ ).

Тепловой эффект реакции образования одного моля сложного вещества из простых веществ называется **энтальпией образования**  $\Delta H_{\text{обр}}$  данного вещества.

Если исходные вещества и продукты реакции находятся в стандартном состоянии, то тепловой эффект стандартной реакции обозначается  $\Delta H^0$ .

**Стандартное состояние** - реальное, состояние вещества при данной температуре и давлении 101,3 кПа (1атм) в термодинамически устойчивых при данной температуре фазах и модификациях. Для растворов стандартная концентрация 1 моль/л. Стандартное состояние вещества может быть определено для любой температуры, но стандартной является температура 298,16 К (25<sup>0</sup>С).

**Стандартной энтальпией (теплотой) образования химического соединения  $\Delta H^0_T$**  называется изменение энтальпии в процессе получения одного моля этого соединения, находящегося в стандартном состоянии, из простых веществ, стандартных при данной температуре (это величина справочная).

Стандартные энтальпии образования простых веществ принимают равными нулю, если их агрегатные состояния и модификации устойчивы при стандартных условиях.

Если графит - стандартное состояние углерода, то энтальпии образования других форм углерода отсчитываются от графита. Естественно, что энтальпия образования графита из графита равна нулю.

### 3 Термохимические расчеты

Раздел химии, изучающий тепловые эффекты химических ре-

акций, называется **термохимией**.

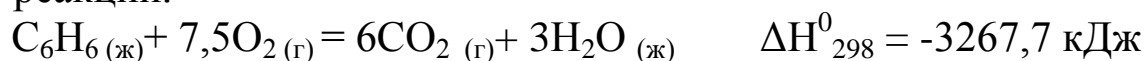
Уравнение химической реакции, в котором указан его тепловой эффект, называют **термохимическим уравнением**.

Термохимическое уравнение имеет три признака, которые отличают его от обычного химического:

1. В термохимическом уравнении указываются агрегатные состояния вещества, в скобках, нижним индексом, после вещества, например:  $\text{H}_2\text{O}_{(г)}$  или  $\text{H}_2\text{O}_{(л)}$  - газообразное,  $\text{H}_2\text{O}_{(ж)}$  - жидкое,  $\text{H}_2\text{O}_{(т)}$  или  $\text{H}_2\text{O}_{(кр)}$  - твердое состояния воды.

2. Термохимическое уравнение описывает реакцию между молями веществ, а не отдельными молекулами, поэтому в термохимических уравнениях допускаются дробные коэффициенты.

3. В термохимическом уравнении указывается тепловой эффект реакции.



В основе термохимических расчетов лежит **закон Гесса**:

*Тепловой эффект химической реакции не зависит от пути её протекания, а зависит лишь от природы и физического состояния исходных веществ и продуктов реакции.*

Закон Гесса хорошо иллюстрируется с помощью энтальпийных диаграмм.

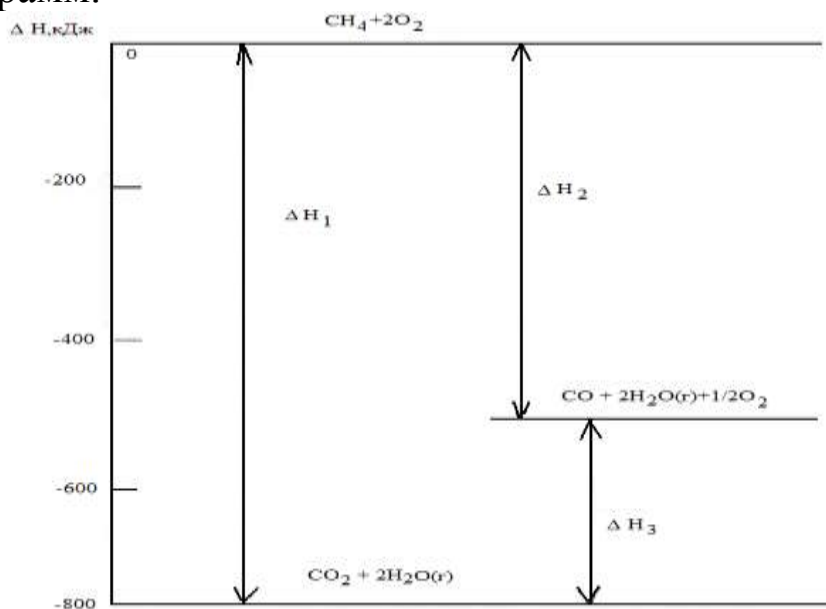


Рис. 1 Энтальпийная диаграмма реакции сгорания метана

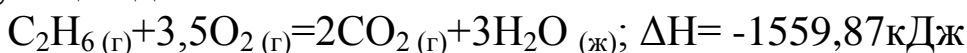
Как видно тепловой эффект реакции, протекающей по двум путям, одинаков:  $\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H_3$ .

В основе большинства термохимических расчетов лежит **следствие из закона Гесса**:

1) тепловой эффект химической реакции ( $\Delta H^0_{\text{х.р.}}$ ) равен сумме теплот (энтальпий) образования продуктов реакции ( $\Delta H^0_{\text{обр.прод.}}$ ) минус сумма теплот (энтальпий) образования исходных веществ ( $\Delta H^0_{\text{обр.исх.}}$ ) с учётом коэффициентов перед формулами этих веществ в уравнении реакции.

$$\Delta H^0_{\text{х.р.}} = \sum \Delta H^0_{\text{обр.прод.}} - \sum \Delta H^0_{\text{обр.исх.}} \quad (7)$$

**Пример 1:** Вычислить теплоту образования этана, исходя из следующих данных:



$$\Delta H^0_{\text{обр.}} \text{CO}_2(\text{г}) = -393,51 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta H^0_{\text{обр.}} \text{H}_2\text{O}(\text{ж}) = -285,84 \text{ кДж/моль.}$$

**РЕШЕНИЕ:**

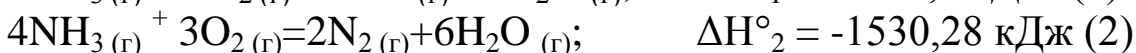
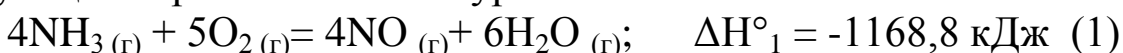
$\Delta H^0_{\text{обр.}} \text{O}_2 = 0$  кДж/моль (стандартное состояние простого вещества). Используем уравнение (7):

$$\Delta H^0_{\text{х.р.}} = (2\Delta H^0(\text{CO}_2(\text{г})) + 3\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}(\text{ж})) - (\Delta H^0(\text{C}_2\text{H}_6(\text{г})) + 3,5\Delta H^0(\text{O}_2(\text{г})))$$

$$-1559,87 = -2 \cdot 393,51 - 3 \cdot 285,84 - \Delta H^0_{\text{обр.}} \text{C}_2\text{H}_6(\text{г}) - 3,5 \cdot 0,$$

$$\Delta H^0_{\text{обр.}} \text{C}_2\text{H}_6(\text{г}) = 2 \cdot (-393,51) + 3 \cdot (-285,84) + 1559,89 = -84,65 \text{ кДж/моль}$$

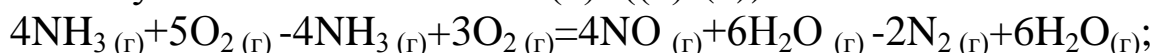
**Пример 2:** Вычислить теплоту образования NO, исходя из следующих термохимических уравнений:



**РЕШЕНИЕ:**

Энтальпия (теплота) образования химического соединения - это изменение энтальпии в процессе получения одного моля этого соединения простых веществ, т.е. нужно рассчитать тепловой эффект реакции:  $1/2\text{O}_2(\text{г}) + 1/2\text{N}_2(\text{г}) = \text{NO}(\text{г})$  (3). Для получения этого уравнения нужно:

$$(3) = ((1) - (2)) / 4$$



$$\Delta H^0_3 = (-1168,8 + 1530,28) / 4 = 90,37 \text{ кДж/моль}$$

Тепловые эффекты реакций очень мало изменяются с температурой. Поэтому при расчётах, даже при температурах далеко отстоящих от стандартной, можно пользоваться справочными данными стандартных теплот образования веществ.

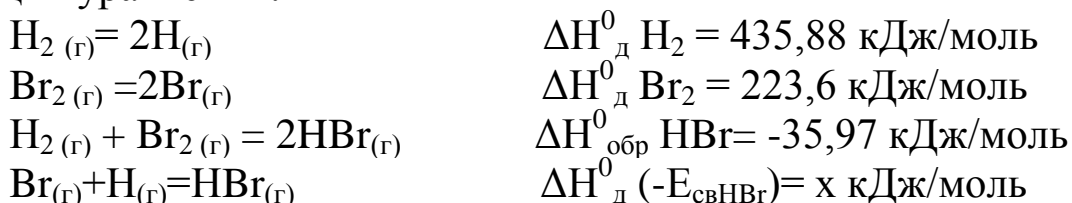
Т.к. энтальпия химической ( $\Delta H$ ) реакции возникает вследствие разрушения одних и образования других химических связей, то по известным значениям энергий химических связей можно рассчитать энтальпию реакции, а по энтальпии реакции диссоциации соединения на атомы - энергию связи.

**Пример 3** Рассчитать энергию химической связи в молекуле

HBr, если  $\Delta H^0_{\text{диссHBr}} = -35,97$  кДж.

**РЕШЕНИЕ:**

Если предположить, что процесс идет через стадию диссоциации исходных веществ и образование молекулы HBr (возникает химическая связь H-Br), то его можно записать с помощью следующих уравнений:



В соответствии с законом Гесса:

$$\begin{aligned} \Delta H^0_{\text{обр HBr}} &= 1/2 \Delta H^0_{\text{д}} \text{H}_2 + 1/2 \Delta H^0_{\text{д}} \text{Br}_2 + \Delta H^0_{\text{д}} \text{HBr} \\ \Delta H^0_{\text{д}} \text{HBr} &= \Delta H^0_{\text{д}} \text{HBr} - 1/2 \Delta H^0_{\text{д}} \text{H}_2 - 1/2 \Delta H^0_{\text{д}} \text{Br}_2 \\ \Delta H^0_{\text{д}} \text{HBr} &= -35,97 - 217,94 - 111,8 = -365,71 \text{ кДж/моль} \\ E_{\text{свHBr}} &= -\Delta H^0_{\text{д}} \text{HBr} = 365,71 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

Закон Гесса позволяет рассчитывать энергию кристаллической решетки, теплоту сгорания топлива, удельную теплоту сгорания веществ.

**Теплотой сгорания** какого-либо органического соединения называют то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 моля вещества.

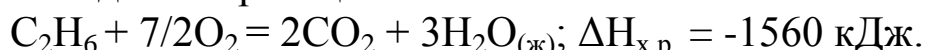
Зная теплоту сгорания органического вещества можно рассчитать теплоту образования этого вещества.

Теплота образования органического соединения равна разности между теплотой сгорания элементов, входящих в его состав, и теплотой сгорания данного соединения.

**Пример 4** Стандартный тепловой эффект реакции сгорания этана равен -1560 кДж. Рассчитайте стандартную теплоту образования этана, если известно, что  $\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) = -285,84$  кДж/моль;  $\Delta H(\text{CO}_2) = -396,3$  кДж/моль.

**РЕШЕНИЕ:**

Уравнение данной реакции:



В соответствии со следствием из закона Гесса:

$$\Delta H^0_{\text{сгор.}} = (2 \cdot \Delta H^0(\text{CO}_2) + 3 \cdot \Delta H^0(\text{H}_2\text{O})) - (\Delta H^0(\text{C}_2\text{H}_6) + 7/2 \Delta H^0(\text{O}_2)).$$

Откуда находим:

$$\Delta H^0(\text{C}_2\text{H}_6) = -\Delta H^0_{\text{сгор.}} + (2 \cdot \Delta H^0(\text{CO}_2) + 3 \cdot \Delta H^0(\text{H}_2\text{O})) =$$

$$\Delta H^0(\text{C}_2\text{H}_6) = 1560 + 2 \cdot (-396,3) + 3 \cdot (-285,84) = -90,12 \text{ кДж/моль.}$$

Удельная теплота сгорания  $Q_T$  равна количеству теплоты, выделяющейся при сгорании 1 кг жидкого или твердого вещества или 1 м<sup>3</sup> газообразного вещества до образования высших оксидов:

$$Q_T = - \Delta H^0_{\text{сгор}} \cdot 1000/M \quad (8),$$

где  $M$  – молярная масса

или

$$Q_T = \Delta H^0_{\text{сгор}} \cdot 1000/22,4 \quad (9),$$

где 22,4 – объём моля газа.

**Пример 5** Вычислите удельную теплоту сгорания газа, содержащего 80%  $H_2$  и 20%  $CH_4$ , если известны  $\Delta H^0_{\text{сгор. } H_2} = -268 \text{ кДж/моль}$  и  $\Delta H^0_{\text{сгор. } CH_4} = -890 \text{ кДж/моль}$ .

**РЕШЕНИЕ:**

Удельная теплота сгорания газа равна количеству выделяющегося тепла при сгорании 1 м<sup>3</sup> до образования высших оксидов.

1 м<sup>3</sup> газа содержит 800 л  $H_2$ , что составляет  $800/22,4=35,7$  моль и 200 л  $CH_4$ , что составляет  $200/22,4=8,93$  моль.

Используя уравнение (9) найдем удельную теплоту сгорания газа с учетом числа молей каждого газа в смеси.

$$Q_m = 268 \cdot 35,7 + 890 \cdot 8,93 = 17515,3 \text{ кДж/м}^3.$$

Внутренняя энергия и энтальпия связаны между собой соотношением:

$$\Delta U^0 = \Delta H^0 - \Delta n \cdot R \cdot T \quad (10),$$

где  $\Delta U^0$  - изменение внутренней энергии системы, кДж/моль;

$\Delta H^0$  - изменение энтальпии системы, кДж/моль;

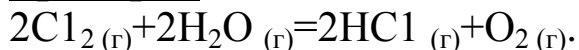
$T$  - температура, К;

$R$  - универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль·К;

$\Delta n$  - изменение числа молей газообразных веществ в ходе реакции:

$$\Delta n = \sum n_{\text{продуктов}} - \sum n_{\text{исх. в-в}} \quad (11)$$

**Пример 6** Рассчитайте  $\Delta H^0_{298}$  и  $\Delta U^0_{298}$  системы:



**РЕШЕНИЕ:**

Зная, что внутренняя энергия и энтальпия связаны между собой уравнением (10), то сначала необходимо найти изменение энтальпии в данной реакции. Для этого используем следствие из закона Гесса (уравнение (7))

$$\Delta H^0_{298} = 4 \cdot \Delta H^0_{298}(HCl_{(г)}) - 2 \cdot \Delta H^0_{298}(H_2O_{(г)}).$$

Значения энтальпий образования исходных веществ и продуктов реакции берем из приложения. Для простых веществ энтальпии

образования равны нулю.

$$\Delta H_{298}^0 = 4 \cdot (-92,3) - 2 \cdot (-248,84) = -369,2 + 497,68 = 128,48 \text{ кДж.}$$

$$\Delta n \text{ находим по уравнению (11): } \Delta n = 5 - 4 = 1$$

Используя уравнение (10), находим изменение внутренней энергии:  $R = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ , чтобы привести все величины к одним единицам измерения  $R$  умножаем на  $10^{-3}$ .

$$\Delta U = 128,48 - 1 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 125,9 \text{ кДж.}$$

Значит, внутренняя энергия системы увеличилась на 125,9 кДж.

### Пример 7:

Определите изменение внутренней энергии при испарении 250 г воды при  $20^\circ\text{C}$ , допуская, что пары воды подчиняются законам идеальных газов. Объемом жидкости по сравнению с объемом пара можно пренебречь. Удельная теплота парообразования воды 2451 Дж/г.

### РЕШЕНИЕ:

При испарении воды  $\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$   $\Delta n = 1 - 0 = 1$ .  $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль}$ .

Теплота парообразования воды  $\Delta H^0 = 2451 \cdot 18 = 44118 \text{ Дж/моль}$ .

При определении изменения внутренней энергии учитывают число молей испаряющейся воды  $\nu = 250/18 = 13,89 \text{ моль}$ .

$$\Delta U^0 = (\Delta H^0 - \Delta n \cdot R \cdot T) \cdot \nu, \text{ (12).}$$

$$\Delta U = (44118 - 1 \cdot 8,314 \cdot 293) \cdot 13,89 = 578962,95 \text{ Дж} = 578,96 \text{ кДж.}$$

## 4 Энтропия

Многие процессы протекают без подвода энергии от внешнего источника. Такие процессы называются самопроизвольными. В обратном направлении самопроизвольные процессы протекать не могут.

Большинство процессов представляют собой два одновременно происходящие явления: передачу энергии и изменению упорядоченности расположения частиц относительно друг друга.

Направление, в котором самопроизвольно протекает химическая реакция, определяется совместным действием двух факторов: 1) тенденцией к переходу системы в состояние с наименьшей внутренней энергией.

Мерой этой тенденции в изобарном процессе служит изменение энтальпии в химической реакции - уменьшение энтальпии, т.е. экзотермический тепловой эффект реакции. Понижение энергии

системы называется энергетическим или энтальпийным фактором.

Однако условие  $\Delta H < 0$  не может быть критерием самопроизвольного течения реакций, т.к. существуют самопроизвольные реакции, у которых  $\Delta H > 0$ , например растворение в воде некоторых солей. Следовательно, кроме уменьшения энтальпии системы имеется второй фактор самопроизвольного протекания процесса.

2) Тенденция к достижению наиболее вероятного состояния, т.е. состояния, которое может быть реализовано наибольшим числом равновероятных способов (микросостояний).

Состояние системы можно охарактеризовать микросостояниями её частиц, т.е. их мгновенными координатами и скоростями различных видов движения в различных направлениях.

Число микросостояний называется термодинамической вероятностью системы W.

Частицам (молекулам, ионам, атомам) присуще стремление к беспорядочному движению, поэтому система стремится перейти из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное.

Количественной мерой беспорядка является энтропия (S).

Единицы измерения энтропии Дж/моль·К.

У жидкостей величины W и S больше, но наличие ближнего порядка, т.е. взаимозависимости координат атомов в ближайшем окружении и наличие сильных межмолекулярных взаимодействий, обеспечивающих плотное конденсированное состояние вещества, существенно ограничивают величины W и S. Только в газах реализуется полностью всё максимально возможное число микросостояний системы. В химических реакциях и фазовых превращениях "носителями" энтропии являются газы.

Л. Больцман вскрыл статистический смысл энтропии, установив её зависимость от термодинамической вероятности:

$$S = k \ln W (E) \quad (12)$$

где S - энтропия системы, Дж/моль·К;

W - термодинамическая вероятность;

k - постоянная Больцмана ( $R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К).

Это уравнение Больцмана, который величину W называл термодинамической вероятностью системы.

Энтропия вещества в стандартных условиях называется стандартной энтропией.

Величина стандартной энтропии веществ является справочной



величиной. В справочниках приводятся абсолютные величины энтропии образования химических веществ  $S^0_{298}$ , в то время, как для энтальпии, возможно, измерить или рассчитать только относительную  $\Delta H^0_{обр.}$ . Это вытекает из постулата М. Планка, согласно которому "при абсолютном нуле энтропия идеального кристалла равна нулю" Это **3-ий закон термодинамики.**

В отличие от энтальпии образования, энтропия простого вещества, даже в кристаллическом состоянии, не равна нулю, т.к. при температуре, отличной от абсолютного нуля, микросостояния кристалла может быть реализовано не единственным микросостоянием, а большим числом равновероятных микросостояний.

Значениями энтропии веществ пользуются для установления изменения энтропии системы в результате соответствующих процессов.

Энтропия обратной реакции численно равна и противоположна по знаку энтропии прямой реакции.

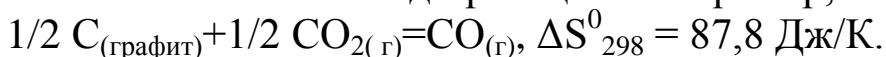
*Изменение энтропии системы ( $\Delta S^0_{x.p.}$ ) в результате химической реакции равно сумме энтропии продуктов реакции ( $\Sigma \Delta S^0_{prod.}$ ) за вычетом суммы энтропии исходных веществ ( $\Sigma \Delta S^0_{исх.}$ ). Суммирование проводят с учетом числа молей участвующих в реакции веществ.*

$$\Delta S^0_{x.p.} = \Sigma \Delta S^0_{обр. \cdot прод.} - \Sigma \Delta S^0_{обр. \cdot исх} \quad (13)$$

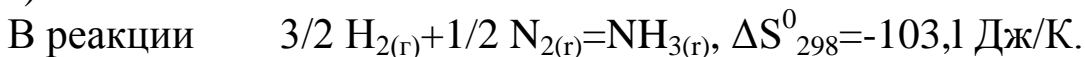
При переходе системы из более упорядоченного в менее упорядоченное состояние энтропия системы увеличивается ( $\Delta S > 0$ ). Переход системы из менее упорядоченного состояния в более упорядоченное связан с уменьшением энтропии ( $\Delta S < 0$ ).

Энтропия возрастает при переходе жидкости в пар, при растворении кристаллического вещества и т.д. Во всех процессах, где наблюдается уменьшение порядка в относительном расположении частиц. Наоборот, в процессах конденсации и кристаллизации веществ энтропия уменьшается.

Об изменении энтропии в химической реакции можно судить по изменению объема системы в ходе реакции. Например, в реакции:



Наблюдается увеличение объема ( $\Delta V > 0$ ), поскольку 1/2 моля газа образуется 2 моля газа; следовательно, энтропия возрастает ( $\Delta S > 0$ ).



Объем системы уменьшается ( $\Delta V < 0$ ), поскольку из 2-х молей

газа образуется 1 моль газа, следовательно, энтропия уменьшается ( $\Delta S < 0$ ).

### **Пример 8**

Предскажите знак изменения энтропии  $\Delta S^0_{298}$  в реакции:  
 $2\text{KClO}_3(\text{к}) = 2\text{KCl}(\text{к}) + 3\text{O}_2(\text{г})$ . Ответ подтвердите расчетом.

### **РЕШЕНИЕ:**

$\Delta S^0_{298} > 0$ , мера неупорядоченности системы растет, т.к. из кристаллического вещества образуется газообразное вещество.

По следствию из закона Гесса, используя уравнение (13), рассчитаем изменение энтропии в ходе реакции (необходимые значения стандартных энтропия веществ возьмем из приложения):

$$\Delta S^0_{298} = (2 \cdot \Delta S^0(\text{KCl}) + 3 \cdot \Delta S^0(\text{O}_2)) - (\Delta S^0(\text{KClO}_3)).$$

$$\Delta S^0_{298} = 2 \cdot 82,6 + 3 \cdot 205 - 2 \cdot 143 = 493 \text{ Дж/К}.$$

### **Пример 9**

Вычислите изменение энтропии при испарении воды количеством вещества 1 моль при  $100^\circ\text{C}$ , если теплота испарения воды при этой температуре равна 2245 Дж/г.

### **РЕШЕНИЕ:**

Переведем величину энтальпии в единицы Дж/моль:

$$\Delta H^0 = 2245 \cdot 18 = 40410 \text{ Дж/моль}.$$

$$\Delta S^0 = 40410 / (100 + 273) = 108,34 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

**Второй закон термодинамики** гласит: *в изолированной системе самопроизвольно протекают только те процессы, которые сопровождаются увеличением энтропии системы.*

В противном случае протекание процесса невозможно.

В изолированной системе процессы, сопровождающиеся ростом энтропии, идут до тех пор, пока энтропия системы не достигнет максимального уровня, соответственно,  $\Delta S = 0$ .

Возрастание энтропии в системе называется **структурным** или **энтропийным фактором**.

## **5. Направление протекания химического процесса в неизолированной системе. Энергия Гиббса**

Самопроизвольно, т.е. без затраты работы извне, система может переходить только из менее устойчивого состояния в более устойчивое.

Значит, существуют два фактора самопроизвольного протекания процесса: первый - энтальпийный (энергетический); второй -

энтропийный (структурный).

Состояние, в которое система переходит самопроизвольно и пребывает в нем при неизменных условиях, является итогом конкуренции двух факторов - энтропийного и энергетического. При переходе вещества в то или иное фазовое состояние сталкиваются две противоположных тенденции: первая - стремление к уменьшению энтальпии, приводящая к потере частицами подвижности и к возрастанию порядка в системе ( $\Delta H < 0$ ), и вторая - стремление к увеличению энтропии, приводящая к уменьшению порядка ( $\Delta S > 0$ ). Преобладание одного из них определяет возможность и направление самопроизвольного перехода системы в более термодинамически устойчивое состояние.

Суммарный эффект двух противоположных тенденций в процессах, протекающих при постоянной температуре и давлении отражает изменение энергии Гиббса  $G$  (или изобарно-изотермического потенциала).

$\Delta G$  - максимальная работа, которую нужно совершить, чтобы остановить данную химическую реакцию.

Энергия Гиббса  $G$  применяется при описании процессов, протекающих в изобарно-изотермических условиях, когда процесс идет при постоянном давлении и температуре. Именно такие процессы идут, в открытых системах при атмосферном давлении.

Влияние как энтальпийного, так и энтропийного факторов учитывается в уравнении Гиббса:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (14),$$

где  $\Delta G$  - изменение энергии Гиббса в ходе реакции; кДж/моль;

$\Delta H$  - изменение энтальпии в ходе реакции, кДж/моль;

$T$  - температура, К;

$\Delta S$  - изменение энтропии в ходе реакции; Дж/моль·К.

Энергия Гиббса имеет ту же размерность, что и энтальпия, т.е. кДж/моль или Дж/моль.

При  $\Delta G^0 < 0$ , то реакция может идти самопроизвольно;

при  $\Delta G^0 > 0$ , то реакция самопроизвольно не протекает;

при  $\Delta G^0 = 0$ , состояние термодинамического равновесия.

Самопроизвольному протеканию процесса способствуют уменьшение энтальпии и увеличение энтропии системы, т.е.  $\Delta H < 0$  и  $\Delta S > 0$ . При любых других сочетаниях  $\Delta H$  и  $\Delta S$  возможность процесса определяет либо энтальпийный, либо энтропийный фактор.

$\Delta H^0$	$\Delta S^0$	$\Delta G^0$	Возможность реакции
<0	>0	<0	Идет при любых температурах
>0	<0	>0	Не идет ни при каких температурах
<0	<0	<0	При условии $T_p > T$ идет в прямом направлении При условии $T_p < T$ идет в обратном направлении
>0	>0	<0	При условии $T_p < T$ идет в прямом направлении При условии $T_p > T$ идет в обратном направлении

Процессы, протекающие с уменьшением энтальпии ( $\Delta H < 0$ ) и увеличением энтропии ( $\Delta S > 0$ ), практически необратимы.

Для определения температуры, выше которой происходит смена знака  $\Delta G$ , используется уравнение:

$$T_{\text{равновесн.}} = \Delta H^0 / \Delta S^0 \quad (15),$$

где  $\Delta H$  - изменение энтальпии в ходе реакции, кДж/моль;

$T$  - температура, К;

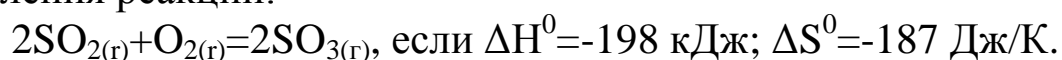
$\Delta S$  - изменение энтропии в ходе реакции; Дж/моль·К..

В стандартных условиях существует только одно значение температуры, при которой  $\Delta G^0 = 0$ , т.е.  $\Delta H = T \cdot \Delta S$ . При этой температуре оба направления реакции становятся равновероятными.

Вычисленное значение температуры равновесия может оказаться реально недостижимым, если при этом вещества, участвующие в реакции, начнут вступать в побочные реакции или менять своё агрегатное состояние.

### **Пример 10**

Рассчитайте температуру, при которой равновероятны оба направления реакции:



### **РЕШЕНИЕ:**

$$\Delta G^0_T = \Delta H^0 - T_{\leftrightarrow} \cdot \Delta S^0$$

$$T_{\leftrightarrow} = \Delta H^0 / \Delta S^0 = -198 / -0,187 = 1059 \text{ К.}$$

*Изменение энергии Гиббса системы при образовании 1 моля вещества из простых веществ, устойчивых при 298 К, называется **энергией Гиббса образования вещества.***

Энергия Гиббса простого вещества равна нулю, если вещество находится в стандартном состоянии.

Как любая термодинамическая функция энергия Гиббса явля-

ется функцией состояния, т.е. её значение не зависит от пути протекания процесса, а лишь от исходного и конечного состояния системы. Поэтому:  $\Delta G$  реакции рассчитывают как сумму  $\Delta G$  образования продуктов реакции за вычетом суммы  $\Delta G$  образования исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов.

$$\Delta G_{\text{х.р.}}^0 = \sum \Delta G_{\text{обр.}\cdot\text{прод.}}^0 - \sum \Delta G_{\text{обр.}\cdot\text{исх}}^0 \quad (16)$$

Если образующиеся и исходные вещества находятся в стандартных условиях, то  $\Delta G$  называется стандартной энергией Гиббса.

### Пример 11



Возможна ли реакция в стандартных условиях?

### РЕШЕНИЕ:

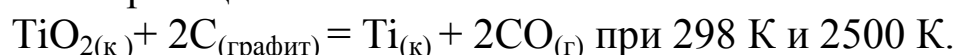
$\Delta G_{\text{р-ции}}^0 = \sum \Delta G_{\text{продуктов}}^0 - \sum \Delta G_{\text{исх.}\cdot\text{в.в.}}^0 = \Delta G_{\text{NO}_2}^0 - (\Delta G_{\text{NO}}^0 + 1/2 \Delta G_{\text{O}_2}^0) = 51,5 - 85,58 = -35,08$  кДж., т. к.  $\Delta G_{\text{р-ции}}^0 < 0$ , то реакция возможна.

Чем выше абсолютное значение  $\Delta G$ , тем быстрее химическая реакция самопроизвольно протекает в прямом направлении, т.е. термодинамически более вероятно образование продуктов реакции.

При расчете энергии Гиббса нижний индекс обозначения  $\Delta G_{\text{T}}^0$  указывает абсолютную температуру, при которой осуществляется процесс.

### Пример 12

Возможно ли восстановление диоксида титана до свободного металла по реакции:



### РЕШЕНИЕ:

Используя уравнение(16) рассчитаем энергию Гиббса при 298К.

$$\Delta G_{298}^0 = 2\Delta G_{\text{CO}}^0 - \Delta G_{\text{TiO}_2}^0 = -137,1 \cdot 2 - (-888,6) = 614,4 \text{ кДж.}$$

$\Delta G_{298}^0$  титана и графита равны нулю, поскольку эти вещества являются простыми и находятся в стандартном состоянии.

$\Delta G_{298}^0 > 0$ , следовательно, восстановление  $\text{TiO}_2$  при 298К невозможно.

$$\text{Для расчета } \Delta G_{2500}^0 \text{ используем уравнение: } \Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0.$$

По следствию из закона Гесса рассчитаем энтальпию и энтропию данной химической реакции.

$$\Delta H^0 = 2\Delta H^0(\text{CO}) - \Delta H^0(\text{TiO}_2) = -110,5 \cdot 2 - (-943,9) = 722,9 \text{ кДж.}$$

$\Delta H_{298}^0$  титана и графита равны нулю, поскольку эти вещества

являются простыми и находятся в стандартном состоянии.

$$\Delta S^0_{298} = (\Delta S^0(\text{Ti}) + 2\Delta S^0(\text{CO})) - (\Delta S^0(\text{TiO}_2) + 2\Delta S^0(\text{C})) = \\ = 30,6 + 197,5 \cdot 2 - 50,3 - 5,7 \cdot 2 = 363,9 \text{ Дж/К}$$

Выражая  $\Delta S^0$  в кДж/К найдем  $\Delta G^0_{2500}$ :

$$\Delta G^0_{2500} = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0 = 722,9 - 2500 \cdot 363,9 / 1000 = -186,9 \text{ кДж.}$$

Т.к.  $\Delta G_{2500} < 0$ , то восстановление  $\text{TiO}_2$  графитом при 2500К возможно.

Если вещества находятся в состояниях, отличных от стандартного, то изменение энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) рассчитывают по уравнению изотермы Вант - Гоффа, которое связывает стандартное значение энергии Гиббса  $\Delta G^0$  и энергию Гиббса при условиях отличных от стандартных  $\Delta G$ .

Для уравнения  $dD + bB = 1L + mM$  изотерма Вант-Гоффа имеет вид:

$$\Delta G = \Delta G^0 + R \cdot T \cdot \ln(C_L^1 \cdot C_M^m / C_D^d \cdot C_B^b) \quad (17),$$

где  $C$  - концентрация вещества или

$$\Delta G = \Delta G^0 + R \cdot T \cdot \ln(p_L^1 \cdot p_M^m / p_D^d \cdot p_B^b) \quad (18),$$

где  $p$  - давление.

При концентрации веществ равной 1 моль/л или парциальном давлении равном 1  $\Delta G = \Delta G^0$ , т.к. в стандартных условиях  $\ln(C_L^1 \cdot C_M^m / C_D^d \cdot C_B^b)$  или  $\ln(p_L^1 \cdot p_M^m / p_D^d \cdot p_B^b)$  равен нулю.

### Пример 13

Возможно ли восстановление оксида железа (III) до свободного металла по уравнению:

$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{к}) + 3\text{H}_2(\text{г}) = 2\text{Fe}(\text{к}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ , при температуре 298 К и при начальных парциальных давлениях веществ  $p(\text{H}_2) = 1,5$ ;  $p(\text{H}_2\text{O}) = 0,9$ ?

### РЕШЕНИЕ:

$$\Delta G^0_{\text{р-ции}} = \sum \Delta G^0_{\text{продуктов}} - \sum \Delta G^0_{\text{исх. в.в.}} = 3\Delta G^0_{\text{H}_2\text{O}} - (\Delta G^0_{\text{Fe}_2\text{O}_3}) = \\ = 3 \cdot (-228,61) + 740,98 = 55,15 \text{ кДж.}$$

Для расчета  $\Delta G_{\text{р-ции}}$  используем изотерму Вант-Гоффа (уравнение 18.4):  $\Delta G_{\text{р-ции}} = \Delta G^0_{\text{р-ции}} + R \cdot T \cdot \ln(p^3(\text{H}_2\text{O}) / p^3(\text{H}_2))$

$$55,15 \cdot 10^3 + 8,314 \cdot 298 \cdot \ln(0,9^3 / 1,5^3) = 51353,18 \text{ Дж} = 51,35 \text{ кДж.}$$

Т.к.  $\Delta G > 0$ , то процесс невозможен.

## Лабораторная работа №1

### Определение энтальпии гидратации

В зависимости от природы растворителя и растворяемого вещества процесс растворения может сопровождаться выделением или поглощением тепла. Теплоту растворения относят к 1 молю растворяемого вещества. Энтальпию реакции присоединения кристаллизационной воды к безводной соли можно определить по энтальпиям растворения безводной соли и её кристаллогидрата, пользуясь следствием из закона Гесса. Определение тепловых эффектов реакций производят в специальных приборах, называемых калориметрами.

Калориметры содержат калориметрический сосуд, который защищается от потерь тепла и снабжен чувствительным ртутным термометром или другим устройством для измерения температуры.

Для определения теплоты реакций, протекающих в водных растворах, можно использовать калориметрическую установку, изображенную на рисунке 2.

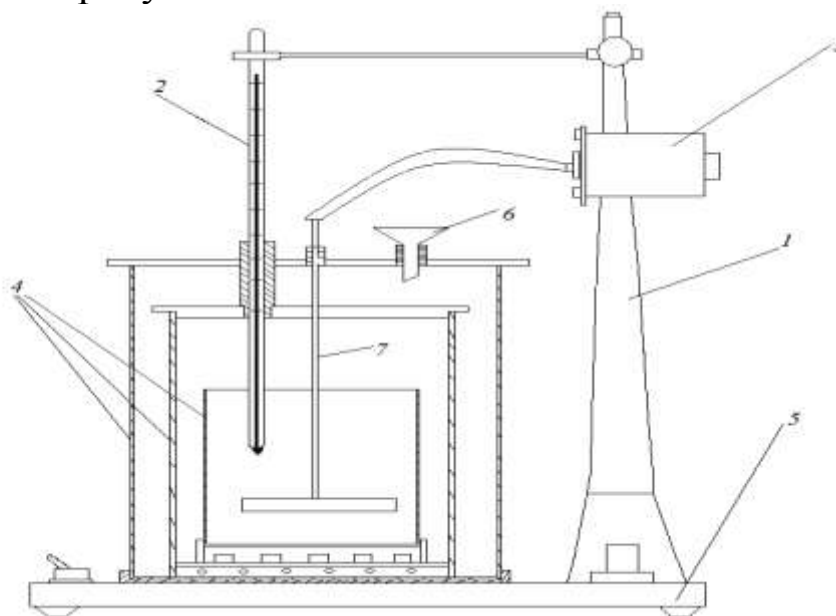







Рис. 2 Схема калориметра

1-стойка с кронштейном; 2-термометр; 3-электродвигатель мешалки; 4-калориметрические сосуды; 5-основание; 6-воронка; 7-мешалка.

Для измерения температуры используется прибор для измерения температуры «Testo 735» в комплекте с высокоточным погружным /проникающим зондом **Pt100**.

## Правила работы с прибором «Testo 735»

### Функции кнопок

Кнопка	Функция
	Меняет показания 1-ой строки В настройках: Увеличить значение, навигация по меню
	Меняет показания 2-ой строки При настройках: Увеличить значение, навигация по меню
	Печать данных
	Включить прибор, подсветка вкл/выкл; выключить прибор (нажать и удерживать)
	Открыть (главное) меню
	Подтвердить ввод
Выход	Отмена
Фикс./Изм.	Удержание значения/Продолжение непрерывных измерений
Сброс	Сброс мин./макс. значений к текущему значению
Среднее	Открыть меню “Усреднение по точкам”
Прогр.изм.	Открыть меню “Программа измерений”
Старт	Начать серию замеров
Стоп	Остановить серию замеров
Сохран.	Сохранить значения
MEM	Открыть меню “Место измерений”

1. Вставить штекер зонда в гнездо прибора.
2. Нажать кнопку «включение».
3. Нажимая кнопку вверх или вниз выбрать желаемый канал для зонда и подтвердить кнопкой «ОК». Прибор начинает искать включенный зонд и на дисплее появится идентификация найденного зонда.
4. Если настройки зонда сохранены в приборе и применены на дисплее появляется меню настроек
5. Открывается экран измерений: показаны текущие показания или загорается «-----», если показаний нет.
6. Нажать кнопку главное меню (2 сек) пока не появится «Конфиг.» Для входа в режим измерения нажать несколько раз «ESC».
7. Погрузить зонд в измеряемый раствор и нажать кнопку «Старт».
8. По окончании измерения прибор выключить, зонд отсоединить, промыть дистиллированной водой и насухо протереть.



### *Правила безопасности при работе с прибором*

Чтобы не получить травму и не повредить прибор:

- Не проводите измерения на людях и животных.
- Никогда не держите прибор и датчики вместе с растворителями и не используйте осушители (десикканы).

Чтобы избежать ремонта:

- Проводите измерения только в пределах значений параметров, указанных в технических данных.
- Используйте прибор только по его прямому назначению. Не применяйте излишнюю силу.
- Не подвергайте рукоятки и кабели воздействию температуры более 70 °С, если они для этого специально не предназначены. Температуры, указанные для датчиков относятся только к сенсорам, но не ручкам.
- Открывайте прибор при обслуживании только если это указано в документации.
- Проводите самостоятельно только то обслуживание, которое описано в инструкции, строго следуя ей при этом. Используйте только оригинальные запчасти Testo.

### **Ход работы:**

Взвесить на техно-химических весах (с точностью до 0,02 г) 6г безводного сульфата меди. В калориметрический стакан налить 100 мл дистиллированной воды. Дождаться выравнивания температуры калориметра и окружающей среды, для чего, выждав предварительно 3-5 мин., записывать показания прибора «Testo 735» в течение 3 мин с интервалом в 1 мин.

Убедившись, что температура практически не меняется, принять её за  $t_{нач}$ . Через сухую воронку взвешенное количество безводной соли быстро высыпать в калориметрический стакан и непрерывно помешивая раствор мешалкой, измерять температуру через 30 с до плавного изменения температуры или её постоянства (обычно 3-4 мин). После этого продолжать измерения через 1 мин в течение ещё 3 минут. Результаты наблюдений занести в таблицу.

Время начала опыта	$\Delta t^{\circ}\text{C}$
0	
1	
2	
3	
4(момент высыпания соли)	
4,5	

5	
5,5	
6	
6,5	
7	
7,5	
8	
9	
10	

По полученным данным построить график изменения температуры со временем (время откладывается в минутах) и определить изменение температуры в ходе реакции растворения безводной соли. Примерный вид графика приведен на рисунке 3.

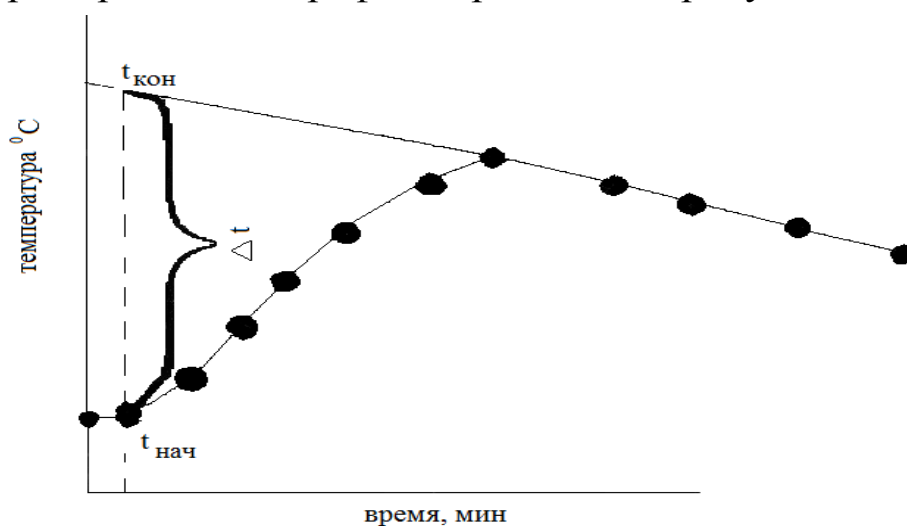


Рис. 3 График изменения температуры со временем. Аналогичный опыт проводится с кристаллогидратом данной соли.

#### Расчетная часть:

1) Определить теплоту растворения 1 моля безводной соли ( $\Delta H_1$ ) по формуле:

$$\Delta H_1 = -(t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \cdot M \cdot q \quad (23.1),$$

где  $t_{\text{кон}}$  - конечная температура реакционной смеси,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{нач}}$  - начальная температура реакционной смеси,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$M$  - молярная масса добавляемой соли, кг/моль;

$q$  - удельная теплоемкость растворителя, кДж/кг К

Для воды удельная теплоемкость составляет 4,2 кДж/кг К.

2) Аналогично рассчитывается энтальпия растворения кристаллогидрата ( $\Delta H_2$ ).

3) Рассчитать энтальпию присоединения кристаллизационной

воды к безводной соли (энтальпия гидратации) ( $\Delta H_3$ ), исходя из предположения, что энтальпия растворения безводной соли является суммой энтальпий гидратации безводной соли и растворения полученного кристаллогидрата, т.е.:  $\Delta H_1 = \Delta H_3 + \Delta H_2$ .

4) Вычислить энтальпию гидратации безводного сульфата меди по справочным данным.

5) Определить абсолютную и относительную погрешность определения энтальпии гидратации.

## **Лабораторная работа №2** ***Определение энтальпии реакции нейтрализации***

### **Ход работы:**

Во внутренний стакан калориметра налить 50 мл 1 н. раствора соляной кислоты и поставить стакан в калориметр. В другой стакан налить 50 мл 1н. растворе КОН и поставить на 3-4 мин для выравнивания температуры рядом с калориметром.

Дождаться выравнивания температуры калориметра и окружающей среды, для чего, выждав предварительно 3-5 мин., записывать показания прибора «Testo» в течение 3 мин с интервалом в 1 мин. убедившись, что температура практически не меняется, принять её за  $t_{нач}$ . Через сухую воронку вылить отмеренный объем щелочи в калориметрический стакан, и непрерывно помешивая раствор мешалкой, измерять температуру через 30 с до плавного изменения температуры или её постоянства (обычно 3-4 мин). После этого продолжать измерения через 1 мин в течение ещё 3 минут. Результаты наблюдений занести в таблицу (см. лабораторную работу №1).

По полученным данным построить график изменения температуры со временем (время откладывается в минутах) (рис.18), и определить изменение температуры в ходе реакции нейтрализации кислоты щелочью.

### **Расчетная часть:**

1) Рассчитать количество теплоты, выделившееся в калориметре при нейтрализации 1 моля кислоты щелочью.

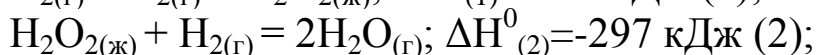
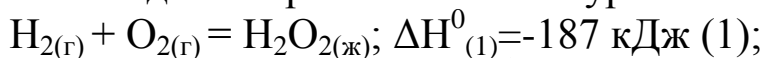
2) Вычислить теоретическое значение теплового эффекта реакции нейтрализации соляной кислоты щелочью.

3) Определить абсолютную и относительную погрешность определения энтальпии реакции нейтрализации.

## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

### ВАРИАНТ 1

1. Исходя из термохимических уравнений



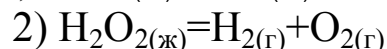
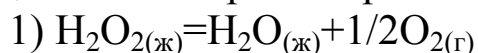
Рассчитайте значение стандартной энтальпии реакции образования  $\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$ .

2. При разложении хлората калия образовался кислород объемом 4,48 л (н.у.). Какое количество теплоты выделилось при этом?

3. Вычислите изменение внутренней энергии при испарении 50 г этилового спирта при  $20^\circ\text{C}$ , если удельная теплота испарения его равна 857,7 Дж/г. Считать пар идеальным газом и объемом жидкости пренебречь.

4. Рассчитайте изменение энтропии при плавлении 3 моль уксусной кислоты, если температура плавления уксусной кислоты  $16,6^\circ\text{C}$ , а теплота плавления 194 Дж/г.

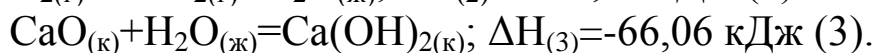
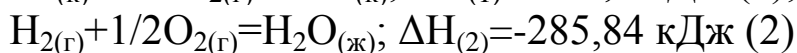
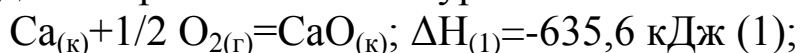
5. Докажите по какой реакции более вероятно разложение пероксида водорода при 400К:



Какой из двух факторов - энтальпийный или энтропийный способствует разложению  $\text{H}_2\text{O}_2$  при этой температуре.

### ВАРИАНТ 2

1. Рассчитайте стандартную энтальпию образования  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , исходя из термохимических уравнений:

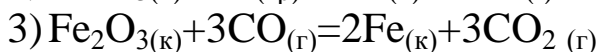
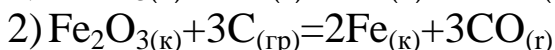
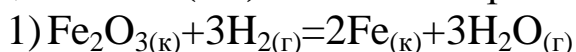


2. При полном сгорании этилена выделилось 6226 кДж теплоты. Рассчитайте объем вступившего в реакцию кислорода (н.у.).

3. Вычислите изменение внутренней энергии при испарении 1 кг воды при 423К, если теплота испарения воды равна 2110,0 кДж/кг. Считать пар идеальным газом и объемом жидкости пренебречь.

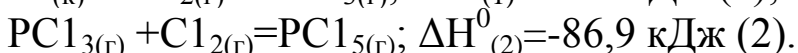
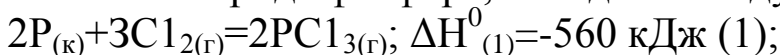
4. Рассчитайте изменение энтропии при испарении 250 г воды, если мольная теплота испарения воды при этой температуре равна 44,08 кДж/моль.

5. Протекание какой из приведенных реакций восстановления оксида железа (III) наиболее вероятно при 298 К:



### ВАРИАНТ 3

1. Рассчитайте стандартную энтальпию образования газообразного пентахлорида фосфора, исходя из следующих уравнений:

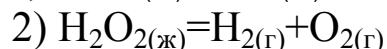
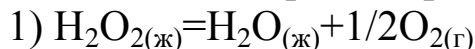


2. Сколько теплоты выделится при сгорании бензола массой 20 г?

3. При взаимодействии водорода и кислорода с образованием воды при 20°C выделяется 286,2 кДж теплоты на 1 моль H<sub>2</sub>. Вычислите изменение внутренней энергии.

4. Теплота испарения бромбензола при 429,8 К равна 241 Дж/г. Определите энтропию при испарении 1,25 моль бромбензола.

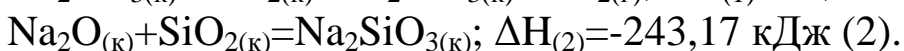
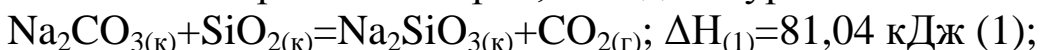
5. Докажите по какой реакции более вероятно разложение пероксида водорода при 298К:



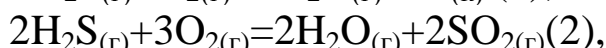
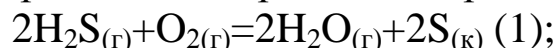
Какой из двух факторов - энтальпийный или энтропийный способствует разложению пероксида водорода при этой температуре?

### ВАРИАНТ 4

1. Рассчитайте количество теплоты, которое потребуется для разложения 1 кг карбоната натрия, исходя из уравнений:



2. В ходе какой из приведенных реакций горения H<sub>2</sub>S выделится больше теплоты:



при условии, что вещества находятся в стандартном состоянии?

3. Молярная теплота испарения бензола 30,92 кДж/моль. Определите изменение внутренней энергии при испарении 200 г бензола при 20°C. Считать пар идеальным газом и объемом жидкости пренебречь.

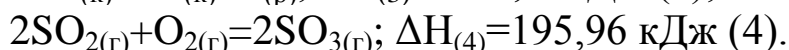
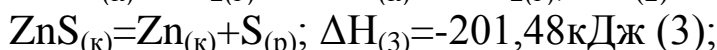
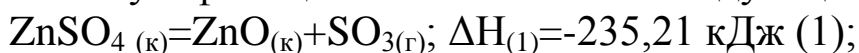
4. Изменение энтропии при плавлении 100 г меди равно 1,28

Дж/К. Рассчитайте удельную теплоту плавления меди, если температура плавления меди  $1083^{\circ}\text{C}$ .

5. В какую сторону будет протекать процесс  $2\text{NO}_{2(\text{r})} = 2\text{NO}_{(\text{r})} + \text{O}_{2(\text{r})}$  при 500 К и стандартных состояниях веществ.

### ВАРИАНТ 5

1. Рассчитайте стандартную энтальпию образования кристаллического сульфата цинка на основании следующих данных:



2. Определите стандартную энтальпию образования фосфина  $\text{PH}_{3(\text{r})}$ , исходя из уравнения:

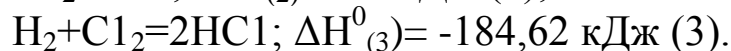
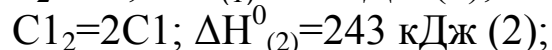
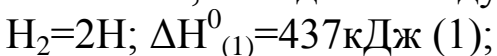


3. Определите изменение внутренней энергии при испарении 100г воды при  $20^{\circ}\text{C}$ . Удельная теплота парообразования воды 2451 Дж/г. Считать пар идеальным газом и объемом жидкости пренебречь. 4. Удельная теплота плавления льда 33480 Дж/кг. Определите изменение молярной энтропии при плавлении льда.

5. Определите область температуры в которой возможен самопроизвольный процесс при стандартных состояниях всех веществ:  $\text{H}_2\text{S}(\text{r}) + \text{Cl}_2(\text{r}) = 2\text{HCl}(\text{r}) + \text{S}(\text{r})$ .

### ВАРИАНТ 6

1. Рассчитайте энергию связи Н-С1. Т.е. тепловой эффект реакции образования  $\text{HCl}$  из атомов, исходя из следующих термохимических уравнений:



2. При взаимодействии железа массой 21 г с серой выделилось 36,54 кДж. Рассчитайте стандартную теплоту образования сульфида железа (II).

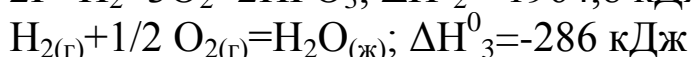
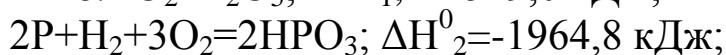
3. При растворении 1 моля цинка в растворе серной кислоты при  $20^{\circ}\text{C}$  выделяется 143,1 кДж теплоты. Одновременно выделяется 1 моль водорода, причем против внешнего давления совершается работа. Определите изменение внутренней энергии.

4. Определите изменение энтропии системы при стандартных условиях:  $\text{H}_{2(\text{r})} + \text{S}_{(\text{к})} = \text{H}_2\text{S}_{(\text{r})}$ . Объясните полученный знак энтропии.

5. Определите возможность самопроизвольного протекания процесса при стандартном состоянии всех веществ при 298 К и 500К:  $\text{CCl}_4(\text{г}) + 3\text{H}_2(\text{г}) = \text{CH}_4(\text{г}) + \text{C}(\text{г})$ .

### ВАРИАНТ 7

1. Определите количество теплоты, выделяющейся при взаимодействии 50 г фосфорного ангидрида с водой по реакции:  $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HPO}_3$ , если тепловые эффекты реакций равны:



2. Рассчитайте массу взятого для разложения карбоната кальция и объем выделяющегося углекислого газа (н.у.), если при этом поглощается 534 кДж теплоты.

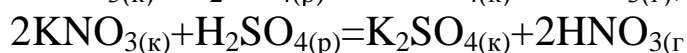
3. Найдите изменение внутренней энергии при испарении 100 г бензола при температуре его кипения ( $80,2^\circ\text{C}$ ), приняв, что пары бензола подчиняются законам идеальных газов. Теплота испарения бензола 394 Дж/г. Считать пар идеальным газом и объемом жидкости пренебречь.

4. Теплота плавления нафталина  $\text{C}_{10}\text{H}_8$  равна 149600 Дж/кг, а температура плавления  $80,4^\circ\text{C}$ . Найдите изменение энтропии при плавлении 3,1 моль нафталина.

5. Рассчитайте энергию Гиббса процесса алюмотермии при 298К и 500К:  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{к}) + 2\text{Al}(\text{к}) = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{к}) + 2\text{Fe}(\text{к})$ . Как влияет температура на протекание реакции в прямом направлении.

### ВАРИАНТ 8

1. При получении азотной кислоты из нитрата калия протекают следующие реакции:  $\text{KNO}_3(\text{к}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{р}) = \text{KHSO}_4(\text{к}) + \text{HNO}_3(\text{г})$ ;



Сколько теплоты выделяется (или поглощается) при получении 1 кг азотной кислоты, если 80% её образуется по реакции а.

2. Восстановление оксида железа (III) водородом происходит по уравнению:  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{к}) + 3\text{H}_2(\text{г}) = 2\text{Fe}(\text{к}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ , и сопровождается поглощением 96,2 кДж теплоты. Сколько поглотится теплоты при взаимодействии 160 г  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с 33,6 л (н.у.)  $\text{H}_2$ ?

3. Определите энтальпию и изменение внутренней энергии в системе:  $4\text{NH}_3(\text{г}) + 3\text{O}_2(\text{г}) = 2\text{N}_2(\text{г}) + 6\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$ .

4. Рассчитайте изменение энтропии реакции разложения бер-

толетовой соли.

5. Какие оксиды из перечисленных ниже можно восстановить водородом в стандартных условиях:  $\text{CuO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ?

### ВАРИАНТ 9

1. Определите стандартную теплоту образования этилового спирта, если теплоты сгорания углерода, водорода и этилового спирта соответственно равны:  $-393,51$ ;  $-285,84$ ;  $-1366,9$  кДж/моль.

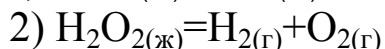
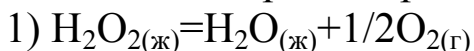
2. Рассчитайте стандартную энтальпию образования твердого оксида железа (II), если известно, что при взаимодействии 3,6 г оксида железа (II) с оксидом углерода (II) выделяется 0,71 кДж, а при сгорании 2,8 г оксида углерода выделяется 28,29 кДж.

3. Изменение внутренней энергии системы:

$\text{Fe}_{(к)} + \text{Cl}_{2(г)} = \text{FeCl}_{2(к)}$  при 298К равно  $-334,0$  кДж. Определите изменение энтальпии в этой реакции.

4. Определите изменение энтропии системы при стандартных условиях:  $\text{CH}_{4(ж)} + 4\text{Cl}_{2(г)} = \text{CCl}_{4(ж)} + 4\text{HCl}_{(г)}$ . Изменится эта величина, если вместо жидкого метана будет участвовать газообразный.

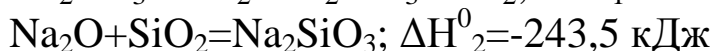
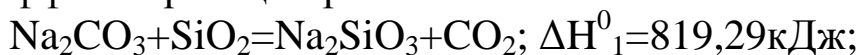
5. Докажите по какой реакции более вероятно разложение пероксида водорода при 400К:



Какой из двух факторов - энтальпийный или энтропийный способствует разложению пероксида водорода при этой температуре.

### ВАРИАНТ 10

1. Сколько нужно затратить теплоты, чтобы разложить 200 г карбоната натрия до оксида натрия и углекислого газа, если тепловые эффекты реакций равны:



2. Вычислите стандартную теплоту образования бензола, если стандартная теплота его сгорания равна  $-3301$  кДж/моль.

3. Внутренняя энергия при испарении 90 г воды при  $100^\circ\text{C}$  возросла на 188,1 кДж. Определите теплоту парообразования воды (кДж/моль).

4. Вычислите изменение энтропии при стандартных условиях для реакции:  $4\text{NH}_{3(г)} + 3\text{O}_{2(г)} = 2\text{N}_{2(г)} + 6\text{H}_2\text{O}_{(ж)}$ . Изменится эта величина, если вместо жидкой воды будет образовываться газообразная.



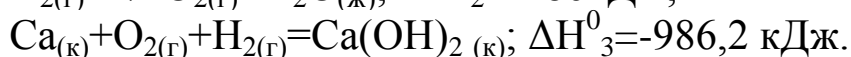
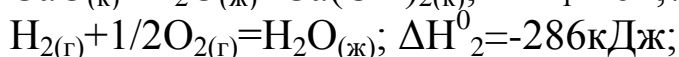
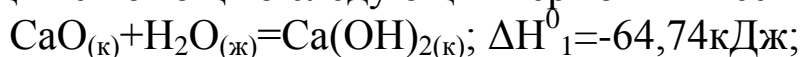
5. Определите термодинамическую вероятность протекания процессов:



Энергия Гиббса какого из этих процессов зависит от температуры сильнее?

### ВАРИАНТ 11

1. Определите стандартную теплоту образования оксида кальция с помощью следующих термохимических уравнений:

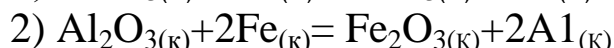
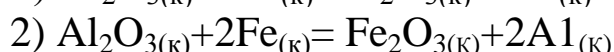


2. Исходя из теплового эффекта реакции  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{к})} + 3\text{CO}_{(\text{г})} = 2\text{Fe}_{(\text{к})} + 3\text{CO}_{2(\text{г})}$ , равного  $-26,8 \text{ кДж}$ , вычислите энтальпию образования оксида железа (III). Какое количество теплоты выделяется при взаимодействии  $1,5 \text{ г Fe}_2\text{O}_3$  с  $1 \text{ л CO}$ .

3. Определите энтальпию и изменение внутренней энергии в системе:  $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{г})} + \text{H}_{2(\text{г})} = 2\text{CH}_{4(\text{г})}$ .

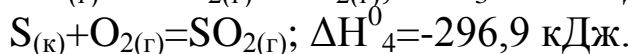
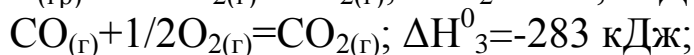
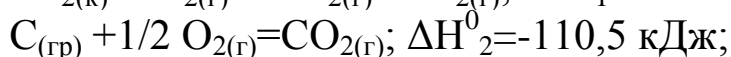
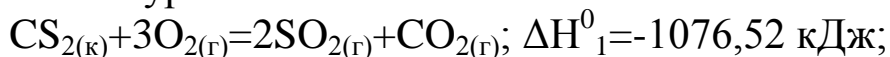
4. Определите изменение энтропии системы при стандартных условиях:  $\text{CO}_{(\text{г})} + 3\text{H}_{2(\text{г})} = \text{CH}_{4(\text{г})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$ . Объясните полученный знак энтропии.

5. Какая из двух реакций будет протекать самопроизвольно при  $298 \text{ К}$ :



### ВАРИАНТ 12

1. Определите теплоту образования  $\text{CS}_2$  с помощью термохимических уравнений:



2. Реакция идет по уравнению:  $\text{NaN}_{(\text{к})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})} = \text{NaOH}_{(\text{р})} + \text{H}_{2(\text{г})}$ . Какое количество теплоты выделится при взаимодействии  $1 \text{ кг}$  гидрида натрия с водой?

3. Определите энтальпию и изменение внутренней энергии в системе:  $\text{CH}_{4(\text{г})} + \text{Cl}_{2(\text{г})} = \text{CH}_3\text{Cl}_{(\text{г})} + \text{HCl}_{(\text{г})}$ .

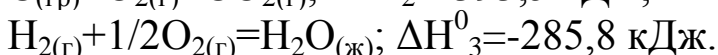
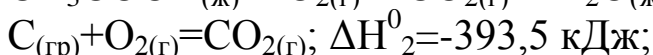
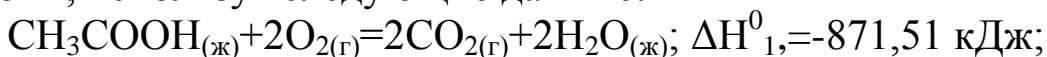
4. Вычислите изменение энтропии при испарении воды количеством  $1 \text{ моль}$  при  $100 \text{ С}$ , если теплота испарения воды при этой

температуре равна 2245 Дж/г.

5. Определите термодинамическую вероятность протекания процессов образования  $MgCO_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $BeCO_3$  из соответствующих оксидов и углекислого газа.

### ВАРИАНТ 13

1. Вычислите стандартную энтальпию образования уксусной кислоты, используя следующие данные:



2. Реакция протекает по уравнению:

$2PbS_{(к)} + 3O_{2(г)} = 2PbO_{(к)} + 2SO_{2(г)}$ . Какой объем кислорода требуется для того, чтобы выделилось 100 кДж теплоты.

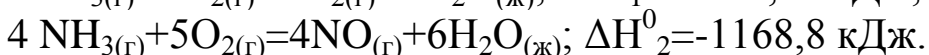
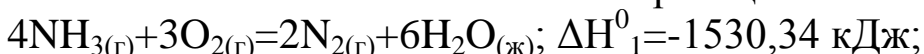
3. Определите энтальпию и изменение внутренней энергии в системе:  $CH_{4(г)} + 2O_{2(г)} = CO_{2(г)} + 2H_2O_{(г)}$ .

4. Определите изменение энтропии системы при стандартных условиях:  $CO_{2(г)} + 2Mg_{(к)} = 2MgO_{(к)} + C_{(гp)}$ . Объясните полученный знак энтропии.

5. Укажите какие реакции протекают самопроизвольно и являются экзотермическими:  $2H_2O_{2(ж)} = 2H_2O_{(ж)} + O_{2(г)}$ ;  $N_2O_4 = 2NO_2$ .

### ВАРИАНТ 14

1. Воспользовавшись энтальпиями реакций:



Определите энтальпию образования оксида азота (II).

2. Вычислите количество теплоты, которое выделяется при сгорании 20 л диборана (н.у.).

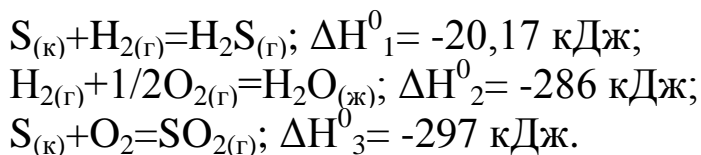
3. Определите  $\Delta H^0_{298}$  и  $\Delta U$  системы:  $H_{2(г)} + Cl_{2(г)} = 2HCl_{(г)}$ .

4. Вычислить  $\Delta S^0_{298}$  при стандартных условиях для реакции:  $CO_{(г)} + 3H_{2(г)} = CH_{4(г)} + H_2O_{(ж)}$ . Изменится ли эта величина, если вместо  $H_2O_{(ж)}$  образуется  $H_2O_{(г)}$ .

5. Можно ли хранить кальций в атмосфере: а) азота; б)  $CO_2$ ; в)  $H_2O_{(п)}$  в стандартных условиях? Ответ подтвердить расчетом.

### ВАРИАНТ 15

1. Рассчитайте тепловой эффект реакций горения сероводорода  $H_2S + 3/2O_2 = H_2O_{(ж)} + SO_{2(г)}$  по следующим данными:



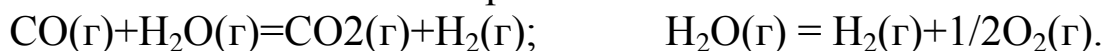
2. Разложение гремучей ртути при взрыве идет по уравнению:  
 $Hg(OCN)_2 = Hg + 2CO + N_2$ ;  $\Delta H^0_{298} = -364,2 \text{ кДж}$ . Определите объем выделившихся газов (н.у.) и количество теплоты, выделившейся при взрыве 1,5 кг  $Hg(OCN)_2$

3. Определите  $\Delta H^0_{298}$  и  $\Delta U^0$  системы:



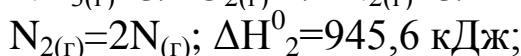
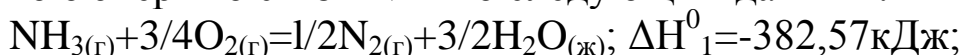
4. Рассчитайте стандартную энтропию оксида железа (III), если энтропия реакции  $4FeO_{(к)} + O_{2(г)} = 2Fe_2O_{3(г)}$  равна  $-259 \text{ Дж/К}$ .

5. Укажите какие из приведенных реакций протекают самопроизвольно и являются экзотермическими:



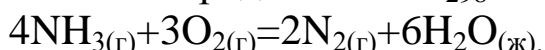
## ВАРИАНТ 16

1. Вычислите стандартную энтальпию образования аммиака и среднюю энергию связи N-H по следующим данным:



2. Сколько теплоты выделится при разложении 54г глюкозы по реакции:  $C_6H_{12}O_{6(к)} = 2C_2H_5OH_{(ж)} + 2CO_{2(г)}$ .

3. Определите  $\Delta H^0_{298}$  и  $\Delta U^0$  системы:

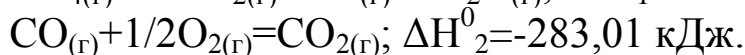
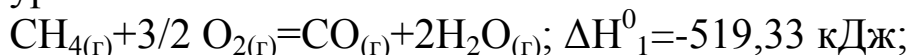


4. Стандартная энтропия реакции  $2ZnS_{(к)} + 3O_{2(г)} = 2ZnO_{(к)} + 2SO_{2(г)}$  равна  $-147 \text{ Дж/К}$ . Рассчитайте стандартную энтропию  $ZnS$ . Сравните полученное значение со справочными данными.

5. Укажите какие из приведенных реакций протекают самопроизвольно и являются экзотермическими:  $3H_{2(г)} + N_{2(г)} = 2NH_{3(г)}$ ;  $SO_{2(г)} + 1/2 O_{2(г)} = SO_{3(г)}$ .

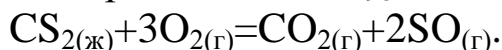
## ВАРИАНТ 17

1. Вычислите изменение стандартной энтальпии реакции:  $CH_{4(г)} + 2O_{2(г)} = CO_{2(г)} + 2H_2O_{(г)}$ , исходя из следующих термохимических уравнений:

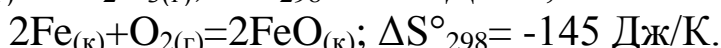
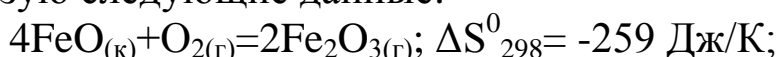


2. Окисление аммиака протекает по уравнению  $4\text{NH}_{3(\text{г})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{N}_{2(\text{г})} + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$ ;  $\Delta H_{\text{х.п}}^0 = -1528 \text{ кДж}$ . Определите стандартную теплоту образования  $\text{NH}_{3(\text{г})}$  и  $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$ , если теплота растворения  $\text{NH}_3$  в воде равна  $-34,65 \text{ кДж}$ .

3. Определите  $\Delta H_{298}^0$  и  $\Delta U^0$  системы:



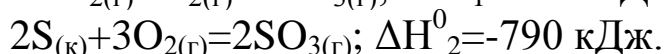
4. Рассчитайте стандартную энтропию оксида железа (III), используя следующие данные:



5. При какой температуре наступит равновесие в системе  $\text{CH}_{4(\text{г})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} = \text{CO}_{(\text{г})} + 3\text{H}_{2(\text{г})}$ .

### ВАРИАНТ 18

1. Вычислите  $\Delta H_{298}^0$  реакции  $\text{S}_{(\text{к})} + \text{O}_{2(\text{г})} = \text{SO}_{2(\text{г})}$ , используя следующие данные:  $2\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{SO}_{3(\text{г})}$ ;  $\Delta H_1^0 = -196 \text{ кДж}$ ;



2. По стандартным теплотам сгорания веществ рассчитайте  $\Delta H_{298}$  системы:  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{ж})} + \text{CH}_3\text{COOH}_{(\text{ж})} = \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$ .

3. Найдите изменение внутренней энергии при испарении 100 г бензола при 100 С, приняв, что пары толуола подчиняются законам идеальных газов. Теплота испарения бензола равна 394 Дж/г. Объемом жидкости пренебречь.

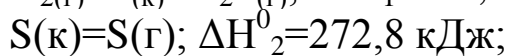
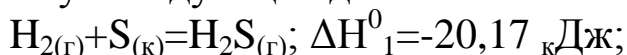
4. Предскажите знак энтропии в реакциях:

$\text{MgO}_{(\text{к})} + \text{H}_{2(\text{г})} = \text{Mg}_{(\text{к})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$        $\text{FeO}_{(\text{к})} + \text{C}_{(\text{гр})} = \text{Fe}_{(\text{к})} + \text{CO}_{(\text{г})}$ . Докажите Ваши предположения расчетом. В каких реакциях изменения энтропии способствует самопроизвольному протеканию реакции.

6. При какой температуре наступит равновесие в системе  $2\text{H}_2\text{S}_{(\text{г})} + \text{SO}_{2(\text{г})} = 3\text{S}_{(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ .

### ВАРИАНТ 19

1. Рассчитайте среднюю энергию связи S-H в молекуле  $\text{H}_2\text{S}$ , используя следующие данные:

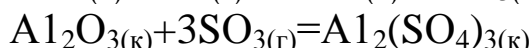
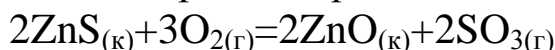


2. Восстановление  $\text{PbO}_2$  водородом протекает по уравнению:  $\text{PbO}_2 + \text{H}_2 = \text{PbO} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ . При взаимодействии 1,12 л водорода

выделяется 9,14 кДж теплоты. Определите стандартную теплоту образования  $\text{PbO}_2$ .

3. Найдите изменение внутренней энергии при испарении 50 г этилового спирта при  $30^\circ\text{C}$ , приняв, что пары этилового спирта подчиняются законам идеальных газов. Теплота испарения этилового спирта равна 857,7 Дж/г. Объемом жидкости пренебречь.

4. Предскажите знак энтропии в реакциях:

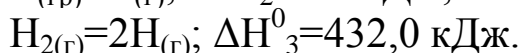
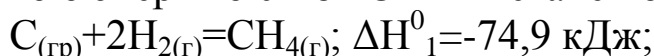


Докажите Ваши предположения расчетом. В каких реакциях изменения энтропии способствует самопроизвольному протеканию реакции.

5. Проанализировав энтальпийный и энтропийный факторы, сделайте вывод о наличии окислительных свойств у одного из реагентов:  $2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} + 2\text{Cl}_2 = 4\text{HCl}_{(\text{г})} + \text{O}_2$ .

## ВАРИАНТ 20

1. Рассчитайте атомарную энтальпию образования  $\text{CH}_4$  и среднюю энергию связи С-Н в метане по следующим данным:

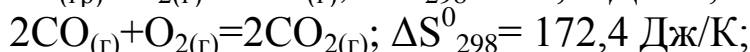
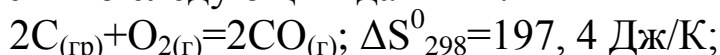


2. Вычислите тепловой эффект реакции

$\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{к})} + 3\text{SO}_{3(\text{г})} = \text{Al}_2(\text{SO}_4)_{3(\text{к})}$ . Какая масса оксида алюминия взаимодействует, если выделяется 3000 кДж теплоты.

3. Найдите изменение внутренней энергии при конденсации 100 г воды при  $25^\circ\text{C}$ , приняв, что пары воды подчиняются законам идеальных газов. Удельная теплота парообразования воды равна 2541 Дж/г. Объемом жидкости пренебречь.

4. Рассчитайте энтропию реакции образования  $\text{CO}_2$  из простых веществ по следующим данным:



5. Проанализировав энтальпийный и энтропийный факторы, сделайте вывод, какая степень окисления более устойчива для олова и свинца:  $2\text{SnO} + \text{O}_2 = 2\text{SnO}_2$                        $2\text{PbO} + \text{O}_2 = 2\text{PbO}_2$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

*Термодинамические характеристики некоторых  
неорганических веществ*

Эле- мент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
Азот	N <sub>2</sub>	0,00	199,90	0,00
	N <sub>2</sub> O	82,00	219,90	104,10
	NO	90,25	210,60	86,58
	N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83,30	307,00	140,50
	NO <sub>2</sub>	33,00	240,20	51,50
	N <sub>2</sub> O <sub>4(г)</sub>	9,66	304,00	98,28
	N <sub>2</sub> O <sub>4(ж)</sub>	-19,00	209,00	-81,30
	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-42,70	178,00	114,10
	NF <sub>3</sub>	-126,00	260,60	-84,40
	HN <sub>3</sub>	294,00	238,80	328,00
	HNO <sub>3</sub>	-174,10	156,60	-80,80
	NH <sub>3</sub>	-46,19	192,60	-16,71
	N <sub>2</sub> H <sub>4(г)</sub>	95,00	283,00	10,70
	N <sub>2</sub> H <sub>4(ж)</sub>	50,50	121,00	149,20
	N <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (газ)	-205,00	264,00	-79,10
	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> · 2HCl	-364,00	-	-
	NH <sub>2</sub> OH	-115,00	66,50	-17,40
	NH <sub>2</sub> OH· 2HCl	-312,00	-	-
	(CN) <sub>2</sub>	307,30	241,80	309,20
	NH <sub>4</sub> Br	-270,10	112,80	-174,70
	NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub>	-1051,00	140,60	-886,20
	NH <sub>4</sub> I	-201,00	117,00	-112,00
	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-365,40	151,00	-183,80
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1180,00	220,00	-901,30
	NH <sub>4</sub> F	-463,60	71,96	-348,40
	NH <sub>4</sub> Cl	-314,20	95,80	-203,20
	NH <sub>4</sub> NO <sub>2</sub>	-238,00	254,00	-358,70
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	-1287,00	173,00	-1338,60	
NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	-850,00	-	-660,00	

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Азот</b>	$\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$	-615,00	-	-
	$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$	-1424,00	-	-
	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$	-1648,00	-	-
	$(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	-1799,00	-	-
	$\text{NH}_4\text{CNS}$	-82,00	-	-
	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	-167,00	-	-
	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	-156,60	-	-
	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	-1446,00	152,00	-1211,00
	$\text{HCN}$	135,00	125,50	131,10
<b>Алюминий</b>	Al	0,00	28,35	0,00
	$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$	-11886,00	1413,00	-9870,00
	$\text{AlBr}_3$	-513,40	180,20	-490,60
	$\text{Al}(\text{OH})_3$ (гиббсит)	-1315,00	70,10	-1157,00
	$\text{AlO}(\text{OH})$ (диаспор)	-981,00	35,20	-923,50
	$\text{AlO}(\text{OH})$ (бемит)	-985,00	48,43	-910,70
	$\text{AlH}_3$	-11,40	30,00	46,40
	$\text{AlI}_3$	-308,00	189,50	-304,00
	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$	-12115,00	1375,00	-10274,00
	$\text{Al}_4\text{C}_3$	-209,00	88,95	-196,00
	$\text{AlN}$	318,00	20,20	287,40
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (корунд)	-1676,00	50,92	-1582,00
	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	-3442,00	239,20	-3101,00
	$\text{AlF}_3$	-1510,00	66,48	-1431,00
	$\text{AlCl}_3$	-704,20	109,30	-628,60
	$\text{Al}_2\text{S}_3$	-509,00	96,00	-537,60
	$\text{Al}_2\text{Cl}_6$	-1293,00	444,00	-1425,30
<b>Аргон</b>	Ar	0,00	154,70	0,00
<b>Барий</b>	Ba	0,00	67,00	0,00
	$\text{BaBr}_2$	-756,50	150,00	-732,00
	$\text{Ba}(\text{OH})_2$	-950,00	124,00	-886,00
	$\text{BaI}_2$	-605,40	167,00	-619,00
	$\text{BaCO}_3$	-1219,00	112,00	-1139,00
	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	-991,90	214,00	-795,00
	$\text{BaO}$	-558,10	70,30	-528,40
	$\text{BaO}_2$	-629,70	65,70	-587,90

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Барий</b>	BaSO <sub>4</sub>	-1465,00	132,00	-1353,00
	BaS	-443,50	78,20	-437,20
	BaF <sub>2</sub>	-1200,00	96,2,00	-1149,00
	BaCl <sub>2</sub>	-860,10	126,00	-810,90
	BaH <sub>2</sub>	-179,00	-	-130,00
<b>Бериллий</b>	Be	0,00	9,54	0,00
	BeBr <sub>2</sub>	-330,00	103,00	-354,00
	Be(OH) <sub>2</sub>	-907,00	55,60	-818,00
	BeI <sub>2</sub>	-165,00	130,00	-210,00
	BeCO <sub>3</sub>	-982,00	-	-944,70
	BeO <sub>(бромелит)</sub>	-598,00	14,10	-582,00
	BeSO <sub>4</sub>	-1197,00	90,00	-1088,00
	BeF <sub>2</sub>	-1010,00	45,00	-941,00
	BeS	-235,00	34,00	-245,10
	BeCl <sub>2</sub>	-494,00	63,00	-468,00
<b>Бор</b>	B	0,00	5,86	0,00
	BN	-252,60	14,80	-226,80
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1254,00	80,80	-
	BF <sub>3</sub>	-1137,00	254,30	-1120,00
	BCl <sub>3</sub>	-427,10	206,00	-387,20
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	-1094,00	88,74	-968,80
	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	38,50	232,00	89,60
	B <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	67,80	-	-
<b>Бром</b>	Br <sub>2</sub>	0,00	152,20	0,00
	BrF	-42,40	228,90	-57,70
	BrF <sub>3</sub>	-303,10	178,10	-242,90
	BrF <sub>5</sub>	-460,70	-	-
	HBr	-34,10	198,60	-51,20
<b>Ванадий</b>	V	0,00	28,90	0,00
	VC	-104,60	24,90	-101,90
	VO	-431,80	33,60	-402,60
	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1219,10	98,30	-1139,40
	VO <sub>2</sub>	-720,00	51,57	-665,00
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-1552,00	131,00	-1421,20
	VF <sub>5(ж)</sub>	-1480,90	191,90	-1378,40



Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Ванадий</b>	VC1 <sub>4</sub>	-569,80	259,00	-505,60
	VF <sub>4</sub>	-1412,00	126,00	-1320,00
<b>Висмут</b>	Bi	0,00	56,90	0,00
	BiBr <sub>3</sub>	-259,00	-	-
	Bi(OH) <sub>3</sub>	-712	-	-
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-577,80	151,00	-497,30
	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-155,60	200,40	-152,90
	BiCl <sub>3</sub>	-379,00	172,00	-313,10
	Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-2552,00	-	-
<b>Водород</b>	H <sub>2</sub>	0,00	130,52	0,00
	D <sub>2</sub>	0,00	144,86	0,00
	T <sub>2</sub>	0,00	153,22	0,00
	H <sub>2</sub> O(ж)	-285,83	70,08	-237,24
	H <sub>2</sub> O(г)	-241,82	188,72	-228,61
	D <sub>2</sub> O(ж)	-294,60	75,90	-243,48
	D <sub>2</sub> O(г)	-249,20	198,24	-234,56
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-187,80	109,50	-120,40
<b>Вольфрам</b>	W	0,00	32,70	0,00
	WC (α)	-41,00	35,00	-39,50
	W <sub>2</sub> C (β)	-26,00	81,60	-29,50
	WO <sub>2</sub> (δ)	-589,50	50,54	-533,70
	WO <sub>3</sub> (α)	-842,70	75,94	-763,90
	WF <sub>6</sub>	-1721,50	353,50	-1635,90
	WC1 <sub>5</sub>	-517,60	230,00	-410,20
	WC1 <sub>6</sub>	-598,30	268,00	-469,00
	H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> (орто)	-1132,00	117,20	-1036,40
<b>Гадолиний</b>	Gd	0,00	68,20	0,00
<b>Галлий</b>	Ga	0,00	41,10	0,00
	Ga <sub>2</sub> O	-365,00	-	-
	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (β)	-1089,00	-	-998,20
	GaCl <sub>3</sub> (Ga <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> )	-524,70	-	-
<b>Гафний</b>	Hf (α)	0,00	43,55	0,00
	HfO <sub>2</sub>	-1117,50	59,33	1061,10
	HfF <sub>4</sub>	-1930,00	113,00	-1830,00
	HfCl <sub>4</sub>	-990,00	191,00	-901,00

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Гелий</b>	He	0,00	126,40	0,00
<b>Германий</b>	Ge	0,00	31,10	0,00
	GeO	-225,00	-	-
	GeO <sub>2</sub>	-554,70	55,27	-500,80
	GeS	-70,09	65,98	-70,97
	GeS <sub>2</sub>	-38,38	78,28	-39,90
	GrF <sub>4</sub>	-1190,00	303,00	-1150,00
	GeCl <sub>4(r)</sub>	-504,60	347,70	-466,00
	GeH <sub>4</sub>	90,80	217,10	113,20
<b>Гольмий</b>	Ho	0,00	74,90	0,00
<b>Диспрозий</b>	Dy	0,00	74,90	0,00
<b>Европий</b>	Eu	0,00	71,10	0,00
<b>Железо</b>	Fe	0,00	27,15	0,00
	FeBr <sub>2</sub>	-251,40	140,00	-239,60
	FeBr <sub>3</sub>	-269,00	184,00	-246,00
	Fe(OH) <sub>2</sub>	-561,70	88,00	-479,70
	Fe(OH) <sub>3</sub>	-826,60	105,00	-699,60
	FeI <sub>2</sub>	-116,30	170,00	-124,20
	Fe <sub>3</sub> C	25,00	10,80	18,80
	FeCO <sub>3</sub>	-738,15	95,40	-665,10
	Fe(CO) <sub>5</sub>	-764,00	338,00	-695,20
	Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	-3339,00	-	-
	FeO	-264,80	60,75	-244,30
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-1117,10	146,20	-1014,20
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-822,20	87,40	-740,30
	FeSO <sub>4</sub>	-3016,00	409,10	-2512,00
	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-2584,00	282,80	-2253,00
	FeS	-100,40	60,29	-100,80
	FeS <sub>2</sub>	-163,20	52,93	-151,80
	FeF <sub>2</sub>	-661,00	87,03	-618,50
	FeF <sub>3</sub>	-1000,00	-	-
	FeCl <sub>2</sub>	-341,45	118,00	-302,35
	FeCl <sub>3</sub>	-399,40	-	-

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Золото</b>	Au	0,00	47,70	0,00
	AuBr <sub>3</sub> (Au <sub>2</sub> Br <sub>6</sub> )	-54,00	-	-18,00
	Au(OH) <sub>3</sub>	-477,80	121,00	-349,80
	Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-13,00	-	78,70
	AuCl	-36,40	85,17	-14,60
	AuCl <sub>3</sub>	-118,40	164,40	-53,60
<b>Индий</b>	In	0,00	57,82	0,00
	In(OH) <sub>3</sub>	-760,00	-	-
	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-925,90	107,90	-831,90
	In <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-2725,50	302,10	-2385,70
	InCl	-186,20	95,00	-164,00
	InCl <sub>3</sub>	-537,20	-	-
<b>Иод</b>	I <sub>2</sub>	0,00	116,15	0,00
	IBr	-10,33	258,70	3,60
	IF <sub>5</sub>	-834,30	328,90	-763,90
	ICl <sub>(г)</sub>	-35,35	247,40	-5,81
	ICl <sub>3</sub>	-88,30	-	-
	HI	26,57	206,48	1,78
	H <sub>5</sub> IO <sub>6</sub>	-761,50	-	-
	HIO <sub>3</sub>	-243,10	-	-
<b>Иридий</b>	Ir	0,00	35,48	0,00
	IrO <sub>2</sub>	-243,00	59,00	-188,40
	IrF <sub>6(г)</sub>	-544,00	357,70	-458,70
<b>Иридий</b>	IrCl <sub>2</sub>	-179,10	-	-139,70
	IrCl <sub>3</sub>	-242,70	-	-198,70
<b>Иттербий</b>	Yb	0,00	62,76	0,00
<b>Иттрий</b>	Y	0,00	46,00	0,00
	Y(OH) <sub>3</sub>	-1412,50	-	1290,00
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1904,00	99,20	-1800,00
	YCl <sub>3</sub>	-982,40	136,80	-900,00
<b>Кадмий</b>	Cd	0,00	51,76	0,00
	CdBr <sub>2</sub>	-315,30	138,83	-295,80
	Cd(OH) <sub>2</sub>	-561,50	93,04	-473,80
	CdI <sub>2</sub>	-204,20	158,32	-201,30
	CdCO <sub>3</sub>	-754,60	96,70	-674,50

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Кадмий</b>	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$	-1236,50	393,00	-1653,20
	$\text{CdO}$	-260,00	54,80	-229,30
	$\text{CdSO}_4$	-934,40	123,05	-823,90
	$\text{CdS}$	-156,90	71,10	-153,20
	$\text{CdF}_2$	-700,40	84,00	-649,50
	$\text{CdCl}_2$	-390,80	115,27	-343,20
<b>Калий</b>	$\text{K}(\text{тв})$	0,00	71,45	0,00
	$\text{K}(\text{г})$	89,16	160,23	60,67
	$\text{KBrO}_3$	-332,20	149,20	-243,50
	$\text{KBr}$	-392,50	95,85	-378,80
	$\text{KH}$	-63,40	50,20	-34,00
	$\text{KOH}$	-425,80	79,32	-380,20
	$\text{KIO}_3$	-508,40	151,46	-425,50
	$\text{KI}$	-327,60	110,79	-324,10
	$\text{K}_2\text{CO}_3$	-1146,10	156,32	-1059,80
	$\text{KHCO}_3$	-959,30	128,70	-860,60
	$\text{KNO}_3$	-493,20	132,27	393,10
	$\text{KNO}_2$	-370,30	117,00	-281,60
	$\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-1342,20	-	-
	$\text{K}_2\text{O}$	-363,20	94,10	-322,10
	$\text{KMnO}_4$	-813,40	171,71	-713,80
	$\text{K}_2\text{O}_2$	-495,80	113,00	-713,80
	$\text{KClO}_4$	-430,10	151,00	-300,40
	$\text{KSCN}$	-203,40	-	-
	$\text{K}_2\text{SO}_4 (\beta)$	-1433,70	175,70	-1316,40
	$\text{KHSO}_4$	-1158,10	-	-1043,50
	$\text{K}_2\text{S}$	-428,40	111,30	-404,20
	$\text{KHS}$	-264,40	-	-
	$\text{K}_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} (\text{обв})$	-1116,70	156,50	-1025,00
	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$	-1517,10	-	-
	$\text{KO}_2$	-280,00	46,90	-209,00
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	-1568,60	134,85	-1419,20
	$\text{KF}$	-567,40	66,60	-537,70
	$\text{KHF}_2$	-928,45	104,60	-860,45
$\text{KClO}_3$	-391,20	142,97	-289,90	

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Калий</b>	KCl	-435,90	82,56	-408,00
	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	-1382,80	193,30	-1286,00
	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-2033,00	291,20	-1866,00
	KCN	-112,50	137,03	-103,90
	K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]	-1423,80	598,00	-1097,50
	K <sub>3</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]	-173,20	420,10	-51,90
<b>Кальций</b>	Ca	0,00	41,63	0,00
	CaBr <sub>2</sub>	-674,90	130,00	-656,10
	CaBr <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-	303,72	-2118,90
	CaWO <sub>4</sub>	-1683,60	151,00	-1576,90
	CaH <sub>2</sub>	-188,70	42,00	-149,80
	Ca(OH) <sub>2</sub>	-986,60	76,10	-896,80
	CaI <sub>2</sub>	-534,70	142,00	-529,70
	CaC <sub>2</sub>	-62,80	70,30	-67,80
	CaCO <sub>3</sub> (аргонит)	-1207,00	88,70	-1127,70
	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	158,60	-2175,70
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-937,20	193,30	-742,00
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	-2131,20	339,00	-1700,80
	Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	-431,80	105,00	-368,60
	CaO	-635,50	39,70	-604,20
<b>Кальций</b>	CaO <sub>2</sub>	-651,70	43,10	-598,00
	CaSO <sub>4</sub> (β)	-1432,70	106,70	-1320,30
	CaSO <sub>4</sub> · 0,5H <sub>2</sub> O	-1573,00	134,00	-1435,00
	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	-2021,10	193,97	-1795,70
	CaS	-482,40	56,50	-477,40
	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (β)	-4137,60	236,00	-3899,50
	CaHPO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O <sub>(бв)</sub>	-1820,90	167,88	-1679,90
	CaHPO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	-3417,60	259,83	-3094,90
	CaF <sub>2</sub>	-1214,60	68,87	-1161,90
	CaCO <sub>3</sub>	-1206,90	92,90	-1128,80
	CaCl <sub>2</sub>	-795,00	113,80	-750,20
	CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-	284,93	-2197,5
<b>Кислород</b>	O <sub>2</sub>	0,00	205,04	0,00
	O <sub>3</sub>	142,30	238,800	162,70
	OF <sub>2</sub>	25,10	246,98	42,50

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Кобальт</b>	Co	0,00	30,04	0,00
	CoBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O(об)	-232,20	135,60	-210,50
	Co(OH) <sub>2</sub>	-541,00	82,00	-456,10
	CoI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O(об)	-102,10	158,20	-97,50
	CoCO <sub>3</sub>	-722,60	-	-651,00
	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	-1655,60	-	-
	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-430,50	192,00	-230,50
	CoO	-239,30	43,90	-213,40
	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-879,00	149,66	-761,50
	CoSO <sub>4</sub>	-868,20	113,40	-761,90
	CoS	-84,50	-	-96,10
	CoCl <sub>2</sub>	-325,50	106,30	-282,40
	CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	-1735,90	-	-
<b>Кремний</b>	Si	0,00	18,82	0,00
	SiC(кб)	-66,10	16,61	-63,70
	SiC(гекс)	-62,80	16,48	-60,35
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	-750,00	95,40	-647,70
	SiO <sub>2</sub> (кварц)	-910,90	41,84	-856,70
	SiO <sub>2</sub> (кристобалит)	-908,30	42,70	-854,20
	SiO <sub>2</sub> (тридимит)	-905,40	43,50	-851,60
	SiF <sub>4</sub>	-1614,90	282,00	-1572,50
	SiCl <sub>4</sub> (г)	-657,50	331,00	-617,60
	SiCl <sub>4</sub> (ж)	-687,80	239,70	-
	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (мета)	-1188,30	-	-
	SiH <sub>4</sub>	34,70	204,56	57,20
	Si <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	79,90	274,50	126,10
<b>Криптон</b>	Kr	0,00	163,97	0,00
<b>Ксенон</b>	Xe	0,00	169,57	0,00
	XeO <sub>3</sub>	402,00	-	-
	XeF <sub>4</sub>	-252,00	-	-
<b>Лантан</b>	La	0,00	57,30	0,00
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1793,10	128,40	-1705,80
	La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-3932,10	-	-3598,20
	LaF <sub>3</sub>	-1695,00	-	-
	LaCl <sub>3</sub>	-1070,70	144,30	-1028,80

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Литий</b>	Li	0,00	29,10	0,00
	LiAlH <sub>4</sub>	-117,00	87,90	-48,40
	LiNH <sub>2</sub>	-182,00	-	-
	LiBr	-350,30	66,90	-338,90
	LiH	-90,65	20,03	-68,48
	LiOH	-487,20	42,80	-442,20
	LiI	-271,10	75,70	-266,90
	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-1215,60	90,37	-1132,40
	LiNO <sub>3</sub>	-482,30	105,00	-389,50
	Li <sub>3</sub> N	-198,70	37,70	-155,40
	Li <sub>2</sub> O	-595,80	37,89	-562,10
	LiClO <sub>4</sub>	-381,00	125,50	-254,00
	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1434,40	113,00	-1324,70
	LiF	-612,10	35,90	584,10
	LiCl	-408,30	59,30	-384,00
<b>Лютеций</b>	Lu	0,00	49,40	0,00
<b>Магний</b>	Mg	0,00	32,70	0,00
	MgBr <sub>2</sub>	-517,60	117,00	-
	MgBr <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-2407,00	397,00	-2054,00
	Mg(OH) <sub>2</sub>	-924,70	63,14	-833,70
	MgI <sub>2</sub>	-360,00	138,00	-
	MgCO <sub>3</sub>	-1113,00	65,70	-1029,30
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-2612,30	453,10	-2072,40
	Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	-461,10	87,90	-400,90
	MgO	-601,80	26,90	-569,60
	Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-560,9	-	-432,2
	MgSO <sub>4</sub>	-1301,4	91,6	-1158,7
	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	-3384	-	-2868
	MgF <sub>2</sub>	-1113	57,25	-1071
	MgCl <sub>2</sub>	-641,1	89,88	-591,6
	MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-2499,6	366	-2115,6
<b>Марганец</b>	Mn(α)	0,00	32,00	0,00
	Mn(β)	1,55	34,40	1,38
	Mn(OH) <sub>2</sub>	-700,00	94,90	-618,70
	MnCO <sub>3</sub>	-881,70	109,50	-811,40

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Марганец</b>	$Mn(NO_3)_2$ (бв)	-574,60	169,00	-1810,00
	MnO	-385,10	61,50	-363,30
	$Mn_2O_3$	-957,70	110,50	-879,90
	$Mn_3O_4$ ( $\alpha$ )	-1387,60	154,80	-1282,90
	$MnO_2$	-521,50	53,10	-466,70
	$Mn_2O_7$	-726,30	-	-
	$MnSO_4$	-1066,70	112,50	-959,00
	$MnSO_4 \cdot 7H_2O$	-3136,00	-	-
	MnS ( $\alpha$ )	-214,30	80,80	-219,40
	$MnF_2$ ( $\alpha$ )	-846,70	93,30	-804,60
	$MnCl_2$	-481,20	118,20	-440,40
	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	-1687,40	311,50	-1426,00
<b>Медь</b>	Cu	0,00	33,15	0,00
	CuBr	-103,50	96,11	-99,58
	$CuBr_2$	-143,00	146,00	-131,10
	$Cu(OH)_2$	-444,30	84,00	-359,40
	$CuI$ ( $Cu_2I_2$ )	-68,00	96,70	-69,70
	$(CuOH)_2CO_3$	-1051,00	211,60	-900,90
	$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	-1217,00	-	-
	$Cu_2O$	-173,20	92,93	-150,50
	CuO	-162,00	42,63	-129,40
	$CuSO_4$	-770,90	109,00	-661,80
	$CuSO_4 \alpha \cdot 5H_2O$	-2279,40	300,00	-1879,90
	$Cu_2S$ ( $\beta$ )	-79,50	121,00	-86,30
	CuS	-53,10	66,50	-53,60
	$CuF_2$	-537,60	68,60	-487,80
	$CuCl$	-137,70	87,00	-120,10
	$CuCl_2$	-215,60	108,10	-171,40
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	-818,60	190,60	-660,10	
<b>Молибден</b>	Mo	0,00	28,60	0,00
	MoC ( $\alpha$ )	-10,00	-	-
	$Mo_2C$ ( $\alpha$ )	-46,00	-	-46,90
	$Mo(CO)_6$	-983,20	327,00	-878,60
	$MoO_2$	-589,10	46,28	-533,20
	$MoO_3$	-745,20	77,74	-668,10



Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Молибден</b>	MoF <sub>6</sub>	-1585,40	259,70	-1473,00
	MoCl <sub>3</sub>	-393,00	138,00	-204,00
	MoCl <sub>4</sub>	-479,50	180,00	-391,60
	MoCl <sub>5</sub>	-526,80	230,00	-420,60
	H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	-1046,10	159,00	-950,00
<b>Мышьяк</b>	As <sub>(серый)</sub>	0,00	36,60	0,00
	As <sub>(черный)</sub>	4,20	-	-
	As <sub>(желтый)</sub>	7,50	-	-
	AsH <sub>3</sub>	66,40	223,00	68,90
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (арсенолит)	-1334,70	233,50	-1176,40
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (клаудетит)	-1331,60	245,00	-1178,80
	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-924,90	105,40	-782,40
	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-159,00	163,60	-158,00
<b>Натрий</b>	Na <sub>(тв)</sub>	0,00	51,45	0,00
	Na <sub>(ж)</sub>	107,70	153,61	72,30
	NaN <sub>3</sub>	21,30	70,50	99,40
	NaNH <sub>2</sub>	-118,80	76,90	-59,00
	CH <sub>3</sub> COONa	-710,40	-	-
	NaBO <sub>2</sub>	-1059,00	73,39,00	-
	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (бв)	-3276,70	189,50	-3081,60
	NaBH <sub>4</sub>	-183,30	101,30	-119,50
	NaBO <sub>3</sub>	-342,80	130,50	-252,60
	NaBr	-361,40	86,82	-349,30
	NaBr · 2H <sub>2</sub> O	-951,90	175,30	-827,20
	Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	-1588,00	-	-
	NaH	-56,40	-	-38,00
	NaOH	-425,60	64,40	-380,70
	NaIO <sub>3</sub>	-490,40	135,00	-
	NaI	-287,90	98,50	-284,60
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-1131,00	136,40	-1047,50
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O	-4083,50	-	-3424,50
	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> (бв)	-1466,00	159,00	-1354,00
	NaNO <sub>3</sub>	-466,70	116,00	-365,90
	NaNO <sub>2</sub>	-359,00	106,00	-295,00
	Na <sub>2</sub> O	-416,00	75,27	-377,10

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Натрий</b>	NaMnO <sub>4</sub>	-1682,00	160,00	-
	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-510,40	94,88	-446,90
	NaClO <sub>4</sub>	-382,80	140,00	-282,00
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-1525,40	113,80	-1427,00
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1384,60	149,50	-1266,80
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	-4324,70	591,90	-3642,90
	Na <sub>2</sub> S	-370,30	77,40	-354,80
	NaHS	-	-	-213,00
	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	-1090,00	146,00	-1002,00
	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O <sub>(об)</sub>	-2602,00	-	-1043,00
	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	-	-	-1624,00
	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	-	-	-1624,00
	Na <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-	-	-3001,00
	NaF	-573,60	51,30	-543,30
	NaClO <sub>3</sub>	-365,40	129,70	-275,00
	NaCl	-411,10	72,12,00	-384,00
Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	-1333,00	174,50	-1232,00	
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-1962,00	-	-	
NaCN	-89,80	-	-	
<b>Неодим</b>	Nd	0,00	70,90	0,00
<b>Неон</b>	He	0,00	146,22	0,00
<b>Нептуний</b>	Np	0,00	50,60	0,00
	NpF <sub>4</sub>	-	151,00	-1687,00
	NpF <sub>6</sub>	-	371,30	-
	NpO <sub>2</sub>	-	82,80	-
	NpCl <sub>4</sub>	-995,80	198,70	-899,10
<b>Никель</b>	Ni (β)	0,00	29,90	0,00
	NiBr <sub>2</sub>	-214,00	129,00	-201,00
	Ni(OH) <sub>2</sub>	-543,50	-	-458,30
	Ni(CO) <sub>4</sub>	-629,70	313,40	-
	Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-2215,10	511,30	-1701,20
	NiO	-239,70	37,99	-211,60
	NiSO <sub>4</sub>	-873,50	103,85	-763,80
	NiS (γ)	-79,00	52,97	-76,90
	NiCl <sub>2</sub>	-304,20	98,07	-258,00

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Ниобий</b>	Nb	0,00	36,60	0,00
	NbC	-134,70	35,40	-132,70
	NbN	-234,30	33,30	-204,80
	NbO	-406,00	50,20	-379,40
	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-1898,00	137,20	-1764,10
	NbF <sub>5</sub>	-1813,80	157,30	-1698,70
	NbCl <sub>5</sub>	-797,50	226,00	-687,70
<b>Олово</b>	Sn( $\alpha$ )	-2,00	44,14	0,13
	Sn( $\beta$ )	0,00	51,55	0,00
	SnBr <sub>2</sub>	-260,00	146,00	-252,30
	SnBr <sub>4</sub>	-405,80	-	-321,70
	SnI <sub>2</sub>	-145,20	168,60	-146,00
	SnI <sub>4</sub>	-199,20	-	-
	SnO	-286,00	56,50	-256,90
	SnO <sub>2</sub>	-580,80	52,30	-519,90
	SnSO <sub>4</sub>	-887,00	-	-
	SnS	-110,20	77,00	-108,20
	SnS <sub>2</sub>	-82,40	87,40	-74,10
	SnF <sub>2</sub>	-649,00	-	-
	SnCl <sub>2</sub>	-331,00	-	-
	SnCl <sub>4</sub>	-528,90	299,60	-457,70
<b>Осмий</b>	Os	0,00	32,60	0,00
	OsO <sub>4</sub>	-394,00	164,00	-302,50
	OsCl <sub>4</sub>	-255,00	155,00	-
<b>Палладий</b>	Pd	0,00	37,70	0,00
	PdO	-115,50	38,90	-85,30
<b>Платина</b>	Pt	0,00	41,50	0,00
	PtBr <sub>2</sub>	-100,00	53,43	-59,00
	PtBr <sub>4</sub>	-159,00	163,50	-105,00
	PtI <sub>2</sub>	-63,00	-	-
	PtI <sub>4</sub>	-59,40	281,00	-97,90
	PtO <sub>2</sub>	-134,00	-	-84,00
	PtF <sub>6</sub>	-	273,70	-
	PtCl <sub>2</sub>	-106,70	219,60	-93,30
	PtCl <sub>4</sub>	-229,30	267,90	-163,80

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Плутоний</b>	Pu ( $\alpha$ )	0,00	51,50	0,00
	PuO	-565,00	-	-
	PuO <sub>2</sub>	-1056,00	82,40	-995,00
	PuF <sub>3</sub>	-1570,00	-	1494,00
	PuCl <sub>3</sub>	-962,00	159,00	893,00
	PuF <sub>6</sub>	-	369,80	-
<b>Полоний</b>	Po	0,00	62,80	0,00
<b>Празеодим</b>	Pr	0,00	73,90	0,00
<b>Радий</b>	Ra	0,00	71,00	0,00
	RaSO <sub>4</sub>	-1473,00	134,00	-1364,00
	RaCl <sub>2</sub>	-887,00	134,00	-
<b>Рений</b>	Re	0,00	36,50	0,00
	ReO <sub>3</sub>	-592,90	82,80	-514,40
	Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-1272,00	207,20	-1098,00
	ReF <sub>6(ж)</sub>	-1382,10	270,60	-1270,50
	ReCl <sub>5</sub>	-361,00	230,00	-252,60
<b>Родий</b>	Rh	0,00	31,50	0,00
	RhCl <sub>3</sub>	-280,00	159,00	-176,00
<b>Ртуть</b>	Hg	0,00	75,80	0,00
	Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	-207,10	217,70	-181,30
	HgBr <sub>2</sub>	-169,90	179,80	-155,50
	Hg <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	-120,90	235,20	-111,20
	HgI <sub>2</sub>	-105,40	184,05	-103,05
	Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-867,80	-	-
	Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O	-392,00	-	-184,00
	HgO(кр)	-90,90	70,29	-58,60
	HgO(желт)	-90,50	71,29	-58,50
	Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-744,65	200,70	-627,45
	HgSO <sub>4</sub>	-707,90	136,40	-590,00
	HgS ( $\alpha$ )	-59,00	82,40	-51,40
	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (каломель)	-265,10	192,76	-210,80
	HgCl <sub>2</sub> (сулема)	-228,20	140,02	-180,90
	<b>Рубидий</b>	Rb	0,00	75,70
RbBr		-389,20	112,30	-378,10
RbH		54,31	-	33,9

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Рубидий</b>	RbOH	-413,80	-	-
	RbI	-328,40	118,03	-325,50
	Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-1128,00	-	-1046,00
	RbNO <sub>3</sub>	-489,70	140,60	-390,40
	Rb <sub>2</sub> O	-330,10	-	-
	Rb <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1424,70	-	-
	RbF	-549,30	75,30	-523,40
	RbCl	-430,60	91,60	-405,80
<b>Рутений</b>	Ru	0	28,5	0
	RuO <sub>4(ТВ)</sub>	-239,3	141	150,6
<b>Самарий</b>	Sm	0	68,2	0
<b>Свинец</b>	Pb	0	64,81	0
	Pb(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub>	-960,9	-	-
	PbBr <sub>2</sub>	-282,4	161,75	-265,9
	Pb(OH) <sub>2</sub>	-512,5	-	-451,2
	PbI <sub>2</sub>	-175,2	175,35	-173,6
	PbCO <sub>3</sub>	-699,6	131	-625,9
	PbO(α)	-219,3	66,1	-189,1
	PbO(β)	-217,6	68,7	-188,2
	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-451,7	217,9	-256,9
	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-723,4	211,3	-606,2
	PbO <sub>2</sub> (β)	-276,2	74,89	-218,3
	PbSO <sub>4</sub>	-920,6	148,6	-813,8
	PbS	-100,4	91,2	-98,8
	PbF <sub>2</sub>	-676,6	113	-630,5
	PbCl <sub>2</sub>	-359,8	134,3	-314,05
	PbCrO <sub>4</sub>	-910,9	152,7	-819,6
<b>Селен</b>	Se(α)	0	42,1	0
	Se(стеклов.)	5,4	51,5	2,7
	SeO <sub>2</sub>	-225,5	56,9	-173,6
	SeO <sub>3</sub>	-173,2	84,1	-
	SeF <sub>6</sub>	-1029	313,8	-928,9
	Se <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	-85,4	188	-48,5
	SeCl <sub>4</sub>	-189,5	-	-107,1
	H <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	-524,8	-	-

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Селен</b>	H <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>	-532,6	-	-
	H <sub>2</sub> Se	33	218,8	19,7
<b>Сера</b>	S(α)	0	31,9	0
	S(β)	0,38	32,6	0,19
	S <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	-15	-	-
	SO <sub>2</sub>	-296,9	248,1	-300,2
	SO <sub>3(ж)</sub>	-439,00	122,00	-368,40
	S <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	-228,20	289,90	-
	SF <sub>4</sub>	-770,00	289,80	-725,90
	SF <sub>6</sub>	-1207,00	291,60	-1103,00
	S <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	-58,20	321,00	-26,90
	SCl <sub>2</sub>	-49,40	-	-79
	SCl <sub>4</sub>	-56,10	-	-
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-814,20	156,90	-690,30
	H <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-1272,00	-	-
	H <sub>2</sub> S	-21,00	205,70	-33,80
	SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	-391,20	216,30	-305,00
	SOCl <sub>2</sub>	-247,00	278,60	-
	HSO <sub>3</sub> Cl	-555,20	-	-
	<b>Серебро</b>	Ag	0,00	42,55
AgBr		-100,70	107,10	-97,20
AgI (γ)		-61,90	115,50	-66,40
Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		-506,10	167,40	-437,20
AgNO <sub>3</sub>		-124,50	140,90	-33,60
AgNO <sub>2</sub>		-45,20	128,00	19,00
Ag <sub>2</sub> O		-31,10	121,00	-11,30
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		-717,20	199,80	-619,60
Ag <sub>2</sub> S		-32,80	144,00	-40,80
AgF		-206,00	83,70	-187,90
AgF <sub>2</sub>		-359,40	-	-
AgCl		-127,10	96,11	-109,80
AgCN		145,90	107,20	156,90
<b>Скандий</b>	Sc	0,00	34,30	0,00
	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1908,60	77,00	-1917,50

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Стронций</b>	Sr	0,00	53,10	0,00
	SrBr <sub>2</sub>	-715,90	135,60	-694,50
	SrI <sub>2</sub>	-566,90	159,00	-559,80
	SrCO <sub>3</sub>	-1218,40	97,10	-1137,60
	Sr(OH) <sub>2</sub>	-959,40	86,60	-870,30
	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-975,90	195,50	-778,20
	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	-2152,70	363,60	-1725,50
	SrO	-590,40	54,40	-559,80
	SrS	-452,30	68,20	-447,70
	SrF <sub>2</sub>	-1209,20	81,60	-1160,60
	SrCl <sub>2</sub>	-828,40	117,00	-781,20
	SrSO <sub>4</sub>	-1451,00	119,70	-1334,30
	SrCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-2623,80	350,30	-2226,80
<b>Сурьма</b>	Sb	0,00	45,69	0,00
	SbH <sub>3</sub>	145,10	233,00	147,60
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1417,00	265,30	-1250,80
	Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-1007,50	125,10	-864,70
	Sb <sub>2</sub> S <sub>3(ромб)</sub>	-157,70	181,60	-156,10
	Sb <sub>2</sub> S <sub>3(ам)</sub>	-126,40	-	-
	SbF <sub>3</sub>	-923,40	105,40	-778,00
	SbF <sub>5</sub>	-	353,10	-
	SbCl <sub>3</sub>	-381,20	110,50	-322,50
	SbCl <sub>5</sub>	-437,20	295,00	-345,35
<b>Таллий</b>	Tl	0,00	64,18	0,00
	TlBr	-172,70	122,60	-167,40
	TlOH	-233,50	255,20	-190,60
	Tl(OH) <sub>3</sub>	-516,60	102,10	-
	TlI (α)	-123,70	127,70	-125,30
	Tl <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-709,60	158,60	-615,05
	TlNO <sub>3</sub>	-243,90	164,40	-153,60
	Tl <sub>2</sub> O	-167,40	161,10	-153,10
	Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-390,40	148,10	-321,40
	Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (α)	-933,70	243,50	-83,00
	Tl <sub>2</sub> S	-87,90	-	-87,80

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Таллий</b>	TlF	-327,00	95,69	-306,20
	TlCl	-204,10	111,50	-185,00
	TlCl <sub>3</sub>	-311,30	-	-290,80
<b>Тантал</b>	Ta	0,00	41,50	0,00
	TaC	-141,80	42,34	-140,40
	TaN	-252,30	41,80	-223,80
	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (α)	-2047,00	143,10	-1947,70
	TaF <sub>5</sub>	-1903,60	170,00	-1790,80
	TaCl <sub>5</sub>	-857,90	238,00	-750,50
<b>Теллур</b>	Te	0,00	49,50	0,00
	TeBr <sub>4</sub>	-195,00	71,10	-126,80
	TeI <sub>4</sub>	-63,00	-	-
	TeO <sub>2</sub>	-321,70	58,60	-264,60
	TeF <sub>6</sub>	-1318,00	336,00	-1247,10
	TeCl <sub>4</sub>	-323,80	-	-238,90
	H <sub>2</sub> TeO <sub>3</sub>	-613,00	-	-318,80
	H <sub>6</sub> TeO <sub>6</sub>	-1287,40	-	-
	H <sub>2</sub> Te	99,70	228,80	85,160
<b>Тербий</b>	Tb	0,00	73,20	0,00
<b>Технеций</b>	Tc	0,00	33,50	0,00
	Tc <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-1114,60	191,60	-937,80
<b>Титан</b>	Ti	0,00	30,60	0,00
	TiBr <sub>4</sub>	-619,20	243,50	-592,00
	TiI <sub>4</sub>	-386,60	246,00	-381,60
	TiC	-209,00	24,70	-205,70
	TiN	-323,00	30,30	-294,40
	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1518,00	77,30	-14310
	TiO <sub>2</sub> (анатаз)	-938,60	49,92	-883,30
	TiO <sub>2</sub> (рутил)	-943,90	50,33	-888,60
	TiF <sub>4</sub>	-1649,30	134,00	-1513,50
<b>Титан</b>	TiCl <sub>4</sub>	-804,20	252,50	-737,40
<b>Торий</b>	Th	0	53,39	0
	ThO <sub>2</sub>	-1226,7	64,39	-1168,2
	Th(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-2541,4	148,1	-2306,2
	ThF <sub>4</sub>	-2018,4	142,05	-1924,2



Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Тулий</b>	Tm	0	71,5	0
<b>Углерод</b>	C <sub>(алмаз)</sub>	1,83	2,378	2,83
	C <sub>(графит)</sub>	0,00	5,74	0,00
	CO	-110,50	197,54	-137,14
	CO <sub>2</sub>	-393,51	213,68	-394,38
	CS <sub>2</sub>	88,70	151,00	64,40
<b>Уран</b>	U	0,00	50,30	0,00
	UBr <sub>3</sub>	-711,70	205,00	-689,10
	UBr <sub>4</sub>	-822,60	205,00	-788,70
	UI <sub>4</sub>	-531,40	272,00	-527,60
	UI <sub>3</sub>	-477,80	238,00	-482,40
	UO <sub>2</sub>	-1084,00	77,94	-1030,00
	UO <sub>3</sub> ( $\alpha$ )	-1230,60	-	-1153,00
	UO <sub>3</sub> ( $\gamma$ )	-1226,00	98,70	-
	UF <sub>3</sub>	-1443,00	117,00	-1418,00
	UF <sub>4</sub>	-1883,00	152,00	-1761,00
	UF <sub>5</sub>	-2056,00	188,00	-1929,00
	UF <sub>6</sub>	-2188,00	227,60	-2053,50
	UCl <sub>3</sub>	-891,20	1780,00	-823,80
	UCl <sub>4</sub>	-1051,00	198,30	-962,30
	UCl <sub>5</sub>	-1094,00	242,70	-933,30
	UCl <sub>6</sub>	-1133,00	285,80	-1010,00
	UO <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub>	-2615,00	-	-
	UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-1987,00	-	-1629,00
UO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	-2766,00	-	-	
<b>Фосфор</b>	P(белый)	0,00	41,10	0,00
	P(красный)	-17,40	22,80	-11,90
	P(черный)	-38,90	22,70	-33,40
	PBr <sub>3</sub>	-132,00	348,00	-155,70
	PBr <sub>5</sub>	-289,00	-	-
	PI <sub>3</sub>	-45,60	192,00	-44,80
	P <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	-1640,00	346,90	-
	P <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	-2984,00	228,90	-2697,60
	POF <sub>3</sub>	-1252,00	284,90	-1203,70
	POCl <sub>3</sub>	-597,50	222,50	-521,30

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Фосфор</b>	PF <sub>3</sub>	-956,50	272,60	-935,66
	PF <sub>5</sub>	-1593,00	293,00	-1517,20
	PCl <sub>3</sub>	-311,70 <sub>(ж)</sub>	311,20 <sub>(г)</sub>	-260,50 <sub>(г)</sub>
	PCl <sub>5</sub>	-435,60	-	-
	PH <sub>3</sub>	5,40	210,20	13,40
	P <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	21,00	-	-
	H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>	-952,80	-	-
	HPO <sub>3</sub>	-949,30	-	-
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	-1279,00	110,50	-1119,10
	H <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-224,20	-	-
	H <sub>3</sub> PO <sub>2</sub>	-614,60	-	-
<b>Фтор</b>	F <sub>2</sub>	0,00	202,70	0,00
	HF	-270,70	173,70	-272,80
<b>Хлор</b>	Cl <sub>2</sub>	0,00	222,90	0,00
	Cl <sub>2</sub> O	75,70	266,20	93,40
	ClO <sub>2</sub>	105,00	257,00	122,30
	Cl <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	251,00	-	-
	ClF	-49,90	217,80	-51,40
	ClF <sub>3</sub>	-157,70	281,50	-117,80
	HC1	-91,80	186,80	-94,79
	HC1O <sub>4</sub>	-34,50	188,00	84,31
<b>Хром</b>	Cr	0,00	23,60	0,00
	NH <sub>4</sub> Cr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-11346,00	1423,00	-9349,00
	CrBr <sub>3</sub>	-400,40	159,70	-372,90
	KCr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-2430,00	-	-
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	-79,50	85,44	-81,20
	Cr(CO) <sub>6</sub>	-1077,40	314,00	-970,40
	Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	-	508,40	-
	CrN	-123,40	52,70	-103,50
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1140,60	81,20	-1059,00
	CrO <sub>3</sub>	-590,40	73,20	-
	Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (6B)	-3308,00	287,90	-2984,00
	CrF <sub>3</sub>	-1159,00	94,14	-1089,30
	CrCl <sub>2</sub>	-395,40	115,65	-356,30
	CrCl <sub>3</sub>	-570,30	124,70	-500,70

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Цезий</b>	Cs	0,00	84,35	0,00
	CsBr	-304,60	121,00	-383,30
	CsOH	-406,70	93,30	-362,30
	CsI	-253,10	130,00	-333,50
	Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	188,70	-1039,00
	CsNO <sub>3</sub>	-494,20	149,00	-395,00
	Cs <sub>2</sub> O	-317,60	123,80	-274,50
	Cs <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-402,50	118,00	-327,20
	Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1642,60	205,90	-1300,00
	CsO <sub>2</sub>	-289,50	-	211,30
	CsF	-530,90	79,00	-505,40
	CsCl	-433,00	90,00	-404,20
<b>Церий</b>	Ce	0,00	64,00	0,00
	CeO <sub>2</sub>	-1088,30	62,30	-1025,50
	Ce <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	-6448,00	-	-
	Ce <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-2343,00	201,70	-2123,00
	CeCl <sub>3</sub>	-105,90	171,50	-983,90
<b>Цинк</b>	Zn	0,00	41,63	0,00
	ZnBr <sub>2</sub>	-329,70	136,00	-312,40
	Zn(OH) <sub>2</sub>	-645,40	76,99	-555,90
	ZnI <sub>2</sub>	-208,20	161,50	-209,30
	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	-2306,80	462,30	-1174,90
	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-483,70	-	-
	ZnO	-350,60	43,64	-320,70
	ZnSO <sub>4</sub>	-981,40	110,50	-870,10
	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	-3078,50	388,70	-2563,90
	ZnS <sub>(кб)</sub>	-205,40	57,74	-200,70
	ZnF <sub>2</sub>	-764,40	73,68	-713,50
	ZnCl <sub>2</sub>	-415,05	111,50	-369,40
<b>Цирконий</b>	Zr	0,00	39,00	0,00
	ZrC	-206,70	33,30	-197,40
	ZrN	-371,50	38,90	-343,00
	ZrO <sub>2</sub>	-1100,60	50,38	-1042,80
	Zr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	-3647,00	-	-
	Zr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-2410,00	-	-

Элемент	Вещество	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
<b>Цирконий</b>	ZrF <sub>4</sub>	-1911,30	104,60	-1809,90
	ZrCl <sub>4</sub>	-979,80	181,40	-889,30
	ZrOC1 <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	-3468,00	-	-
	ZrOC1 <sub>2</sub>	-986,60	-	-
<b>Эрбий</b>	Er	-	73,20	-

**Таблица 2**

**Термодинамические характеристики некоторых органических веществ**

Вещество	Формула	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
Анилин	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	29,70	192,00	
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	226,75	200,80	
Ацетон	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	-247,70	200,00	
Ацетонитрил	CH <sub>3</sub> CN	53,10	144,30	100,40
Бензиловый спирт	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> OH	-161,00	216,70	
Бензойная кислота	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COOH	-385,20	167,60	
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	82,93	269,20	
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-124,70	310,00	
Изобутан	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> CH	-131,60	294,64	
Метан	CH <sub>4</sub>	-74,85	186,19	-50,79
Метиловый спирт	CH <sub>3</sub> OH	-238,57	126,80	-166,23
Метилхлорид	CH <sub>3</sub> Cl	-82,00	234,18	-58,60
Карбамид	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	-319,2	173,84	-203,84
Муравьиная кислота	HCOOH	-409,19	128,95	-346,00
Муравьиный альдегид	CH <sub>2</sub> =O	-115,90	218,66	-110,00
Пропилен	CH <sub>3</sub> CH=CH <sub>2</sub>	20,41		
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-103,85		
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-146,44		
Углерод четыреххлористый	CCl <sub>4</sub>	-139,30	214,40	-686,00
Уксусная кислота	CH <sub>3</sub> COOH	-487,00	159,80	-392,50
Хлороформ	CHCl <sub>3</sub>	-131,80	202,90	-71,10
Циановая кислота	HOCN	-146,80	182,40	-120,90

Вещество	Формула	$\Delta H^0_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^0_{298}$ , Дж/моль	$\Delta G^0_{298}$ , кДж/моль
Этан	$C_2H_6$	-84,67	229,49	-32,89
Этиловый спирт	$C_2H_5OH$	-277,63	160,70	-174,80
Этиленгликоль	$CH_2OHCH_2$ OR	-454,30	166,90	-322,70

**Таблица 3**

**Теплота сгорания органических веществ  
в стандартных условиях**

Соединение	$\Delta H^0_{298}$ кДж/моль	Соединение	$\Delta H^0_{298}$ кДж/моль
<b>Углеводороды</b>			
$CH_4$ (г) метан	-890,31	$C_5H_{12}$ (г) пентан	-3536,15
$C_2H_2$ (г) ацетилен	-1299,63	$C_6H_6$ (г) бензол	-3301,59
$C_2H_4$ (г) этилен	-1410,97	$C_6H_6$ (ж) бензол	-3267,70
$C_2H_6$ (г) этан	-1559,88	$C_6H_{12}$ (ж) циклогексан	-3919,91
$C_3H_6$ (г) пропилен	-2058,53	$C_7H_8$ (ж) толуол	-3910,28
$C_3H_8$ (г) пропан	-2220,03	$C_8H_{10}$ (ж) п-ксилол	-4552,86
н- $C_4H_{10}$ (г) н-бутан	-2878,38	$C_{10}H_8$ (кр) нафталин	-5156,78
изо- $C_4H_{10}$ (г) изо-бутан	-2871,69	$C_{14}H_{10}$ (кр) фенантрен	-7049,87
<b>Кислородсодержащие соединения</b>			
$CH_4O$ (ж) метиловый спирт	-726,64	$C_2H_6O$ (ж) этиловый спирт	-1366,91
$C_2H_6O_2$ (ж) гликоль	-1192,86	$C_3H_8O_3$ (ж) глицерин	-1664,40
$C_6H_6O$ (кр) фенол	-3063,52	$C_2H_4O_2$ (ж) уксусная кислота	-873-79
$CH_2O$ (г) формальдегид	-563,58	$C_2H_4O_2$ (кр) щавели- вая кислота	-246,02
$C_2H_4O$ (г) ацетальдегид	-1192,44	$C_7H_6O_2$ (кр) бензойная кислота	-3227,54
$C_3H_6O$ (ж) ацетон	-1789,79	$C_{18}H_{36}O_2$ (кр) стеари- новая кислота	-11274,6
$C_4H_8O_2$ (ж) этилацетат	-2254,21	$C_6H_{12}O_6$ (кр) глюкоза	-2815,8
$C_4H_{10}O$ (ж) диэтило- вый эфир	-2730,90	$C_{10}H_{16}O$ (кр) камфора	-5904

Соединение	$\Delta H_{298}^0$ кДж/моль	Соединение	$\Delta H_{298}^0$ кДж/моль
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ж) муравьиная кислота	-256,48	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> (кр) сахараза	-5648
Галогенсодержащие соединения			
CCl <sub>4</sub> (ж) четыреххлористый углерод	-156,1	CH <sub>3</sub> Cl(г) хлористый метил	-689,1
CHCl <sub>3</sub> (ж) хлороформ	-373,2	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl(ж) хлорбензол	-3140,9
Серусодержащие соединения			
COS(г) сероокись углерода	-553,1	CS <sub>2</sub> (ж) сероуглерод	-257
Азотсодержащие соединения			
CH <sub>4</sub> ON <sub>2</sub> (кр) мочевиная	-634,3	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> O <sub>7</sub> N <sub>3</sub> (кр) пикриновая кислота	-2560,2
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> (г) дициан	1087,8	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> N <sub>2</sub> (кр) о-динитробензол	-2944,3
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>9</sub> N <sub>3</sub> (ж) нитроглицерин	-1541,4	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> N <sub>2</sub> (кр) м-динитробензол	-2917,1
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N(ж) пиридин	-2755,2	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> N <sub>2</sub> (кр) п-динитробензол	-2910,4
Азотсодержащие соединения			
C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> O <sub>6</sub> N <sub>3</sub> (кр) симм-тринитробензол	-2778,2	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N(ж) нитробензол	-3091,2
C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> O <sub>6</sub> N <sub>3</sub> (кр) не-симм-тринитробензол	-2839,3	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> N(кр) п-нитрофенол	-2884
C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> O(ж) анилин	-3396,2		

## ЛИТЕРАТУРА

1. Общая и неорганическая химия [Текст] : учебник для студентов вузов / Н. Н. Павлов. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Дрофа, 2002. – 446.
2. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. Учебник для вузов - 4-е изд., испр - М.: Высш. шк., Изд. центр «Академия», 2001. - 743 с
3. О.С. Зайцев Общая химия. Направление и скорость химических процессов. Строение вещества. М.: Высш. шк., 1983.-248с.
4. Горшков В.И., Кузнецов И.А. Основы физической химии. 2е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 336 с.
5. Глинка Н.Л. Задачи и упражнения по общей химии, М.: Химия, 2004.-254с
6. Задачи и упражнения по общей химии. Под редакцией Н.В. Коровина, М.: Высш. шк., 2004.-254.
7. Карапетьянц М.Х. Примеры и задачи по химической термодинамике / Учебное пособие. - 5-е изд. - Москва: Либроком, 2013. - 304 с.
8. Васильева З.Г., Грановская А.А., Таперова А.А. Лабораторные работы по общей и неорганической химии. Л.: Химия, 1986.
9. С.А. Пузаков Химия, М.: Медицина, 1995.-624 с.
10. С.А. Балезин, Г.С. Парфенов Основы физической и коллоидной химии, М.: Учпедгиздат, 1959, 440 с.

