

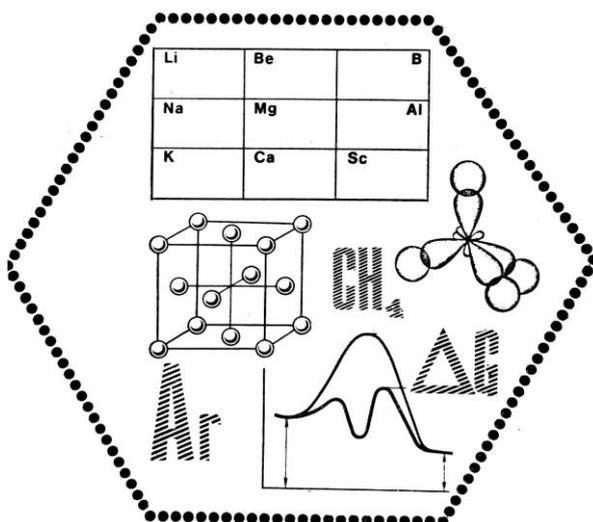
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»  
ДЗЕРЖИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)

Кафедра «ХИМИЯ»

# ТЕРМОДИНАМИКА ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для студентов направлений подготовки 140400, 151000, 190600, 220700, 230400,  
240100, 240300, 260100, 280700 всех форм обучения



Нижний Новгород 2014

Составители: В.Ф. Макаров, Ю.В. Прусов, В.Л. Краснов

УДК 541

**Термодинамика химических процессов:** метод. указания для студентов направлений подготовки 140400, 151000, 190600, 220700, 230400, 240100, 240300, 260100, 280700 всех форм обучения/ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; сост.: В.Ф. Макаров, Ю.В. Прусов, В.Л. Краснов. - Н. Новгород, 2014. - 34 с.

Методические указания содержат теоретические сведения по теме "Термодинамика химических процессов", задачи для самостоятельного решения, а также примеры тестовых и варианты домашних заданий.

Редактор В.И. Бондарь

Подписано в печать 05.03. 2014. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага газетная.  
Печать офсетная. Усл. печ.л. 1,8. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.  
Типография НГТУ. 603950, Н. Новгород, ул. Минина, 24.

©Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2014

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Химическая термодинамика рассматривает энергетику химических реакций, фазовые и химические равновесия, зависимость термодинамических свойств веществ от их состава и агрегатного состояния. В термодинамике широко используется понятие “термодинамическая система”. Она представляет изолированную часть пространства, содержащую тело или совокупность тел с большим числом частиц, для которой возможен массо- и теплообмен.

Состояние системы определяется с помощью термодинамических параметров – температуры, давления, объема, массы. Образованные от них функции называются термодинамическими функциями, среди которых наиболее широко используются в термодинамике: внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $H$ , свободная энергия Гиббса  $G$  и энтропия  $S$ .

### 1.1 Внутренняя энергия и энтальпия системы

В любом процессе соблюдается закон сохранения энергии. Этот закон выражается равенством

$$Q = \Delta U + A, \quad (1)$$

которое означает, что если к системе подводится теплота  $Q$ , то в общем случае она расходуется на изменение внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение работы  $A$  против внешних сил. Внутренняя энергия – это общий запас энергии системы, который складывается из энергии движения и взаимодействия молекул, энергии колебательного движения атомов, энергии движения и взаимодействия ядер к электронам в атомах и т.д. Под величиной  $A$  понимают работу против всех сил, действующих на систему (внешнее давление, электрические и магнитные поля и т.д.). При постоянном давлении, когда имеет место только механическая работа расширения или уменьшения объема, работа равна произведению давления  $P$  на изменение объема системы  $\Delta V$ :

$$A = P \cdot \Delta V.$$

Следовательно, для изобарного процесса ( $P = \text{const}$ ) уравнение (1) имеет вид

$$\begin{aligned} Q_p &= \Delta U + P \Delta V, \\ Q_p &= (U_2 - U_1) + P(V_2 - V_1), \\ Q_p &= (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1). \end{aligned} \quad (2)$$

Введем обозначение  $H = U + PV$ , тогда  $Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H$ .

Величина  $H$  называется энтальпией. Ее рассматривают как энергию расширенной системы. Таким образом, для изобарного процесса энергетический эффект численно равен изменению энтальпии системы:  $Q_p = \Delta H$ .

## 1.2 Тепловой эффект реакции. Закон Гесса

Химические реакции сопровождаются выделением или поглощением энергии в различных формах: в виде световой, механической, электрической и др.

Количество энергии, выделенное или поглощенное системой в ходе реакции, проведенной при постоянной температуре, называется тепловым эффектом реакции.

На практике большинство химических процессов проводят при постоянном давлении, поэтому под тепловым эффектом реакции понимают изменение энтальпии системы при реакции.

При экзотермических реакциях теплота выделяется, т.е. уменьшается энтальпия и, значит,  $\Delta H$  должно быть отрицательным ( $\Delta H < 0$ ).

При эндотермических реакциях теплота поглощается, т.е. возрастает энтальпия и, значит,  $\Delta H$  должно быть положительным ( $\Delta H > 0$ ).

Тепловой эффект реакции в международной системе СИ выражают в килоджоулях (1 ккал = 4,184 кДж) и относят к одному молю вещества при стандартных условиях. За стандартные принимают давление 101325 Па или 760 мм рт. ст. и температуру чаще всего 298,15 К (25°C). Стандартные тепловые эффекты принято обозначать  $\Delta H^\circ_{298}$  (в данной работе обозначено  $\Delta H^\circ$ ).

Химические уравнения, в которых указаны тепловые эффекты, называются термохимическими уравнениями. Тепловой эффект реакции (изменение энтальпии) при некоторых химических реакциях можно определить с помощью калориметров или с помощью расчетов по термохимическим законам.

В основе термохимических расчетов лежит закон Гесса: изменение энтальпии при реакции зависит лишь от природы и состояния исходных веществ и продуктов реакции, но не зависит от промежуточных стадий процесса.

Рассмотрим использование этого закона на примере получения оксида углерода (IV) из графита. Процесс можно провести в одну или две стадии:



или:





Согласно закону Гесса,  $\Delta H^\circ = \Delta H^\circ_1 + \Delta H^\circ_2$ . Это означает, что независимо от того, провели ли процесс образования оксида углерода (IV) в одну или две стадии, общий тепловой эффект будет одним и тем же.

### 1.3 Энтальпия образования

В термохимических расчетах широко используются энтальпии (теплоты) образования веществ. Энтальпией образования химического соединения называется энтальпия процесса образования одного моля соединения из простых веществ. Обычно используют стандартные энтальпии образования, их обозначают  $\Delta H^\circ_{298}$ .

Стандартные энтальпии образования простых веществ для тех агрегатных состояний, в которых они устойчивы при стандартных условиях, принимают равными нулю. Так, к нулю приравниваются  $\Delta H^\circ$  всех простых газов ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и т.д.), жидкостей ( $Hg$ ,  $Br_2$ ) и простых твердых веществ. Если простое вещество при стандартных условиях может существовать в нескольких модификациях, то к нулю приравнивается  $\Delta H^\circ$  наиболее устойчивая модификация. Наиболее устойчивой модификацией кислорода является молекулярный кислород, для него  $\Delta H^\circ = 0$ , менее устойчивой - озон, для него  $\Delta H^\circ = 142,3$  кДж, и еще менее устойчивой - атомарный кислород, для него  $\Delta H^\circ = 246,8$  кДж.

При термохимических расчетах часто используют следствие из закона Гесса: стандартное изменение энтальпии химической реакции равно сумме стандартных энтальпий образования продуктов реакции за вычетом суммы стандартных энтальпий образования исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов, т.е.

$$\Delta H = \sum n \Delta H_{\text{прод}} - \sum n \Delta H_{\text{исх.}}$$

Используя стандартные энтальпии образования веществ, можно расчетным путем установить энергетические эффекты различных процессов.

### 1.4 Энтальпия сгорания

Большинство органических соединений не удается получить прямым синтезом из простых веществ, поэтому энтальпии их образования экспериментально определены быть не могут. Для них опытным путем может быть определена энтальпия сгорания. Зная энтальпию сгорания веществ, участвующих в реакции, можно рассчитать энтальпию образования вещества.

Энтальпией сгорания органического соединения называется изменение энтальпии при реакции полного сгорания одного моля данного соеди-

нения до углекислого газа, водяных паров и других соответствующих продуктов.

Согласно следствию из закона Гесса, изменение энтальпии при реакции равно разности между суммой энтальпии сгорания исходных веществ и суммой энтальпии сгорания продуктов реакции:

$$\Delta H = \sum n \Delta H_{\text{сгор. исх}} - \sum n \Delta H_{\text{сгор. прод}}$$

## 1.5 Энтропия

Большинство процессов представляют собой два одновременно происходящих явления: передачу энергии и изменение в упорядоченности расположения частиц относительно друг друга. Молекулам, атомам, ионам присуще стремление к беспорядочному движению, поэтому система стремится перейти из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное. Количественной мерой беспорядка является энтропия  $S$ . Энтропия определяется логарифмом вероятности  $W$  состояния вещества и выражается уравнением

$$S = R \ln W.$$

Размерность энтропии совпадает с размерностью газовой постоянной. В настоящее время в соответствии с принятой единицей измерения энергии в системе СИ значение энтропии выражается в Дж/(моль·К).

Энтропию относят к одному молю вещества (молярная энтропия) в стандартных условиях. Её обозначают  $S^{\circ}_{298}$  (в данной работе обозначено  $S^{\circ}$ ).

При переходе системы из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное энтропия возрастает ( $\Delta S > 0$ ). Она растёт при кипении жидкости, плавлении твёрдого вещества, растворении кристаллов, т.е. когда наблюдается уменьшение порядка в относительном расположении частиц. И наоборот, все процессы, связанные с увеличением упорядоченности (охлаждение, конденсация, сжатие, кристаллизация), сопровождаются уменьшением энтропии ( $\Delta S < 0$ ).

Изменение энтропии вещества при фазовых переходах выражается уравнениями:

$$\Delta S_{\text{пл}} = \Delta H_{\text{пл}} / T_{\text{пл}}; \quad \Delta S_{\text{пар}} = \Delta H_{\text{пар}} / T_{\text{пар}},$$

где  $\Delta S_{\text{пл}}$ ,  $\Delta S_{\text{пар}}$  – изменение энтропии при плавлении и парообразовании;  $\Delta H_{\text{пл}}$ ,  $\Delta H_{\text{пар}}$  – изменение энтальпии при плавлении и парообразовании;  $T_{\text{пл}}$ ,  $T_{\text{пар}}$  – температура плавления и кипения.

Изменение энтропии в химических процессах определяется уравнением

$$\Delta S = \sum nS_{\text{прод}} - \sum nS_{\text{исх}},$$

т.е., изменение энтропии равно сумме энтропий продуктов реакции, минус сумма энтропий исходных веществ.

Энтропии простых веществ при стандартных условиях не равны нулю. Установлены следующие закономерности изменения стандартных энтропий.

1. Увеличение числа атомов в молекуле при данном агрегатном состоянии приводит к возрастанию энтропии:

$$S^{\circ}_{298} \text{O}_{(г)} = 160,95 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}),$$

$$S^{\circ}_{298} \text{O}_{2(г)} = 205,03 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}),$$

$$S^{\circ}_{298} \text{O}_{3(г)} = 238,8 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

2. Энтропии уменьшаются при увеличении твердости вещества:

$$S^{\circ}_{298} \text{C}_{\text{графит}} = 5,74 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}),$$

$$S^{\circ}_{298} \text{C}_{\text{алмаз}} = 2,38 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

3. При увеличении давления энтропия уменьшается, при повышении температуры возрастает.

Ниже представлены энтропии газообразного аммиака при различных температурах и давлениях:

| $T, \text{ К}$ | $P, \text{ Па}$ | $S, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ |
|----------------|-----------------|--|
| 298            | 101325          | 192,3  |
| 500            | 101325          | 212,1  |
| 500            | 30397500        | 126  |

## 1.6 Свободная энергия Гиббса

В зависимости от типа химической реакции она может сопровождаться выделением или поглощением системой тепла, совершением или использованием работы за счет изменения внутренней энергии  $\Delta U$  или энтальпии  $\Delta H$ . В любом случае только часть  $\Delta U$  или  $\Delta H$  переходит в механическую или электрическую работу, а другая часть остается в виде тепла. Часть  $\Delta H$ , способная превращаться в работу, получила название свободной энергии Гиббса  $\Delta G$ , а разность  $(\Delta H - \Delta G)$  носит название связанной энергии. Если процесс осуществляется при постоянном давлении и температуре, то изменение свободной энергии Гиббса определяется термодинамическим соотношением

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

где  $\Delta S$  – изменение энтропии процесса;  $\Delta H$  – изменение энтальпии процесса;  $T$  – абсолютная температура.

Характер изменения энергии Гиббса позволяет судить о принципиальной возможности или невозможности осуществления процесса. Химическая реакция будет самопроизвольно протекать в прямом направлении, если её свободная энергия будет понижаться:  $\Delta G < 0$ . Реакция достигнет состояния химического равновесия, если  $\Delta G = 0$ . Увеличение энергии Гиббса ( $\Delta G > 0$ ) свидетельствует о невозможности самопроизвольного осуществления процесса.

Изменение свободной энергии системы подчиняется закону Гесса, поэтому она, как и энтальпия, может быть определена по уравнению

$$\Delta G^\circ = \sum n\Delta G^\circ_{\text{прод}} - \sum n\Delta G^\circ_{\text{исх}}$$

Это уравнение позволяет вычислить изменение свободной энергии любой химической реакции, если известны свободные энергии образования участвующих веществ.

Свободная энергия образования химического соединения – это свободная энергия процесса образования одного моля химического соединения из простых веществ, находящихся в стандартном состоянии. Её обычно обозначают  $\Delta G^\circ_{298}$  и выражают в кДж/моль. Свободную энергию простых веществ в стандартных условиях, при которых они устойчивы, принимают равной нулю.

При описании свойств химических соединений часто необходимо установить их сравнительную устойчивость. Устойчивость бинарных соединений определяется свободной энергией образования соединения, отнесенной к 1 эквиваленту вещества ( $\Delta G/n$ ). Чем отрицательнее величина  $\Delta G/n$ , тем устойчивее соединение. Элемент, соединение которого имеет более высокое отрицательное значение  $\Delta G/n$ , будет вытеснять другой элемент из его соединения. Из представленных ниже оксидов видно, что устойчивость оксидов падает от оксида магния к оксиду натрия:

|                            |        |                                |                               |                   |
|----------------------------|--------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|
|                            | MgO    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O |
| $\Delta G/n$ ,<br>кДж/моль | -284,8 | -263,6                         | -197,3                        | -188,3            |

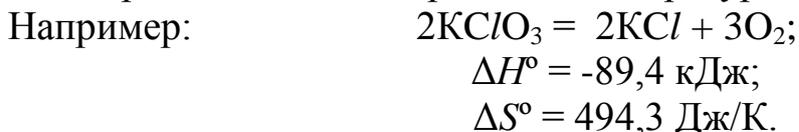
## 1.7 Энтальпийный и энтропийный факторы и направление процесса

Направление химических процессов и состояние химического равновесия определяются свободной энергией процесса. Последняя связана с энтальпией и энтропией процесса термодинамическим соотношением

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Из уравнения видно, что величина и знак свободной энергии  $\Delta G$  определяются двумя факторами: энтальпийным ( $\Delta H$ ) и энтропийным ( $T\Delta S$ ). Самопроизвольному протеканию процесса способствует уменьшение энтальпии и увеличение энтропии системы, т.е. когда  $\Delta H < 0$  и  $\Delta S > 0$ .

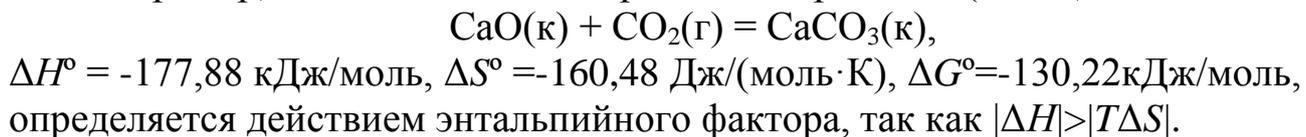
Эти процессы практически необратимы, и в этом случае  $\Delta G$  имеет отрицательное значение, т.е. реакция с выделением теплоты и увеличением степени беспорядка возможна при всех температурах.



При других сочетаниях характера изменения энтальпии и энтропии возможность процесса определяется энтальпийным или энтропийным фактором.

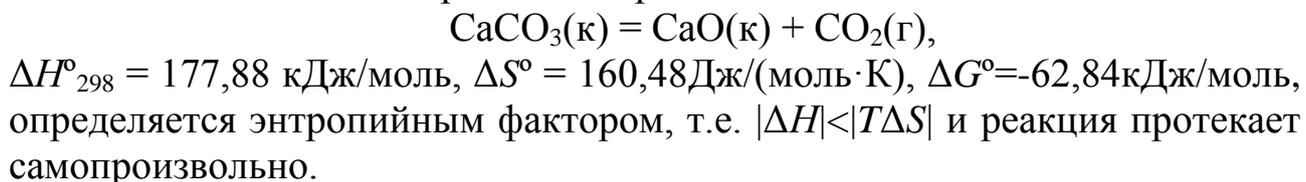
Если  $\Delta H < 0$  и  $\Delta S < 0$ , то реакция возможна ( $\Delta G < 0$ ) при условии, что  $\Delta H$  по абсолютному значению больше  $T\Delta S$ ,  $|\Delta H| > |T\Delta S|$ . При низких температурах абсолютное значение  $T\Delta S$  мало, т.е. энтропийный фактор невелик, поэтому направление процесса определяется энтальпийным фактором. При низких температурах наиболее легко должны идти экзотермические реакции, даже если при этом энтропия системы уменьшается.

Например, возможность экзотермической реакции ( $\Delta G < 0$ )



Если  $\Delta H > 0$  (эндотермическая реакция) и  $\Delta S > 0$ , то с ростом температуры энтропийный фактор  $T\Delta S$  становится все более отрицательным, что приводит к увеличению отрицательного значения  $\Delta G$ .

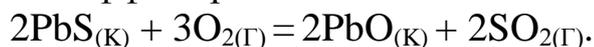
Возможность эндотермической реакции



## 2. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ИХ РЕШЕНИЕ

### *Пример 1*

Определить тепловой эффект реакции



Сколько тепла выделится при взаимодействии с кислородом 2,0г сульфида свинца?

*Решение*

Тепловой эффект данной реакции рассчитаем по теплотам образования веществ:

$$\Delta H^\circ_{298} = 2\Delta H^\circ_{\text{PbO}} + 2\Delta H^\circ_{\text{SO}_2} - \Delta H^\circ_{\text{PbS}} = -219,4 \cdot 2 - 297,2 \cdot 2 + 100,4 \cdot 2 = -832,4 \text{ кДж}.$$

Данная реакция является экзотермической, т.е. протекает с выделением тепла. Количество тепла, выделившееся при взаимодействии с кислородом 2,0 г сульфида свинца, рассчитывается следующим образом:

$$\frac{832,4 \cdot 2,0}{239 \cdot 2,0} = 3,48 \text{ кДж.}$$

### Пример 2

Определить теплоту фазового перехода  $\text{SO}_3(\text{ж}) = \text{SO}_3(\text{г})$ , если стандартные энтальпии  $\text{SO}_3(\text{ж})$  и  $\text{SO}_3(\text{г})$  соответственно равны  $-439,0$  и  $-396,1$  кДж/моль.

*Решение*

$$\begin{aligned} \Delta H^\circ_{\text{исп}} &= \Delta H^\circ \text{SO}_3(\text{г}) - \Delta H^\circ \text{SO}_3(\text{ж}); \\ \Delta H^\circ_{\text{исп}} &= (-396,1) - (-439,0) = 42,9 \text{ кДж/моль.} \end{aligned}$$

### Пример 3

Вычислить энергию химической связи H-Cl в молекуле HCl по известной энтальпии образования HCl и энергии диссоциации молекул  $\text{H}_2$  и  $\text{Cl}_2$  на атомы.  $\Delta H^\circ_{\text{обр}} \text{HCl} = -92,3$  кДж/моль;  $\Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{H}_2 = 435,95$  кДж/моль;  $\Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{Cl}_2 = 242,6$  кДж/моль.

*Решение*

Реакцию образования молекулы HCl из простых веществ



можно разбить на стадии:

- |   |  |
|---|--|
| 1) $\frac{1}{2} \text{Cl}_2(\text{г}) = \text{Cl}(\text{г}),$         | $\frac{1}{2} \Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{Cl}_2 = 121,3 \text{ кДж/моль;}$ |
| 2) $\frac{1}{2} \text{H}_2(\text{г}) = \text{H}(\text{г}),$           | $\frac{1}{2} \Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{H}_2 = 217,98 \text{ кДж/моль;}$ |
| 3) $\text{Cl}(\text{г}) + \text{H}(\text{г}) = \text{HCl}(\text{г}),$ | $\Delta H^\circ \text{H-Cl} = ?$   |

В соответствии с законом Гесса алгебраическая сумма тепловых эффектов промежуточных стадий (1,2,3) образования HCl из простых веществ равна энтальпии образования HCl.

$$\frac{1}{2} \Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{Cl}_2 + \frac{1}{2} \Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{H}_2 + \Delta H^\circ \text{H-Cl} = \Delta H^\circ_{\text{обр}} \text{HCl}.$$

$$\text{Тогда } \Delta H^\circ \text{H-Cl} = \Delta H^\circ_{\text{обр}} \text{HCl} - \frac{1}{2} \Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{Cl}_2 - \frac{1}{2} \Delta H^\circ_{\text{дисс}} \text{H}_2 ;$$

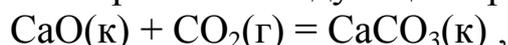
$$\Delta H^\circ \text{H-Cl} = (-92,3) - (217,98 + 121,3) = -431,58 \text{ кДж/моль.}$$

$\Delta H^\circ \text{H-Cl}$  - это энергия образования связи, по абсолютной величине она равна энергии диссоциации, но имеет отрицательный знак. Мерой прочности химической связи может служить количество энергии, затрачиваемой на её разрыв. Энергия разрыва связи (энергия диссоциации связи) всегда положительна.

$$-\Delta H^\circ \text{H-Cl} = E \text{H-Cl} = 431,58 \text{ кДж/моль.}$$

### Пример 4

Определить изменение энтропии в следующем процессе:



если  $S^\circ \text{CaCO}_3 = 92,9 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $S^\circ \text{CaO} = 39,7 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  
 $S^\circ \text{CO}_2 = 213,6 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

*Решение*

$$\Delta S^\circ = S^\circ \text{CaCO}_3 - (S^\circ \text{CaO} + S^\circ \text{CO}_2),$$
$$\Delta S^\circ = 92,9 - (39,7 + 213,6) = -160,4 \text{ Дж}/\text{К}.$$

### **Пример 5**

Не производя вычислений, определить знак изменения энтропии в реакциях:

- 1)  $\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{к}) = \text{N}_2\text{O}(\text{г}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ ,
- 2)  $2\text{H}_2(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) = 2\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$ ,
- 3)  $\text{C}_{\text{графит}} + \text{O}_2(\text{г}) = \text{CO}_2(\text{г})$ .

*Решение*

Об изменении энтропии в химической реакции можно судить по изменению объема системы в ходе реакции. В реакции (1) наблюдается увеличение объема ( $\Delta V > 0$ ), следовательно,  $\Delta S > 0$ . В реакции (2) объем системы уменьшается ( $\Delta V < 0$ ) и энтропия уменьшается:  $\Delta S < 0$ . В реакции (3) число молей газообразных веществ не изменяется, предсказать изменения энтропии нельзя. В этом случае необходимо делать расчет, используя справочные данные.

### **Пример 6**

Удельная теплота плавления свинца 23040 Дж/кг. Температура плавления свинца 327,4°C. Найти изменение энтропии при плавлении 250 г свинца.

*Решение*

При плавлении энтропия вещества возрастает на величину  $\Delta S_{\text{пл}} = \Delta H_{\text{пл}} / T_{\text{пл}}$ .

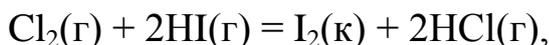
Теплота плавления 250 г свинца равна:  $23040 \cdot 0,25 = 5760 \text{ Дж}$ .

Абсолютная температура плавления равна  $327,4 + 273 = 600,4 \text{ К}$ . Изменение энтропии при плавлении 250 г свинца составляет

$$\Delta S = 5760 / 600,4 = 9,59 \text{ Дж}/\text{К}.$$

### **Пример 7**

Может ли в стандартных условиях самопроизвольно протекать реакция



если  $\Delta G^\circ_{\text{HI}} = 1,3 \text{ кДж}/\text{моль}$ ,  $\Delta G^\circ_{\text{HCl}} = -95,27 \text{ кДж}/\text{моль}$ ?

*Решение*

Изменение свободной энергии Гиббса  $\Delta G^\circ$  реакции равно

$$\Delta G^\circ = (\Delta G^\circ_{\text{I}_2} + 2\Delta G^\circ_{\text{HCl}}) - (\Delta G^\circ_{\text{Cl}_2} + 2\Delta G^\circ_{\text{HI}});$$

$$\Delta G^\circ = (-95,27 \cdot 2) - (1,3 \cdot 2) = -193,14 \text{ кДж.}$$

Отрицательный знак  $\Delta G^\circ$  указывает на возможность самопроизвольного протекания реакции.

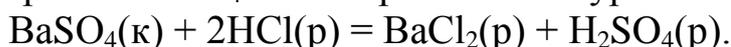
### **Пример 8**

Будет ли растворяться  $\text{BaSO}_4$  в разбавленной соляной кислоте, если величина энергии Гиббса реагирующих веществ равна (кДж/моль):

$$\Delta G^\circ_{\text{BaSO}_4(\text{к})} = -1353,1; \quad \Delta G^\circ_{\text{HCl}(\text{р})} = -131,3; \quad \Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{SO}_4(\text{р})} = -742,5; \\ \Delta G^\circ_{\text{BaCl}_2(\text{р})} = -906,2?$$

*Решение*

Реакция растворения  $\text{BaSO}_4$  в  $\text{HCl}$  протекает по уравнению



Вычислим  $\Delta G^\circ$  реакции растворения.

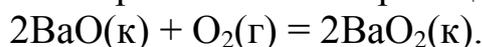
$$\Delta G^\circ = \Delta G^\circ_{\text{BaCl}_2} + \Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{SO}_4} - (\Delta G^\circ_{\text{BaSO}_4} + 2 \Delta G^\circ_{\text{HCl}});$$

$$\Delta G^\circ = -906,2 - 742,5 - (-1353,1 + 2 \cdot -131,3) = -33 \text{ кДж.}$$

Така как  $\Delta G^\circ < 0$ , то реакция возможна, т.е.  $\text{BaSO}_4$  будет растворяться в соляной кислоте.

### **Пример 9**

Определить, при какой температуре протекает процесс образования пероксида бария и его разложение по реакции



*Решение*

Изменение энтальпии и энтропии реакции образования пероксида бария имеют следующие значения:

$$\Delta H^\circ = 2\Delta H^\circ_{\text{BaO}_2} - (2\Delta H^\circ_{\text{BaO}} + \Delta H^\circ_{\text{O}_2});$$

$$\Delta H^\circ = -634,7 \cdot 2 - (-553,9 \cdot 2 + 0) = -161,6 \text{ кДж};$$

$$\Delta S^\circ = 2 S^\circ_{\text{BaO}_2} - (2S^\circ_{\text{BaO}} + S^\circ_{\text{O}_2});$$

$$\Delta S^\circ = 77,5 \cdot 2 - (70,5 \cdot 2 + 206) = -191 \text{ Дж/К} = -0,191 \text{ кДж/К.}$$

Свободная энергия этого процесса выразится уравнением

$$\Delta G^\circ = -161,6 + 0,191 T.$$

Процесс образования пероксида бария будет протекать, если  $\Delta G < 0$ . Отсюда следует:

$$-161,6 + 0,191 T < 0,$$

$$T > 161,6/0,191 > 846,07 \text{ К.}$$

Это означает, что процесс образования пероксида бария будет протекать при температуре выше 846,07 К. При температуре ниже 846,07 К будет протекать процесс разложения пероксида бария.

### 3. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

#### **Билет 1**

1. Какие из перечисленных величин не являются термодинамическими параметрами?

- а) давление; б) внутренняя энергия; в) энтальпия; г) температура; д) объем.

1) а, в    2) б    3) в, б    4) г, д    5) все параметры

2. Для некоторого химического процесса энергетический эффект равен изменению энтальпии системы. Этот процесс:

- 1) изохорный; 2) изобарный; 3) изотермический; 4) адиабатический; 5) нет верного ответа.

3. Количество энергии, выделенное или поглощённое системой в ходе реакции, проведенной при  $T = \text{const}$ , называется:

- 1) тепловым эффектом реакции; 2) внутренней энергией системы; 3) изменением энтальпии системы; 4) 1, 3; 5) 2, 3.

4. Закон Гесса: изменение энтальпии в ходе химической реакции зависит лишь от:

- 1) природы; 2) концентрации; 3) температуры; 4) агрегатного состояния; 5) 1, 4; 6) 1, 2 – исходных веществ и продуктов реакции и не зависит от пути её протекания.

5. Какая реакция является экзотермической:

а)  $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2 = 2\text{CH}_4$ ,  $\Delta H^0 = 65,9$  кДж/моль;

б)  $2\text{NH}_4\text{Cl}_{(к)} + \text{Ca}(\text{OH})_{2(к)} = \text{CaCl}_{2(к)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(ж)} + 2\text{NH}_{3(г)} - 167$  кДж?

1) а    2) б    3) а, б    4) не являются

#### **Билет 2**

1. Закон Лавуазье-Лапласа: тепловой эффект прямой реакции:

- 1) прямо пропорционален; 2) равен; 3) обратно пропорционален; 4) не равен; 5) ни один из пунктов – тепловому эффекту обратной реакции, если его взять с обратным знаком.

2. Для некоторого процесса  $\Delta H^0 < 0$ , однако он при стандартных условиях не протекает. О чём это говорит?

1)  $|\Delta H^0| > |T\Delta S|$  2)  $|\Delta H^0| < |T\Delta S^0|$  3)  $\Delta G^0 > 0$  4) ни о чём не говорит 5) 1, 3

3. Какие из приведенных понятий обозначают одно и то же?

а) энтропия; б) энергия Гиббса; в) изохорно - изотермический потенциал; г) энтальпия; д) изобарно-изотермический потенциал.

1) б, д 2) а, в 3) г, д 4) а, б 5) тождественных понятий нет

4. Какое из соединений наиболее устойчиво:

- 1) CaO,  $\Delta G^0_{обр} = -604,2$  кДж/моль;
- 2) CO<sub>2</sub>,  $\Delta G^0_{обр} = -394,38$  кДж/моль;
- 3) FeO,  $\Delta G^0_{обр} = -244,35$  кДж/моль;
- 4) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\Delta G^0_{обр} = -1576,4$  кДж/моль?

5. При экзотермических реакциях:

1) выделяется теплота; 2) увеличивается энтальпия; 3) уменьшается энтальпия; 4) 1, 3; 5) 1, 2.

### Билет 3

1. Для некоторой реакции  $\Delta S < 0$ ,  $\Delta H < 0$ . Эта реакция:

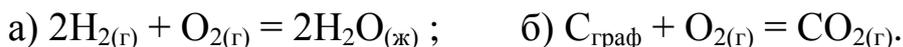
1) термодинамически невозможна; 2) возможна при низких температурах; 3) возможна при высоких температурах; 4) протекает с увеличением энтропии; 5) 2, 4.

2. Определить энергию диссоциации одного моля молекул хлора на атомы:

$$\text{Cl}_{2(g)} = 2\text{Cl}_{(g)}, \text{ если } \Delta H^0_{\text{CL}} = 121,3 \text{ кДж/моль.}$$

- 1)  $\Delta H^0_{\text{дисс}} = 0$  2)  $\Delta H^0_{\text{дисс}} = -242,6$  кДж/моль 3)  $\Delta H^0_{\text{дисс}} = 242,6$  кДж/моль  
4)  $\Delta H^0_{\text{дисс}} = 121,3$  кДж/моль 5)  $\Delta H^0_{\text{дисс}} = 60,65$  кДж/моль

3. Не производя вычислений, определить знак изменения энтропии в реакциях:



- 1) а:  $\Delta S > 0$ , б:  $\Delta S > 0$  2) а:  $\Delta S < 0$ , б:  $\Delta S < 0$  3) а:  $\Delta S < 0$ , б:  $\Delta S > 0$   
4) а:  $\Delta S > 0$ , б:  $\Delta S < 0$  5) нет верного ответа

4. Знак  $\Delta G^0$  реакции определяет:

- 1) тепловой эффект реакции; 2) направление реакции;  
3) изменение энтропии в ходе реакции; 4) 1, 2; 5) 2, 3.

5. Для некоторого процесса  $\Delta H^0 > 0$ , однако при стандартных условиях он протекает. О чём это говорит?

- 1)  $\Delta H^0 < T\Delta S^0$  2)  $\Delta H^0 > T\Delta S^0$  3)  $\Delta G < 0$  4) 1, 3 5) 2, 3

### Билет 4

1. При каких условиях может протекать реакция



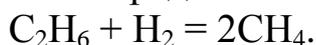
- 1) ни при каких условиях
- 2) при высоких температурах
- 3) при низких температурах
- 4) при высоком давлении
- 5) при любых условиях

2. Какие из перечисленных величин являются функциями состояния:

- а) температура;
- б) внутренняя энергия;
- в) давление;
- г) энтропия;
- д) энтальпия.

- 1) а, в
- 2) г, д
- 3) а, б, г, д
- 4) б, г, д
- 5) все являются

3. Теплота сгорания этана – 156,2 кДж/моль, метана – 891,2 кДж/моль, водорода – 286,3 кДж/моль. Определить тепловой эффект реакции

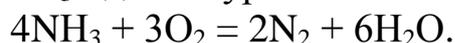


- 1) 65,9 кДж/моль
- 2) – 65,9 кДж/моль
- 3) – 957,1 кДж/моль
- 4) 957,1 кДж/моль
- 5) нет верного ответа

4. Если в ходе процесса  $\Delta H = 0$ , то:

- 1) направление процесса определяется изменением энтропии;
- 2) процесс термодинамически невозможен;
- 3) процесс возможен при высоких температурах;
- 4) 1, 3;
- 5) нет верного ответа.

5. Реакция окисления  $\text{NH}_3$  идёт по уравнению



Образование 4,48 л азота сопровождается выделением 153,3 кДж тепла. Вычислить теплоту сгорания 1 моля аммиака.

- 1) 766,5 кДж/моль
- 2) 383,25 кДж/моль
- 3) 191,625 кДж/моль
- 4) 153,3 кДж/моль
- 5) 1533 кДж/моль

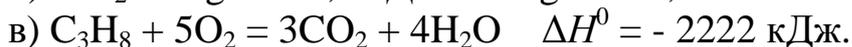
### **Билет 5**

1. Для некоторой реакции  $\Delta H > 0$ ,  $\Delta S > 0$ . О чём это говорит ?

- 1) процесс термодинамически невозможен
- 2) процесс эндотермический
- 3) процесс возможен при высоких температурах
- 4) процесс возможен при низких температурах
- 5) 2, 3
- 6) 2, 4

2. Указать экзотермическую реакцию:

- а)  $\text{P} + 1\frac{1}{2} \text{Cl}_2 = \text{PCl}_3 + 317,8 \text{ кДж};$



1) в    2) а, в    3) б, в    4) а, б, в    5) нет верного ответа

3. Принцип Бертелло–Томсена: любой самопроизвольный процесс протекает с:

- 1) уменьшением энергии Гиббса;    2) выделением тепла;  
3) увеличением энтропии;    4) повышением температуры;  
5) нет верного ответа.

4. Устойчивость бинарных соединений определяется:

1)  $\Delta G^0_{\text{обр}}$ ;    2)  $\Delta G^0_{\text{обр}}/n$ ;    3)  $\Delta H^0_{\text{обр}}/n$ ;    4)  $\Delta H^0_{\text{обр}}$ ;    5)  $\Delta S^0_{\text{обр}}/n$ .

5. Теплота образования  $\text{H}_2\text{SO}_4$  равна - 811,6 кДж/моль. Сколько кислоты образуется, если выделяется 41,87 кДж тепла ?

1) 0,0515 моль    2) 0,1032 моль    3) 5,05 г    4) 10,1 г    5) 1,3    6) 2,4

### **Билет 6**

1. Какое из соединений наименее устойчиво:

- 1)  $\text{CaO}$ ,  $\Delta G^0_{\text{обр}} = - 604,2 \text{ кДж/моль}$ ;  
2)  $\text{CO}_2$ ,  $\Delta G^0_{\text{обр}} = - 394,36 \text{ кДж/моль}$ ;  
3)  $\text{FeO}$ ,  $\Delta G^0_{\text{обр}} = - 244,35 \text{ кДж/моль}$ ;  
4)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\Delta G^0_{\text{обр}} = - 1576,4 \text{ кДж/моль}$ ?

2. При экзотермических реакциях:

- 1) реакционная смесь нагревается;    2) энтальпия уменьшается;  
3) энтальпия возрастает;    4) 1,2;    5) 1,3.

3. Дано уравнение реакции:  $a\text{A}_{\text{ж}} + b\text{B}_{\text{г}} = c\text{C}_{\text{к}}$ ,  $\Delta H^0 > 0$ .

Этот процесс:

- 1) возможен при высоких температурах;  
2) происходит с увеличением энтропии;  
3) термодинамически невозможен;  
4) возможен при низких температурах;  
5) возможен при любых условиях.

4. Теплота образования двуокиси углерода равна - 393,6 кДж/моль. Сколько литров  $\text{CO}_2$  образовалось, если выделилось 209,3 кДж тепла?

1) 11,9 л    2) 42,12 л    3) 23,8 л    4) 21,06 л    5) нет верного ответа

5. Назвать фактор, не влияющий на энтропию:

- 1) твёрдость вещества;    2) сложность частиц вещества;

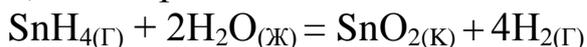
3) агрегатное состояние вещества; 4) 1, 2, 3; 5) влияют все.

#### 4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

##### Задание 1

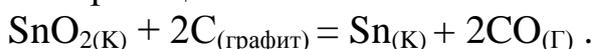
1) Образуется ли  $\text{SnH}_4$  из простых веществ, если  $\Delta G^0_{\text{SnH}_4} = 187,8 \text{ кДж/моль}$ ? Будет ли гидрид олова термодинамически устойчив к разложению?

2) По термодинамическим данным процесса

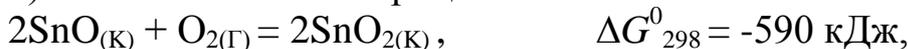


определить возможность его протекания при стандартных условиях.

3) Рассчитать температуру, выше которой возможно восстановление олова по реакции



4) По значению  $\Delta G^0$  процесса

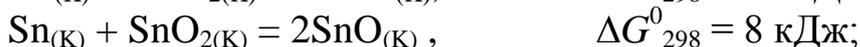
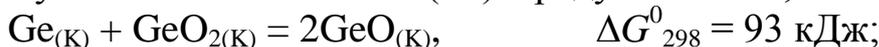


указать, какая степень окисления (+2 или +4) для олова более характерна.

5) К кислороду или хлору олово проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{298}$  образования (кДж/моль):  $-520,2$  ( $\text{SnO}_2$ );  $-458$  ( $\text{SnCl}_4$ )? Запишите реакции образования соответствующих веществ.

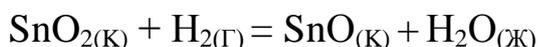
##### Задание 2

1) Увеличивается или уменьшается способность проявлять максимальную степень окисления (+4) в ряду Ge-Sn-Pb, если



2) К кислороду или сере олово проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{298}$  образования (кДж/моль):  $-258$  ( $\text{SnO}_2$ );  $-108$  ( $\text{SnS}$ ) ?

3) По термодинамическим данным определить возможность протекания реакции



при 298 и 1000 К.

4) Запишите уравнения реакций, соответствующих теплотам образования  $\text{SnO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SnCl}_4$ . Экзо- или эндотермическими являются данные процессы? С увеличением или уменьшением энтропии они протекают?

5) Какое количество тепла выделится при образовании 13,5 г  $\text{SnO}$  из простых веществ при стандартных условиях?

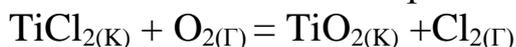
### Задание 3

1) Возможно ли самопроизвольное протекание при стандартных условиях процесса



Можно ли в качестве критерия направления протекания данного процесса использовать  $\Delta H^0_{298}$  реакции ?

2) Будет ли термодинамически возможен процесс



при 298 и 1000 К? Какой фактор, энтальпийный или энтропийный, будет определяющим в направлении протекания процесса при данных условиях?

3) К хлору или кислороду титан проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{298}$  образования (кДж/моль): -737 ( $\text{TiCl}_4$ ); -888,2 ( $\text{TiO}_2$ )?

4) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс разложения иодида титана по реакции



5) Образуется ли  $\text{TiH}_2$  из простых веществ, если  $\Delta G^0_{298}$  образования данного гидрида -105,1 кДж/моль. Как влияет повышение температуры на устойчивость данного соединения?

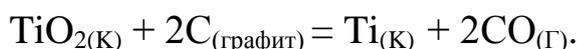
### Задание 4

1) Какая степень окисления, (+2) или (+4), более характерна для титана, если



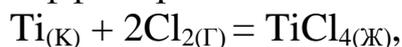
2) Исходя из значений  $\Delta G^0_{298}$  образования галогенидов титана (кДж/моль): -1559 ( $\text{TiF}_4$ ); -738 ( $\text{TiCl}_4$ ); -382 ( $\text{TiI}_4$ ), определить, какой из них более устойчив к разложению.

3) Будет ли термодинамически возможен процесс восстановления титана из его оксида



при 298 К и при 1000 К? Какой фактор определяет направление протекания процесса при данных температурах?

4) Рассчитать тепловой эффект реакции

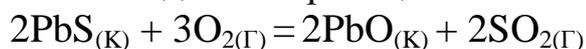


если при взаимодействии 4,8 г титана с хлором выделяется 80,5 кДж тепла.

5) Объяснить, почему энтропия  $\text{TiO}_2$  больше, чем у  $\text{TiO}$ .

### Задание 5

1) По термодинамическим данным реакции

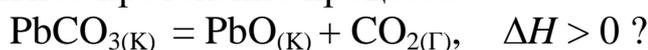


рассчитать тепловой эффект реакции; количество поглощённого или выделенного тепла в расчёте на 1 моль PbS; 1 г PbO.

2) Возможно ли самопроизвольное протекание приведённой выше реакции при 298 К и при 1000 К?

3) К кислороду или сере свинец проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{298}$  образования (кДж/моль): -186(PbO); -98(PbS)?

4) За счёт какого фактора, энтальпийного или энтропийного, возможно самопроизвольное протекание процесса



5) Какая степень окисления, (+2) или (+4), для свинца более характерна, если



### Задание 6

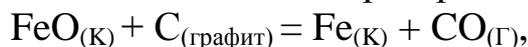
1) Возможно ли самопроизвольное протекание процесса



при 298 К и при 1800 К?

2) Какой фактор, энтальпийный или энтропийный, является определяющим в направлении приведённого выше процесса при 298 К и при 1000 К?

3) Какое количество тепла поглотится при протекании реакции



если прореагирует: 2 моля FeO; 1 г углерода?

4) Как изменяется сродство металлов к кислороду в ряду Fe-Co-Ni, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  оксидов (кДж/ моль): -244 (FeO); -215 (CoO); -211 (NiO)?

5) С увеличением или с уменьшением энтропии протекает реакция разложения пентакарбонила железа



Будет ли повышение температуры способствовать её протеканию?

### Задание 7

1) Рассчитать тепловой эффект реакции



Какое количество тепла выделится или поглотится при протекании данной реакции в расчёте на 1 моль O<sub>2</sub>; 1 л O<sub>2</sub> ?

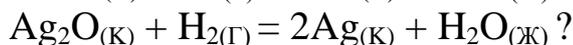
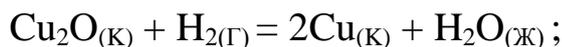
2) Образование какого оксида, CuO ( $\Delta G^0_{\text{обр}} = -129,5$  кДж/моль) или Cu<sub>2</sub>O ( $\Delta G^0_{\text{обр}} = -150,6$  кДж/моль), из простых веществ термодинамически более вероятно при стандартных условиях?

3) Будет ли самопроизвольно протекать процесс



при 298 К и при 1000 К?

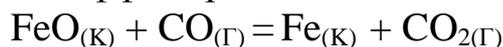
4) Какой из оксидов,  $\text{Cu}_2\text{O}$  или  $\text{Ag}_2\text{O}$ , легче восстановить водородом по реакциям



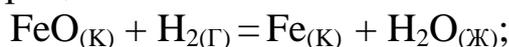
5) Какой оксид,  $\text{Cu}_2\text{O}$  или  $\text{Ag}_2\text{O}$ , более устойчив к разложению, если  $\Delta G^0_{298}$  образования (кДж/моль): -150,6 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ); -11,3 ( $\text{Ag}_2\text{O}$ )?

### Задание 8

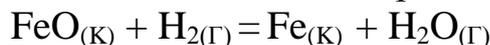
1) Вычислить тепловой эффект реакции



по тепловым эффектам процессов

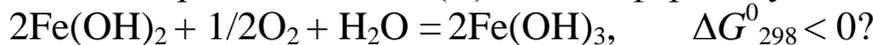


2) Будет ли термодинамически возможен процесс



при 298 К и при 1000 К?

3) Устойчив ли гидроксид железа (II) в атмосферных условиях, если



4) К кислороду или сере железо проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/ моль): -244,5 ( $\text{FeO}$ ); -100,8 ( $\text{FeS}$ )?

5) Будет ли хлорид железа (II) в атмосфере хлора переходить в хлорид железа (III), если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/ моль): -334 ( $\text{FeCl}_3$ ); -302,6 ( $\text{FeCl}_2$ )?

### Задание 9

1) Экзо- или эндотермической является реакция



Возможно ли её самопроизвольное протекание при стандартных условиях? Можно ли  $\Delta H$  процесса считать критерием направления протекания данной реакции?

2) Рассчитать температуру, выше которой возможно разложение карбоната железа



3) Хлор или кислород в большей степени проявляет окислительные свойства, если

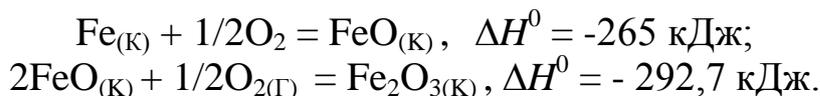


4) Какая степень окисления, (+2) или (+3), более характерна для железа, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/ моль): -244 ( $\text{FeO}$ ); -740,8 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )?

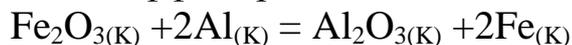
5) Рассчитать энтальпию образования  $\text{FeO}$ , если при взаимодействии 5,6 г железа с кислородом выделяется 26,5 кДж тепла.

### Задание 10

1) Рассчитать энтальпию образования  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , исходя из тепловых эффектов реакций

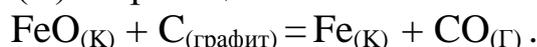


2) Определить тепловой эффект реакции

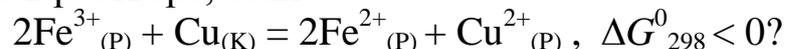


Железо или алюминий проявляет большее химическое сродство к кислороду?

3) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс восстановления оксида железа (II) по реакции



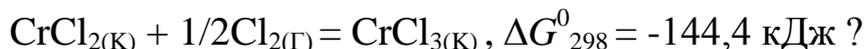
4) Железо (III) или медь (II) в большей степени проявляет окислительные свойства в растворе, если



5) С увеличением или уменьшением энтропии протекает процесс образования оксида железа (III) из простых веществ. Способствует ли повышение температуры протеканию данного процесса?

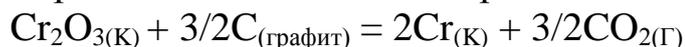
### Задание 11

1) Какая степень окисления, (+2) или (+3), более характерна для хрома, если



2) Хром или алюминий проявляет большее сродство к кислороду, если  $\Delta G^0_{298}$  образования оксидов (кДж/моль): -1059 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); -1583 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )?

3) Возможен ли процесс восстановления хрома из его оксида



при 298 К и при 1000 К?

4) Рассчитать энтальпию образования  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  из простых веществ, если при взаимодействии 1,04 г хрома с кислородом выделяется 11,41 кДж тепла.

5) Можно ли в качестве критерия направления протекания процесса



использовать тепловой эффект реакции?

### Задание 12

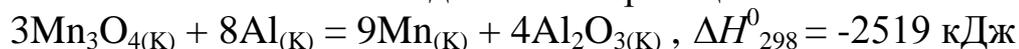
1) Возможен ли процесс восстановления марганца из его оксида



при 298 К и при 1000 К?

2) Какой фактор, энтальпийный или энтропийный, определяет направление протекания приведённого выше процесса при указанных температурах?

3) Какое количество тепла выделится по реакции



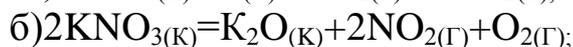
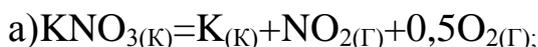
в расчёте на 1 моль Al?

4) Будет ли оксид марганца (VII) термодинамически устойчив к разложению по реакции



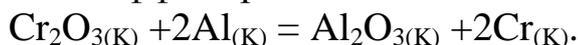
Способствует ли повышение температуры протеканию этого процесса?

5) Какая из приведённых реакций разложения  $\text{KNO}_3$  наиболее вероятна:



### Задание 13

1) Рассчитать тепловой эффект реакции



С выделением или поглощением тепла она протекает?

2) Хром или молибден проявляет большее химическое сродство к хлору, если  $\Delta G^0_{298}$  образования хлоридов (кДж/моль): -356 ( $\text{CrCl}_2$ ); -145 ( $\text{MoCl}_2$ ) ?

3) Какой из металлов, Cr или Fe, обладает большей восстановительной способностью в растворе, если  $\Delta G^0_{298}$  образования ионов в растворе соответственно равны (кДж/моль): -183 ( $\text{Cr}^{2+}$ ); -79 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ?

4) Какой из металлов, хром или молибден, характеризуется большей энергией кристаллической решётки, если энтальпии перехода металлов из твёрдого состояния в газообразное равны:

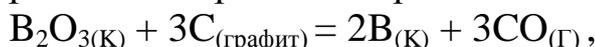


5) Рассчитать температуру, выше которой возможна реакция диспропорционирования



### Задание 14

1) Возможно ли протекание при 1000 К реакции



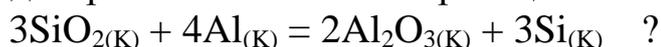
если зависимость  $\Delta G$  процесса от температуры выражается уравнением  $\Delta G^0_{(\text{Г})} = 950 - 0,494 T$  (кДж) ?

2) Алюминий или бор проявляет большее химическое сродство к кислороду, если  $\Delta G^0$  образования оксидов (кДж/моль): -1583 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); -1194 ( $\text{B}_2\text{O}_3$ )? Записать реакции образования соответствующих оксидов из простых веществ.

3) Алюминий или бор имеет более прочную кристаллическую решётку, если  $\Delta H$  сублимации данных металлов соответственно равны (кДж/моль): 326 (Al); 544 (B)?

4) Рассчитать энтальпию образования  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , если при взаимодействии 0,54 г алюминия с кислородом выделяется 16,76 кДж тепла.

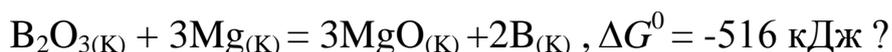
5) Экзо- или эндотермической является реакция



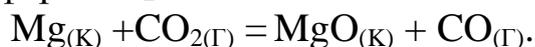
Можно ли в качестве критерия направления её протекания использовать тепловой эффект  $\Delta H^0$ ?

### Задание 15

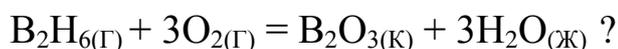
1) Бор или магний проявляет большее химическое сродство к кислороду, если



2) На основании термодинамических расчётов сделать вывод об устойчивости магния в атмосфере  $\text{CO}_2$ :



3) Какое количество тепла выделится при сгорании 4,48 л диборана  $\text{B}_2\text{H}_6$  по реакции



4) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс разложения карбоната магния по реакции



5) К какому галогену, фтору, хлору или бром, магний проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{298}$  образования галогенидов (кДж/моль): -1113 ( $\text{MgF}_2$ ); -641 ( $\text{MgCl}_2$ ); -517 ( $\text{MgBr}_2$ )? Объяснить закономерность изменения химического сродства в ряду галогенов.

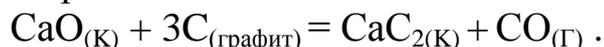
### Задание 16

1) Будет ли карбид магния устойчив в воде, если



2) Какой элемент, Be, Mg или Ca, проявляет большее химическое сродство к кислороду, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  оксидов (кДж/моль): -582 ( $\text{BeO}$ ); -569 ( $\text{MgO}$ ); -603 ( $\text{CaO}$ )?

3) Рассчитать температуру, выше которой возможно восстановление кальция из его оксида по реакции



4) Какое количество тепла потребуется для разложения 5,0 г карбоната кальция по реакции



5) С увеличением или уменьшением энтропии протекает процесс разложения карбоната кальция? Будет ли повышение температуры способствовать протеканию данного процесса?

### Задание 17

1) Серебро или золото характеризуется большей энергией кристаллической решётки, если энтальпии перехода металлов в газообразное состояние соответственно равны:



2) Возможна ли реакция диспропорционирования

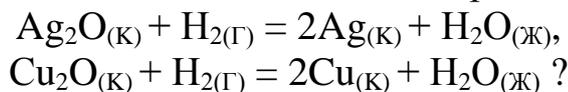


при стандартной и более высокой температурах?

3) Рассчитать температуру, выше которой возможно разложение оксида серебра (I):



4) Какой из оксидов легче восстановить водородом:



5) Какой из металлов труднее окисляется в растворе, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  ионов в растворе (кДж/моль): 77,2 ( $\text{Ag}^+$ ); 50 ( $\text{Cu}^+$ )?

### Задание 18

1) Рассчитать тепловой эффект реакции



С выделением или поглощением тепла она протекает?

2) Рассчитать  $\Delta G^0$  приведённой выше реакции при 298 и 1500 К. При какой из указанных температур процесс протекает самопроизвольно? За счёт какого фактора, энтальпийного или энтропийного, возможно самопроизвольное протекание данного процесса?

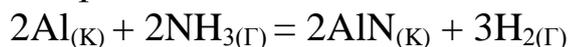
3) Рассчитать энтальпию образования  $\text{CO}_2$ , если известно, что при полном сгорании 1 г углерода выделяется 32,8 кДж тепла.

4) К какому элементу, кислороду, хлору или сере, углерод проявляет большее химическое сродство, если  $\Delta G^0_{298}$  образования (кДж/моль): -394,6 ( $\text{CO}_2$ ); -60,6 ( $\text{CCl}_4$ ); 64,5 ( $\text{CS}_2$ )?

5) Будет ли термодинамически устойчивой смесь  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ ?

### Задание 19

1) Будет ли протекать реакция



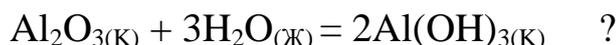
при стандартных условиях и при 1000 К? Какой фактор определяет направление протекания процесса при указанных температурах?

2) По термодинамическим данным процессов

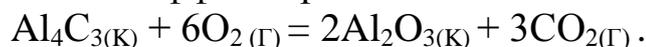


установить, какой гидроксид более устойчив к разложению.

3) Возможно ли взаимодействие оксида алюминия с водой по реакции



4) Рассчитать тепловой эффект процесса

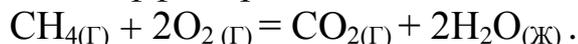


Какое количество тепла выделится по реакции при образовании 1 л  $\text{CO}_2$ ?

5) По термодинамическим данным определите, какой элемент, алюминий, галлий или таллий, проявляет большее химическое сродство к кислороду.

### Задание 20

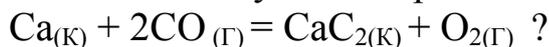
1) Рассчитать тепловой эффект реакции



Какое количество тепла выделится при сгорании 1 л метана?

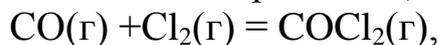
2) Не производя расчётов, по уравнениям реакций сгорания метана и этана сделать вывод, в каком случае тепловой эффект будет выше.

3) Можно ли карбид кальция получить по реакции



Проанализируйте возможность получения карбида кальция при взаимодействии кальция с  $\text{CO}_2$ .

4) Рассчитайте энергию Гиббса и определите, возможна ли реакция



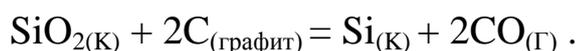
если при  $T = 700 \text{ К}$  константа равновесия реакции равна  $K = 1 \cdot 10^{-4}$ .

5) Объясните, почему энтропия  $\text{CO}$  меньше, чем энтропия  $\text{CO}_2$ .

### Задание 21

1) Кремний или углерод проявляет большее химическое сродство к водороду, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  гидридов (кДж/моль): -50,8 ( $\text{CH}_4$ ); 53,2 ( $\text{SiH}_4$ )? Какой из гидридов может быть получен из простых веществ? Какой из них более устойчив к разложению?

2) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс



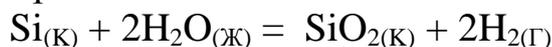
За счёт какого фактора, энтальпийного или энтропийного, возможно самопроизвольное протекание реакции?

3) Можно ли в качестве критерия направления протекания реакции



использовать её тепловой эффект?

4) Рассчитать  $\Delta G^0$  процесса



при 2000 К. Возможно ли его протекание при данной температуре?

5) По значению  $\Delta G^0_{298}$  реакции



определить, к какому элементу, углероду или хлору, кремний проявляет большее химическое сродство.

### Задание 22

1) По термодинамическим данным определить, можно ли при стандартных условиях осуществить процесс по схеме



Записать уравнение реакции.

2) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс разложения  $\text{CO}_2$ :



Какой фактор, энтальпийный или энтропийный, определяет направление его протекания при высоких температурах?

3) Рассчитать тепловой эффект горения  $\text{CS}_2$  в атмосфере кислорода. Какое количество тепла выделится при сгорании 5,6 г  $\text{CS}_2$  ?

4) Кремний или углерод проявляет большее химическое сродство к кислороду, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/моль): -857 ( $\text{SiO}_2$ ); -394 ( $\text{CO}_2$ )?

5) Будет ли повышение температуры способствовать протеканию реакции



### Задание 23

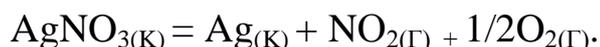
1) Рассчитать тепловой эффект реакции



Какое количество тепла выделится, если прореагирует 2 л  $\text{N}_2\text{O}_5$ ?

2) Возможно ли самопроизвольное протекание приведённой выше реакции при стандартных условиях? Какой фактор является определяющим в направлении протекания процесса при 298 К?

3) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс разложения

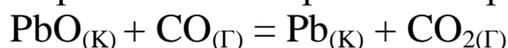


4) Будет ли оксид азота (II) термодинамически устойчив в атмосфере кислорода, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/моль): 80,6 (NO); 51,5 (NO<sub>2</sub>)?

5) Будет ли происходить димеризация NO<sub>2</sub>, если  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/моль): 51,5 (NO<sub>2</sub>); 98 (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)?

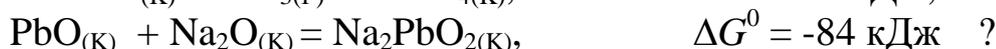
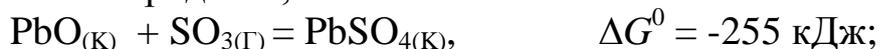
### Задание 24

1) Возможно ли самопроизвольное протекание реакции



при 298 и 1000 К?

2) К какому из оксидов, SO<sub>3</sub> или Na<sub>2</sub>O, оксид свинца (II) проявляет большее химическое сродство, если



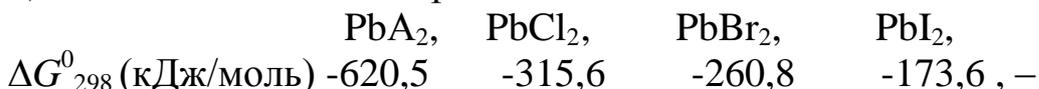
Какими свойствами, основными или амфотерными, обладает PbO?

3) Можно ли в качестве критерия направления протекания процесса



использовать тепловой эффект реакции? Привести объяснение.

4) По значениям  $\Delta G^0$  образования галогенидов:

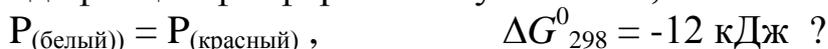


укажите, к какому галогену свинец проявляет большее химическое сродство? Запишите реакции образования галогенидов.

5) Увеличивается или уменьшается энтропия при разложении карбоната свинца?

### Задание 25

1) Какая модификация фосфора более устойчива, если



2) Какое количество тепла выделится при сгорании 1 г фосфора по реакции



3) Рассчитать тепловой эффект реакции



С выделением или поглощением тепла она протекает?

4) Возможно ли разложение нитрата аммония при 500 К по реакции



Способствует ли повышение температуры протеканию процесса? Рассчитать температуру, при которой данная система находится в термодинамическом равновесии.

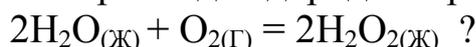
5) Фосфор или азот проявляет большее химическое сродство к кислороду, если  $\Delta G^0_{298}$  образования оксидов (кДж/моль): -1943 ( $P_2O_5$ ); 114,2 ( $N_2O_5$ )? Возможно ли их образование из простых веществ?

### Задание 26

1) Какой из гидридов термодинамически более устойчив к разложению, если:

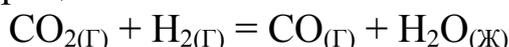
|                               | $NH_3$ | $PH_3$ | $AsH_3$ | $SbH_3$ |
|-------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| $\Delta G^0_{обр}$ (кДж/моль) | -16,7  | 13,4   | 68,9    | 135,3 ? |

2) Можно ли получить пероксид водорода по реакции



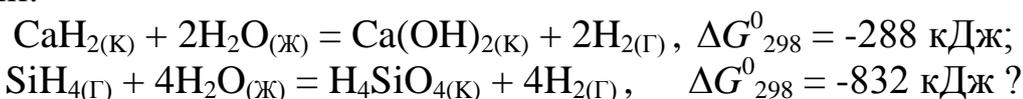
3) Какое количество тепла выделится при взрыве 3,36 л гремучей смеси (2 объёма водорода и 1 объём кислорода)?

4) Рассчитать  $\Delta G^0$  процесса



при 1000 К. Будет ли протекать данный процесс при этой температуре? Какой фактор определяет направление протекания процесса?

5) Гидрид кальция или кремния более энергично взаимодействует с водой, если:



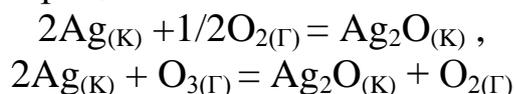
### Задание 27

1) По значению теплового эффекта реакции



и учитывая изменение энтропии процесса, определить, будет ли озон термодинамически устойчивым веществом.

2) По значению  $\Delta G^0$  процессов



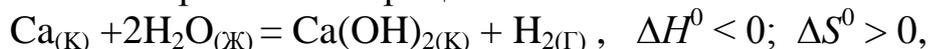
определить, кислород или озон является более сильным окислителем.

3) Рассчитать температуру, выше которой возможен процесс



Какой фактор будет определять направление протекания данной реакции при высоких температурах?

4) Возможно ли протекание процесса



при каких-либо условиях в противоположном направлении?

5) Кислород, сера или селен проявляет большее химическое сродство к водороду, если  $\Delta G^0$  образования (кДж/моль): -237 ( $H_2O$ ); -33,0 ( $H_2S$ ); 71,1 ( $H_2Se$ )?

### Задание 28

- 1) Будет ли проходить процесс разложения перекиси водорода



при стандартных условиях?

- 2) Рассчитать температуру, выше которой возможно разложение воды по реакции



Какой фактор определяет направление её протекания при высоких температурах?

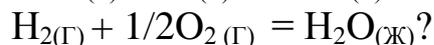
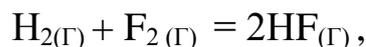
- 3) Какое количество тепла выделится при взаимодействии 5,6 г оксида кальция с водой?

- 4) Как изменяется сродство к кислороду в ряду Be-Mg-Ca ? Ответ дать на основании термодинамических данных.

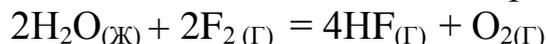
- 5) За счёт какого фактора возможно самопроизвольное протекание эндотермического процесса?

### Задание 29

- 1) Какая из приведённых ниже реакций сопровождается большим тепловым эффектом:



- 2) Будет ли фтор взаимодействовать с водой по реакции



при стандартных условиях? Фтор или кислород более сильный окислитель?

- 3) По значениям  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  фторидов (кДж/моль): -584 (LiF); -941 (BeF<sub>2</sub>); -1120 (BF<sub>3</sub>); -127 (NF<sub>3</sub>) - укажите, как изменяется сродство к фтору в ряду элементов II периода (ответ дать на основании сравнения значений  $\Delta G^0_{\text{обр}}$ , выраженных в кДж/экв).

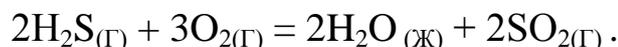
- 4) По значениям  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  галидов (кДж/моль): -1120 (BF<sub>3</sub>); -387 (BCl<sub>3</sub>); -237,5 (BBr<sub>3</sub>) - укажите, какой из них более устойчив к разложению.

- 5) Рассчитать температуру, выше которой возможно разложение бромида бора (метод получения чистого бора)



### Задание 30

- 1) Рассчитать, какое количество тепла выделится при сгорании 1 л H<sub>2</sub>S на воздухе при реакции



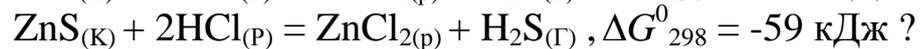
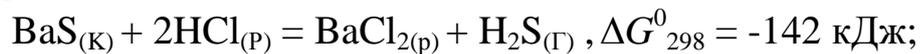
- 2) Будет ли H<sub>2</sub>S растворяться в воде, если  $\Delta G^0_{\text{обр}} \text{H}_2\text{S}_{(\text{г})} = -33 \text{ кДж/моль}$ , а  $\Delta G^0_{\text{обр}} \text{H}_2\text{S}_{(\text{раствор})} = -27,9 \text{ кДж/моль}$ ?

3) Определить температуру, выше которой возможно разложение оксида серы (VI)  $2\text{SO}_{3(\text{Г})} = 2\text{SO}_2 + \text{O}_2$ .

За счёт какого фактора, энтальпийного или энтропийного, возможно самопроизвольное протекание данного процесса?

4) Кислород или сера является более сильным окислителем? Ответ дайте на основании значений  $\Delta G^0_{\text{обр}}$  (кДж/моль): -201 (ZnS); -321 (ZnO).

5) Какой из сульфидов, BaS или ZnS, лучше растворяется в соляной кислоте, если



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Термодинамические константы некоторых веществ

| Вещество  | $\Delta H^0_{298}$ ,<br>кДж/моль | $\Delta G^0_{298}$ ,<br>кДж/моль | $S^0_{298}$ ,<br>Дж/моль·К |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Ag <sub>(Г)</sub>                               | 284,9                            | 246,1                            | 172,8                      |
| Ag <sub>(К)</sub>                               | 0                                | 0                                | 42,6                       |
| AgNO <sub>3(К)</sub>                            | -124,6                           | -33,6                            | 141,0                      |
| Ag <sub>2</sub> O <sub>(К)</sub>                | -31,2                            | -11,3                            | 121,0                      |
| Al <sub>(Г)</sub>                               | 326,3                            | 288,7                            | 164,4                      |
| Al <sub>(К)</sub>                               | 0                                | 0                                | 28,4                       |
| Al <sub>4</sub> C <sub>3(К)</sub>               | -209                             | -196                             | 88,9                       |
| AlN <sub>(К)</sub>                              | -318                             | -287,4                           | 20,2                       |
| Al(OH) <sub>3(К)</sub>                          | -1315                            | -1157                            | 70,1                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3(К)</sub>               | -1676,8                          | -1583,3                          | 50,9                       |
| B <sub>(Г)</sub>                                | 544                              | 517,6                            | 163,3                      |
| B <sub>(К)</sub>                                | 0                                | 0                                | 5,8                        |
| BBr <sub>3(К)</sub>                             | -                                | -237,5                           | 228,5                      |
| B <sub>2</sub> H <sub>6(Г)</sub>                | 38,5                             | 89,6                             | 232                        |
| B <sub>2</sub> O <sub>3(К)</sub>                | -1273,8                          | -1193,7                          | 54                         |
| Be <sub>(К)</sub>                               | 0                                | 0                                | 9,5                        |
| BeO <sub>(К)</sub>                              | -598                             | -582                             | 14,1                       |
| Br <sub>2(Ж)</sub>                              | 0                                | 0                                | 152,2                      |
| C <sub>(алмаз)</sub>                            | 1,828                            | 2,834                            | 2,37                       |
| C <sub>(графит)</sub>                           | 0                                | 0                                | 5,7                        |
| CBr <sub>4(Г)</sub>                             | 79,5                             | 66,9                             | 230,1                      |
| CCl <sub>4(Г)</sub>                             | -102,9                           | -60,63                           | 309,7                      |
| CCl <sub>4(Ж)</sub>                             | -135,4                           | -64,7                            | 214,6                      |
| CF <sub>4(Г)</sub>                              | -933,7                           | -888,97                          | 216,6                      |
| CH <sub>4(Г)</sub>                              | -74,86                           | -50,85                           | 186,4                      |
| CO <sub>(Г)</sub>                               | -110,6                           | -137,2                           | 197,7                      |
| CO <sub>2(Г)</sub>                              | -393,8                           | -394,6                           | 213,8                      |
| CS <sub>2(Ж)</sub>                              | 88,8                             | 64,5                             | 151,1                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH <sub>(Ж)</sub> | -276,9                           | -174,3                           | 161,1                      |
| Ca <sub>(К)</sub>                               | 0                                | 0                                | 41,45                      |
| CaC <sub>2(К)</sub>                             | -59,9                            | -64,9                            | 70,0                       |
| CaO <sub>(К)</sub>                              | -635                             | -603,6                           | 39,7                       |
| Ca(OH) <sub>2(К)</sub>                          | -986,8                           | -899,2                           | 83,4                       |
| Cl <sub>2(Г)</sub>                              | 0                                | 0                                | 222,9                      |
| HCl <sub>(Г)</sub>                              | -92,4                            | -94,5                            | 186,9                      |
| HCl <sub>(Р)</sub>                              | -166,9                           | -131,2                           | 56,5                       |
| CoO <sub>(К)</sub>                              | -239,7                           | -215,2                           | 52,8                       |
| Cr <sub>(Г)</sub>                               | 397,5                            | 352,6                            | 174,2                      |
| Cr <sub>(К)</sub>                               | 0                                | 0                                | 23,6                       |
| Cr <sup>2+</sup> <sub>(Р)</sub>                 | -139                             | -183,4                           | 41,9                       |

| Вещество                         | $\Delta H^0_{298}$ ,<br>кДж/МОЛЬ | $\Delta G^0_{298}$ ,<br>кДж/МОЛЬ | $S^0_{298}$ ,<br>Дж/МОЛЬ·К |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $\text{Cr}^{3+}_{(P)}$           | -236,1                           | -223,2                           | -215,6                     |
| $\text{CrCl}_{2(K)}$             | -395,7                           | -356,6                           | 115,7                      |
| $\text{CrCl}_{3(K)}$             | -570,3                           | -501,0                           | 124,8                      |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3(K)$       | -1141,3                          | -1059,7                          | 81,2                       |
| $\text{CrO}_{2(K)}$              | -590                             | -540                             | 48,1                       |
| $\text{Cu}_{(K)}$                | 0                                | 0                                | 33,2                       |
| $\text{CuCl}_{(K)}$              | -137,3                           | -120,1                           | 87,0                       |
| $\text{CuCl}_{2(K)}$             | -216,7                           | -171,5                           | 108,2                      |
| $\text{CuO}_{(K)}$               | -162,1                           | -129,5                           | 42,7                       |
| $\text{CuS}_{(K)}$               | -53,2                            | -53,6                            | 66,5                       |
| $\text{Cu}_2\text{S}_{(K)}$      | -79,5                            | -86,3                            | 121                        |
| $\text{CuSO}_4(K)$               | -771,4                           | -662                             | 109,3                      |
| $\text{Cu}_2\text{O}_{(K)}$      | -173,3                           | -150,6                           | 93                         |
| $\text{F}_{2(\Gamma)}$           | 0                                | 0                                | 202,9                      |
| $\text{HF}_{(\Gamma)}$           | -270,9                           | -273                             | 173,8                      |
| $\text{Fe}_{(K)}$                | 0                                | 0                                | 27,2                       |
| $\text{Fe}^{2+}_{(P)}$           | -87,2                            | -78,9                            | -110,9                     |
| $\text{Fe}^{3+}_{(P)}$           | -46,4                            | -4,5                             | -309,2                     |
| $\text{FeCO}_3(K)$               | -738,6                           | -665,5                           | 95,5                       |
| $\text{Fe}(\text{CO})_5(\Gamma)$ | -764,0                           | -695,2                           | 338                        |
| $\text{FeCl}_{2(K)}$             | -342                             | -302,6                           | 118                        |
| $\text{FeCl}_{3(K)}$             | -399,7                           | -334,2                           | 142,4                      |
| $\text{FeO}_{(K)}$               | -265,0                           | -244,5                           | 60,8                       |
| $\text{Fe}(\text{OH})_{2(K)}$    | -562,1                           | -480,1                           | 88                         |
| $\text{Fe}(\text{OH})_{3(K)}$    | -827,2                           | -700,1                           | 105                        |
| $\text{FeS}_{(K)}$               | -100,5                           | -100,8                           | 60,3                       |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3(K)$       | -822,7                           | -740,8                           | 87,5                       |
| $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(K)$  | -2582,0                          | -2254,6                          | 283                        |
| $\text{Fe}_3\text{C}_{(K)}$      | 25                               | 18,8                             | 108                        |
| $\text{Ga}(\text{OH})_3(K)$      | -1014,6                          | -831,8                           | 84,9                       |
| $\text{Ga}_2\text{O}_3(K)$       | -1089                            | -998,2                           |                            |
| $\text{Ge}_{(K)}$                | 0                                | 0                                | 31,1                       |
| $\text{GeO}_{(K)}$               | -255                             | -226,8                           | 50,2                       |
| $\text{GeO}_2(K)$                | -554,7                           | -500,8                           | 55,3                       |
| $\text{H}_{2(\Gamma)}$           | 0                                | 0                                | 130,7                      |
| $\text{Hg}_{(Ж)}$                | 0                                | 0                                | 75,9                       |
| $\text{HgO}_{(K)}$               | -90,9                            | -58,6                            | 70,3                       |
| $\text{Mg}_{(K)}$                | 0                                | 0                                | 32,7                       |
| $\text{MgBr}_2(K)$               | -517,6                           | -472                             | 125,6                      |
| $\text{MgCO}_3(K)$               | -1113                            | -1029,3                          | 65,7                       |
| $\text{MgCl}_2(K)$               | -641,1                           | -591,6                           | 89,8                       |
| $\text{MgF}_2(K)$                | -1113                            | -1071                            | 57,2                       |
| $\text{MgO}_{(K)}$               | -601,8                           | -569,6                           | 26,9                       |
| $\text{Mg}_2\text{C}_3(K)$       | -79,5                            | -83                              | 92,1                       |

| Вещество                            | $\Delta H^0_{298}$ ,<br>кДж/моль | $\Delta G^0_{298}$ ,<br>кДж/моль | $S^0_{298}$ ,<br>Дж/моль·К |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Mn <sub>(К)</sub>                   | 0                                | 0                                | 32,0                       |
| MnCO <sub>3(К)</sub>                | -881,7                           | -811,4                           | 105,9                      |
| MnO <sub>(К)</sub>                  | -385,1                           | -363,3                           | 61,5                       |
| Mn <sub>3</sub> O <sub>4(К)</sub>   | -1387,5                          | -1282                            | 148,6                      |
| MnO <sub>2(К)</sub>                 | -521,5                           | -466,7                           | 53,1                       |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>7(К)</sub>   | -726,3                           | -543,9                           | -                          |
| Mo <sub>(К)</sub>                   | 0                                | 0                                | 28,6                       |
| Mo <sub>(Г)</sub>                   | 661,1                            | 612,5                            | 181,8                      |
| MoO <sub>2(К)</sub>                 | -586,1                           | -533,2                           | 46,3                       |
| MoO <sub>3(К)</sub>                 | -745,2                           | -668,1                           | 77,7                       |
| NH <sub>3(Г)</sub>                  | -46,2                            | -16,7                            | 192,6                      |
| NH <sub>4</sub> Cl <sub>(К)</sub>   | -314,4                           | -204,3                           | 95,9                       |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3(К)</sub>  | -365,4                           | -183,9                           | 151,1                      |
| NO <sub>(Г)</sub>                   | 90,3                             | 80,6                             | 210,7                      |
| NO <sub>2(Г)</sub>                  | 33                               | 51,5                             | 240,2                      |
| N <sub>2</sub> O <sub>(Г)</sub>     | 82,1                             | 104,2                            | 220,0                      |
| N <sub>2</sub> O <sub>4(ж)</sub>    | 19,0                             | 98,0                             | 209,3                      |
| N <sub>2</sub> O <sub>5(К)</sub>    | 42,7                             | 114,2                            | 178,4                      |
| Na <sub>(К)</sub>                   | 0                                | 0                                | 51,5                       |
| Na <sub>2</sub> O <sub>(К)</sub>    | -510,8                           | -376,1                           | 72,4                       |
| Na <sub>2</sub> PbO <sub>2(К)</sub> | -704,3                           | -742                             | 125                        |
| HNO <sub>3(ж)</sub>                 | -174,3                           | -80,9                            | 155,7                      |
| NiO <sub>(К)</sub>                  | -239,7                           | -211,6                           | 37,9                       |
| O <sub>2(Г)</sub>                   | 0                                | 0                                | 205,0                      |
| O <sub>3(Г)</sub>                   | -142,3                           | -162,7                           | 238,8                      |
| H <sub>2</sub> O <sub>(Г)</sub>     | -241,98                          | -228,8                           | 188,9                      |
| H <sub>2</sub> O <sub>(ж)</sub>     | -286,0                           | -237,4                           | 70,0                       |
| H <sub>2</sub> O <sub>2(ж)</sub>    | -187,9                           | -120,5                           | 109,6                      |
| P <sub>(К, бел)</sub>               | 0                                | 0                                | 41,1                       |
| P <sub>(К, красн)</sub>             | -17,6                            | -12,1                            | 22,8                       |
| PH <sub>3(Г)</sub>                  | 5,4                              | 13,4                             | 210,1                      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5(Г)</sub>    | -2093                            | -1943                            | 157                        |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4(Р)</sub>   | -1288,3                          | -1142,6                          | -158,1                     |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4(К)</sub>   | -1288,3                          | -1142,6                          | 158,1                      |
| Pb <sub>(К)</sub>                   | 0                                | 0                                | 64,8                       |
| PbCO <sub>3(К)</sub>                | -700,0                           | -626,3                           | 131,0                      |
| PbO <sub>(К)</sub>                  | -219,4                           | -186,2                           | 66,2                       |
| PbO <sub>2(К)</sub>                 | -276,5                           | -218,5                           | 72                         |
| PbS <sub>(К)</sub>                  | -100,4                           | -98,8                            | 91,2                       |
| PbSO <sub>4(К)</sub>                | -912                             | -814,3                           | 148,7                      |
| S <sub>(К, монокл)</sub>            | 0,38                             | 0,188                            | 32,6                       |
| S <sub>(К, ромб)</sub>              | 0                                | 0                                | 31,9                       |
| SO <sub>2(Г)</sub>                  | -297,2                           | -300,4                           | 248,2                      |
| SO <sub>3(Г)</sub>                  | -376,2                           | -370                             | 256,4                      |

| Вещество                 | $\Delta H^0_{298}$ ,<br>кДж/моль | $\Delta G^0_{298}$ ,<br>кДж/моль | $S^0_{298}$ ,<br>Дж/моль·К |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $H_2S_{(Г)}$             | -20,9                            | -33                              | 193,2                      |
| $H_2Se_{(Г)}$            | 85,7                             | 71,1                             | 221,0                      |
| $Si_{(К)}$               | 0                                | 0                                | 18,8                       |
| $SiC_{(К)}$              | -73,3                            | -70,9                            | 16,6                       |
| $SiCl_{4(Г)}$            | -664,8                           | -598,3                           | 252,6                      |
| $SiO_{(К)}$              | -437,9                           | -407,9                           | 27,2                       |
| $SiO_{2(К)}$             | -911,6                           | -857,2                           | 41,9                       |
| $Sn_{(К, \text{белое})}$ | 0                                | 0                                | 51,6                       |
| $Sn_{(К, \text{серое})}$ | -2,1                             | -0,13                            | 44,2                       |
| $SnCl_{4(Ж)}$            | -529,2                           | -458,1                           | 259                        |
| $SnH_{4(Г)}$             | 16,3                             | 187,8                            | 228,7                      |
| $SnO_{(К)}$              | -286,2                           | -258,1                           | 56                         |
| $SnO_{2(К)}$             | -581,2                           | -520,2                           | 52                         |
| $SnS_{(К)}$              | -110,2                           | -108,3                           | 77,0                       |
| $Ti_{(К)}$               | 0                                | 0                                | 30,6                       |
| $TiCl_{2(К)}$            | -516,7                           | -472,7                           | 106,9                      |
| $TiCl_{4(Г)}$            | -763,2                           | -726,1                           | 352,2                      |
| $TiCl_{4(Ж)}$            | -804,6                           | -737,7                           | 252,3                      |
| $TiF_{4(К)}$             | -1649,3                          | -1559,2                          | 133,9                      |
| $TiH_{2(К)}$             | -144,3                           | -105,1                           | 29,7                       |
| $TiI_{4(Г)}$             | -284,5                           | -381,9                           | 433                        |
| $TiO_{(К)}$              | -518,4                           | -489,1                           | 34,9                       |
| $TiO_{2(К)}$             | -943,5                           | -888,2                           | 50,2                       |
| $Ti(OH)_{3(К)}$          | -516,6                           | -432                             | 102,1                      |
| $Ti_2O_3(К)$             | -390,4                           | -321,4                           | 148,1                      |