



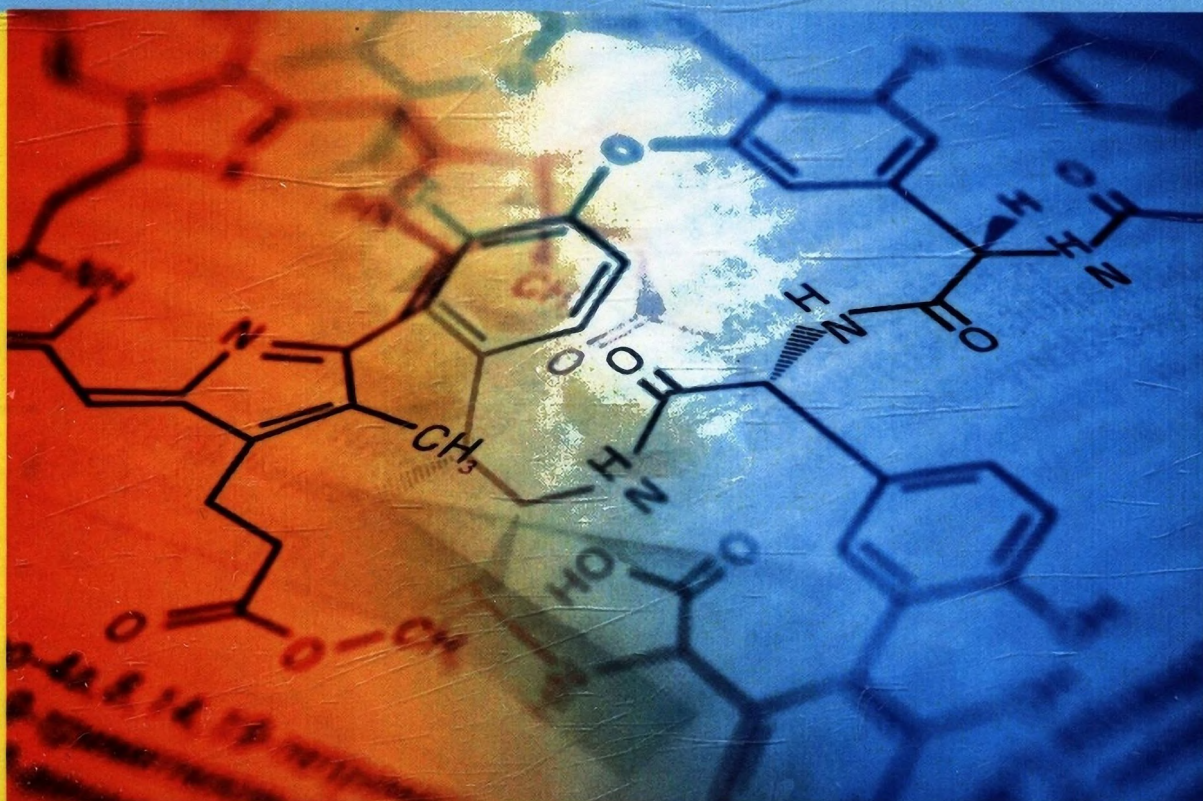
Кемеровский  
государственный  
университет  
Объединяем  
знания и людей

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

КЕМЕРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

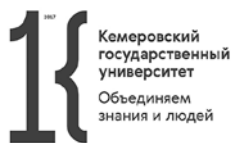
# ХИМИЯ

## Практикум



Кемерово 2021





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«КЕМЕРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ХИМИЯ**

Практикум

Кемерово 2021

УДК 54(076)  
ББК 24я73  
Х 46

*Печатается по решению Научно-методического совета КемГУ*

*Рецензенты:*

кафедра «Химия, технология неорганических веществ и nano-материалов» Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»;  
кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» **Ю. В. Соловьева**

**Коллектив составителей:**

И. В. Проскунов, Л. А. Сенчунова, О. В. Салищева, Т. В. Шевченко,  
М. А. Захаренко

Х 46 Химия: практикум / составители И. В. Проскунов, Л. А. Сенчунова, О. В. Салищева [и др.]; Кемеровский государственный университет. – Кемерово, 2021. – 215 с.

ISBN 978-5-8353-2821-5

Практикум разработан по дисциплине «Химия». В практикуме представлены краткие теоретические положения, примеры решения задач по классам неорганических соединений, по основным понятиям и законам химии, по строению атома, периодическому закону, химической связи, основам химической термодинамики, скорости химических реакций, химическому равновесию и т. д. А также включает варианты индивидуальных контрольных заданий.

Практикум предназначен для обучающихся по направлениям подготовки 19.03.01 Биотехнология, 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья, 19.03.03 Продукты питания животного происхождения, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, 20.03.01 Техносферная безопасность, 27.03.02 Управление качеством, 29.03.03 Технология полиграфического и упаковочного производства, специальности 20.05.01 Пожарная безопасность.

УДК 54(076)

ББК 24я73

ISBN 978-5-8353-2821-5

©Коллектив составителей, 2021

© Кемеровский государственный университет, 2021



## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий практикум призван развивать навыки самостоятельной работы обучающихся и содержит краткие теоретические положения, примеры решения задач, варианты индивидуальных заданий для проведения текущего контроля знаний студентов всех форм обучения по основным разделам изучаемой дисциплины «Химия»:

1. Классы неорганических соединений. 2. Основные понятия и законы химии. 3. Строение атома. Периодический закон. Химическая связь. 4. Основы химической термодинамики. 5. Скорость химических реакций. Химическое равновесие. 6. Количественный состав растворов. 7. Свойства растворов неэлектролитов. 8. Свойства растворов электролитов, 9. Произведение растворимости. 10. Ионное произведение воды. Водородный показатель (рН). 11. Гидролиз солей, 12. Коллоидно-дисперсные системы. 13. Фазовые равновесия. 14. Комплексные соединения. 15. Окислительно-восстановительные реакции. 16. Электрохимические процессы. 17. Водоподготовка. 18. Основы органической химии.

Номер своего индивидуального варианта обучающийся получает от преподавателя на первом занятии в начале семестра.

### Авторский коллектив

И. В. Проскунов – кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая и неорганическая химия» КемГУ (общая редакция, разделы 1–17).

Л. А. Сенчурова – кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая и неорганическая химия» КемГУ (разделы 9, 14–17).

О. В. Салищева – кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая и неорганическая химия» КемГУ (разделы 12, 13).

Т. В. Шевченко – доктор технических наук, профессор кафедры «Общая и неорганическая химия» КемГУ (разделы 5, 13).

М. А. Захаренко – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Общая и неорганическая химия» КемГУ (раздел 18).



# 1. КЛАССЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

## *А. Теоретическая часть*

**Оксиды** – бинарные соединения химического элемента с кислородом в степени окисления  $-2$ , в котором сам кислород связан только с менее электроотрицательным элементом. В зависимости от химических свойств различают:

Солеобразующие оксиды:

- основные оксиды (например, оксид натрия  $\text{Na}_2\text{O}$ , оксид меди(II)  $\text{CuO}$ ): оксиды металлов, степень окисления которых  $+1, +2$ ;
- кислотные оксиды (например, оксид серы(VI)  $\text{SO}_3$ , оксид азота(IV)  $\text{NO}_2$ ): оксиды металлов со степенью окисления  $+5, +6, +7$  и оксиды неметаллов;
- амфотерные оксиды (например, оксид цинка  $\text{ZnO}$ , оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): оксиды металлов со степенью окисления  $+3, +4$  и исключения ( $\text{ZnO}, \text{BeO}, \text{SnO}, \text{PbO}$ );
- несолеобразующие оксиды: оксид углерода(II)  $\text{CO}$ , оксид азота(I)  $\text{N}_2\text{O}$ , оксид азота(II)  $\text{NO}$ , оксид кремния(II)  $\text{SiO}$ .

В соответствии с номенклатурой ИЮПАК, оксиды называют словом «оксид», после которого следует наименование химического элемента в родительном падеже, например:  $\text{Na}_2\text{O}$  – оксид натрия,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – оксид алюминия. Если элемент имеет переменную степень окисления, то в названии оксида указывается его степень окисления римской цифрой в скобках сразу после названия (без пробела). Например,  $\text{Cu}_2\text{O}$  – оксид меди(I),  $\text{CuO}$  – оксид меди(II),  $\text{FeO}$  – оксид железа(II),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – оксид железа(III),  $\text{Cl}_2\text{O}_7$  – оксид хлора(VII).

**Гидроксиды** – неорганические соединения, содержащие в составе концевую гидроксильную группу. Гидроксиды щелочных и щёлочноземельных металлов, а также аммония являются растворимыми и называются щелочами.

В зависимости от того, является ли соответствующий оксид основным, кислотным или амфотерным, соответственно различают:



- основные гидроксиды (основания) – только гидроксиды металлов со степенью окисления +1, +2, проявляющие основные свойства, (например гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , гидроксид калия  $\text{KOH}$ , гидроксид железа(II)  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  и др.). При реакциях диссоциации отщепляется гидроксогруппа  $\text{OH}^-$ ;

- кислотные гидроксиды (кислородсодержащие кислоты) – гидроксиды неметаллов и металлов со степенью окисления +5, +6, +7, проявляющие кислотные свойства (например, азотная кислота  $\text{HNO}_3$ , серная кислота  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , сернистая кислота  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , марганцевая кислота  $\text{HMnO}_4$  и др.). При диссоциации образуются катионы водорода и анионы кислотных остатков;

- амфотерные гидроксиды, гидроксиды металлов со степенью окисления +3, +4 и нескольких металлов со степенью окисления +2, которые проявляют амфотерные свойства. Амфотерные гидроксиды проявляют в зависимости от условий либо основные, либо кислотные свойства (например, гидроксид алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , гидроксид цинка  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ).

**Кислоты** – химические соединения, способные при диссоциации отдавать катион водорода (кислоты Бренстеда), либо соединения, способные принимать электронную пару с образованием ковалентной связи (кислоты Льюиса).

Кислоты принято классифицировать по различным формальным признакам:

- По содержанию атомов кислорода:

- бескислородные ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCN}$ );

- кислородсодержащие ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ).

- По количеству атомов водорода:

- одноосновные ( $\text{HNO}_3$ ); двухосновные ( $\text{H}_2\text{SeO}_4$ );

- трёхосновные ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_3\text{S}$ ); многоосновные ( $\text{H}_6\text{TeO}_6$ ).

- По силе: сильные – диссоциируют практически полностью, константы диссоциации больше  $1 \cdot 10^{-3}$  ( $\text{HNO}_3$ );



слабые – константа диссоциации меньше  $1 \cdot 10^{-3}$  (уксусная кислота  $K_d = 1,7 \cdot 10^{-5}$ ).

Названия кислородсодержащих кислот состоят из двух частей: собственного названия кислоты, выраженно-го прилагательным, и группового слова *кислота* (серная кислота, фосфорная кислота). Собственное название кислоты образуется от русского названия кислотообразующе-го элемента путём добавления различных суффиксов:

-н-, -ов-, -ев- (если элемент находится в единственной или высшей степени окисления);

промежуточная степень окисления +5 обозначается суф-фиксом -новат- (хлорноватая кислота  $\text{HClO}_3$ , бромноватая кислота  $\text{HBrO}_3$ , иодноватая кислота  $\text{HIO}_3$ );

промежуточные степени окисления +3 и +4 обозначаются суффиксом -(ов)ист- (мышьяковистая кислота  $\text{HAsO}_2$ , хло-ристая кислота  $\text{HClO}_2$ );

степень окисления +1 обозначается суффиксом -новатист- (азотноватистая кислота  $\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2$ , хлорноватистая кислота  $\text{HClO}$ );

если кислотообразующий элемент в двух кислотах нахо-дится в одной и той же степени окисления, то для кислоты с меньшим содержанием кислорода к названию добавляют приставку мета-, а для кислоты с большим содержанием кис-лорода – приставку орто-, (например, метафосфорная кисло-та  $\text{HPO}_3$  и ортофосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ).

Название бескислородных кислот:  $\text{HCl}$  – **хлороводород-ная** кислота,  $\text{H}_2\text{S}$  – **сероводородная** кислота,  $\text{HCN}$  – **циано-водородная** кислота.

**Соли** – сложные вещества, состоящие из любых катио-нов (кроме катионов водорода) и анионов кислотных остат-ков. Выделяют следующие типы солей:

Средние (нормальные) соли – продукты замещения всех катионов водорода в молекулах кислоты на катионы металла ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ).

Кислые соли – продукты частичного замещения катионов водорода в кислотах на катионы металла ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ).



Они образуются при нейтрализации основания избытком кислоты.

Основные соли – продукты неполного замещения гидроксогрупп основания ( $\text{OH}^-$ ) кислотными остатками ( $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ ). Они образуются в условиях избытка основания.

Комплексные соли  $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ .

По числу присутствующих в структуре катионов и анионов выделяют следующие типы солей:

Простые соли – соли, состоящие из одного вида катионов и одного вида анионов ( $\text{NaCl}$ ).

Двойные соли – соли, содержащие два различных катиона ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ).

Смешанные соли – соли, в составе которых присутствует два различных аниона ( $\text{Ca}(\text{OCl})\text{Cl}$ ).

Также различают гидратные соли (кристаллогидраты), в состав которых входят молекулы кристаллизационной воды, например,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ .

Названия солей состоят из названий анионов в именительном падеже и названий катионов в родительном падеже. Названия анионов строятся на основе русских или латинских названий кислотообразующих элементов. Если кислотообразующий элемент может иметь одну степень окисления, то к его названию добавляют суффикс *-ат*:

$\text{CO}_3^{2-}$  – карбонат,

$\text{GeO}_3^{2-}$  – германат.

Если кислотообразующий элемент может принимать две степени окисления, то для аниона, образованного этим элементом в более высокой степени окисления, применяют суффикс *-ат*, а для аниона с элементом в меньшей степени окисления – суффикс *-ит*:

$\text{SO}_4^{2-}$  – сульфат,

$\text{SO}_3^{2-}$  – сульфит.

Если элемент может принимать три степени окисления, то для высшей, средней и низшей степени окисления исполь-





зуют соответственно суффиксы -ат, -ит и суффикс -ит с приставкой гипо-:

$\text{NO}_3^-$  – нитрат,

$\text{NO}_2^-$  – нитрит,

$\text{NO}_2^{2-}$  – гипонитрит.

Наконец, в случае элементов, принимающих четыре степени окисления, для высшей степени окисления применяют приставку пер- и суффикс -ат, далее (в порядке понижения степени окисления) суффикс -ат, суффикс -ит и суффикс -ит с приставкой гипо-:

$\text{ClO}_4^-$  – перхлорат,

$\text{ClO}_3^-$  – хлорат,

$\text{ClO}_2^-$  – хлорит,

$\text{ClO}^-$  – гипохлорит.

Названия **кислых солей** образуются путём добавления приставки гидро- к названию аниона. Если на один анион приходится больше одного атома водорода, то его количество указывают при помощи умножающей приставки ( $\text{NaHCO}_3$  – гидрокарбонат натрия,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  – дигидрофосфат натрия). Аналогично, для образования названий **основных солей** используются приставки гидроксо- ( $\text{FeOHNO}_3$  – гидроксонитрат железа(II)).

**Кристаллогидратам** дают названия, добавляя слово гидрат к традиционному или систематическому названию соли ( $\text{Pb}(\text{BrO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  – гидрат бромата свинца(II),  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  – декагидрат карбоната натрия). Если известна структура кристаллогидрата, то может применяться номенклатура комплексных соединений ( $[\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$  – сульфат тетрааквабериллия(II)).

Названия **галогенидов** составляются из названия галогена с суффиксом -ид и катиона ( $\text{NaBr}$  – бромид натрия,  $\text{SF}_6$  – фторид серы(VI)). Кроме того, существует класс **псевдогалогенидов** – солей, которые содержат анионы с галогенидоподобными свойствами. Их названия образуются подобным образом ( $\text{Fe}(\text{CN})_2$  – цианид железа(II),  $\text{AgNCS}$  – тиоцианат серебра(I)).



## ***Б. Индивидуальные задания***

**1.1.** Определите, к какому классу неорганических соединений относятся данные вещества. Назовите их. Для оксида напишите уравнения реакций, характеризующие его химические свойства.

|           |   |
|-----------|---|
| <b>01</b> | MgO, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Al(OH) <sub>3</sub>                             |
| <b>02</b> | CuO, H <sub>2</sub> S, CuSO <sub>4</sub> , NaOH   |
| <b>03</b> | SiO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , Zn(OH) <sub>2</sub>                             |
| <b>04</b> | Cl <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> , Fe(OH) <sub>3</sub> |
| <b>05</b> | N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , HCl, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Cr(OH) <sub>3</sub>                              |
| <b>06</b> | SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , NaOH,                |
| <b>07</b> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , HCN, K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Ni(OH) <sub>2</sub>                              |
| <b>08</b> | ZnO, HNO <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , Ca(OH) <sub>2</sub>                           |
| <b>09</b> | Li <sub>2</sub> O, HCl, Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Ba(OH) <sub>2</sub>   |
| <b>10</b> | SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , LiOH              |
| <b>11</b> | Na <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> , KOH   |
| <b>12</b> | BaO, HNO <sub>2</sub> , CaSO <sub>4</sub> , Fe(OH) <sub>2</sub>   |
| <b>13</b> | K <sub>2</sub> O, HCN, Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Cr(OH) <sub>3</sub>  |
| <b>14</b> | Mn <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , AgBr, Co(OH) <sub>2</sub>                             |
| <b>15</b> | BeO, HNO <sub>3</sub> , NiSO <sub>4</sub> , Fe(OH) <sub>3</sub>   |
| <b>16</b> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , HF, BaSO <sub>4</sub> , Zn(OH) <sub>2</sub>  |
| <b>17</b> | SrO, HCl, Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Sr(OH) <sub>2</sub>   |
| <b>18</b> | CO <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , Ba(OH) <sub>2</sub>  |
| <b>19</b> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , HNO <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub> , Mg(OH) <sub>2</sub>                              |
| <b>20</b> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , HF, Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , Ca(OH) <sub>2</sub>              |
| <b>21</b> | N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , HBr, Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> , Cd(OH) <sub>2</sub>                             |
| <b>22</b> | CaO, H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , AlCl <sub>3</sub> , LiOH   |
| <b>23</b> | CrO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> , MnSO <sub>4</sub> , NaOH   |
| <b>24</b> | FeO, H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , Mn(OH) <sub>2</sub>                              |

**1.2.** Приведите названия указанных средней, кислой и основной солей. Напишите уравнения реакций, в которые может вступить данная средняя соль.



|    |  |
|----|--|
| 01 | MnSO <sub>4</sub> , Ca(HSO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , SnOHCl  |
| 02 | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , NaHCO <sub>3</sub> , (CuOH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                 |
| 03 | Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , AlOHSO <sub>4</sub>                 |
| 04 | FeCl <sub>3</sub> , KHSO <sub>4</sub> , ZnOHCl   |
| 05 | Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , KHCrO <sub>4</sub> , FeOHCl <sub>2</sub>                               |
| 06 | Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , Ca(HS) <sub>2</sub> , (CuOH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>              |
| 07 | Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , Al(OH) <sub>2</sub> Cl |
| 08 | AgNO <sub>3</sub> , KHSO <sub>3</sub> , CoOHSO <sub>4</sub>  |
| 09 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , Ca(HCrO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , CuOHCl                           |
| 10 | CaCO <sub>3</sub> , Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , AlOHCl <sub>2</sub>                 |
| 11 | FeSO <sub>4</sub> , CaHPO <sub>4</sub> , Al(OH) <sub>2</sub> Cl  |
| 12 | AlCl <sub>3</sub> , Mg(HSO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , (PbOH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>               |
| 13 | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , Cu(HSO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , CrOHCl              |
| 14 | BaCl <sub>2</sub> , KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , CoOHNO <sub>3</sub>                                  |
| 15 | ZnSO <sub>4</sub> , Ca(HSO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , FeOHNO <sub>3</sub>                               |
| 16 | FeSO <sub>4</sub> , Ba(HS) <sub>2</sub> , (ZnOH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                              |
| 17 | Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> , KHS, (NiOH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                |
| 18 | CaCl <sub>2</sub> , MgHPO <sub>4</sub> , Cr(OH) <sub>2</sub> Cl  |
| 19 | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , FeOHSO <sub>4</sub>                  |
| 20 | Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Ba(HSO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , ZnOHCl                            |
| 21 | Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , CdOHCl                              |
| 22 | AlCl <sub>3</sub> , LiHCO <sub>3</sub> , (CuOH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                               |
| 23 | Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , NaHCrO <sub>4</sub> , MnOHCl   |
| 24 | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , KHSO <sub>3</sub> , (CrOH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                   |

**1.3.** Напишите уравнения реакций между соответствующими кислотой и основанием (или амфотерным гидроксидом), в результате которых можно получить кислую и основную соли из задания 1.2.

**1.4.** Напишите эмпирические формулы соединений:

01) оксид углерода(IV), сернистая кислота, гидроксид железа(III), гидроксид кальция, нитрат магния, гидрофосфат натрия, гидрокарбонат магния;





02) оксид серы(VI), хлороводородная кислота, гидроксид бария, гидроксид алюминия, карбонат натрия, гидрофосфат кальция, гидроксонитрат цинка;

03) оксид серы(IV), хлорная кислота, гидроксид свинца(II), гидроксид бария, сульфат хрома(III), гидрокарбонат лития, гидроксохлорид алюминия;

04) оксид азота(IV), угольная кислота, гидроксид хрома(III), гидроксид железа (II), сульфат лития, дигидрофосфат кальция, гидроксосульфат меди(II);

05) оксид хрома(II), хлористая кислота, гидроксид олова(II), гидроксид хрома(II), гипохлорит натрия, гидрокарбонат натрия, гидроксохлорид хрома(III);

06) оксид марганца(VII), хлорноватистая кислота, гидроксид свинца(II), гидроксид натрия, сульфид натрия, дигидрофосфат кальция, дигидроксонитрат хрома(III);

07) оксид алюминия, хромовая кислота, гидроксид марганца(II), гидроксид цинка, метасиликат натрия, гидрокарбонат кальция, гидроксохлорид меди(II);

08) оксид фосфора(V), хлорноватая кислота, гидроксид никеля(II), гидроксид бериллия, хлорат калия, гидросульфид натрия, дигидроксонитрат алюминия;

09) оксид углерода(II), азотистая кислота, гидроксид железа(II), гидроксид железа(III), перхлорат аммония, гидросульфит магния, гидроксосульфат кобальта(III);

10) оксид хлора(I), метакремниевая кислота, гидроксид бария, гидроксид хрома(III), фторид бериллия, гидросульфат хрома(II), гидроксосульфат алюминия;

11) оксид хрома(VI), ортофосфорная кислота, гидроксид меди(II), гидроксид олова(II), дихромат аммония, дигидрофосфат магния, гидроксохлорид цинка;

12) оксид ртути(II), азотная кислота, гидроксид алюминия, гидроксид меди(II), сульфат кобальта(II), гидросульфат хрома(III), гидроксокарбонат меди(II);

13) оксид натрия, серная кислота, гидроксид кобальта(III), гидроксид магния, нитрат бария, гидрофосфат аммония, гидроксохлорид железа(III);



14) оксид меди(II), сероводородная кислота, гидроксид кальция, гидроксид свинца(II), ортофосфат магния, дигидрофосфат аммония, гидроксонитрат магния;

15) оксид азота(V), циановодородная кислота, гидроксид хрома(III), гидроксид бария, сульфат железа(II), гидросульфид бария, гидрокарбонат кадмия;

16) оксид бария, ортоборная кислота, гидроксид натрия, гидроксид алюминия, хромат серебра(I), гидросульфат олова(II), гидроксонитрат меди(II);

17) оксид олова(IV), бромоводородная кислота, гидроксид калия, гидроксид цинка, нитрат серебра(I), гидросульфит калия, гидрокарбонат хрома(III);

18) оксид марганца(VII), фтороводородная кислота, гидроксид магния, гидроксид бериллия, сульфат олова(IV), гидросульфат свинца(II), гидросульфат алюминия;

19) оксид азота(II), хлорная кислота, гидроксид кальция, гидроксид железа(III), перхлорат калия, гидросульфит натрия, гидрокарбонат меди(II);

20) оксид кальция, ортофосфорная кислота, гидроксид калия, гидроксид цинка, ортофосфат кальция, гидросульфит магния, гидроксонитрат меди(II);

21) оксид магния, серная кислота, гидроксид олова(II), гидроксид хрома(II), хромат бария, дигидрофосфат кальция, гидросульфат кобальта(III);

22) оксид меди(I), сернистая кислота, гидроксид железа(III), гидроксид кальция, фторид кальция, гидросульфат магния, гидрокарбонат кальция;

23) оксид хлора(VII), циановодородная кислота, гидроксид меди(II), гидроксид алюминия, сульфид цинка, гидрофосфат калия, дигидроксонитрат алюминия;

24) оксид кремния(IV), угольная кислота, гидроксид бария, гидроксид хрома(III), дихромат калия, гидрофосфат аммония, гидроксонитрат железа(III).

**1.5.** Напишите уравнения химических реакций, в результате которых можно получить основания и амфотерные гид-



роксиды из задания 1.4. Для амфотерных гидроксидов приведите уравнения реакций, доказывающие их амфотерность.

**1.6.** Напишите уравнения реакций, при помощи которых можно осуществить следующие превращения:

01.  $\text{Na} \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NaCl} \rightarrow \text{NaNO}_3$ .
02.  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ .
03.  $\text{Al} \rightarrow \text{AlCl}_3 \rightarrow \text{Al}(\text{NO}_3)_3 \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ .
04.  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO}$ .
05.  $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CrCl}_3 \rightarrow \text{Cr}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Na}_3[\text{Cr}(\text{OH})_6]$ .
06.  $\text{Ca} \rightarrow \text{CaO} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .
07.  $\text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Na}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{NaCl}$ .
08.  $\text{Zn} \rightarrow \text{ZnO} \rightarrow \text{ZnSO}_4 \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ .
09.  $\text{Mg} \rightarrow \text{MgSO}_4 \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgO} \rightarrow \text{MgCl}_2$ .
10.  $\text{S} \rightarrow \text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ .
11.  $\text{CaO} \rightarrow \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NaNO}_3$ .
12.  $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CuSO}_4 \rightarrow \text{CuCl}_2$ .
13.  $\text{K} \rightarrow \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KCl} \rightarrow \text{KNO}_3$ .
14.  $\text{Ba} \rightarrow \text{BaO} \rightarrow \text{Ba}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{BaCl}_2 \rightarrow \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ .
15.  $\text{Cu} \rightarrow \text{CuSO}_4 \rightarrow \text{CuCl}_2 \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CuO}$ .
16.  $\text{Mg} \rightarrow \text{MgO} \rightarrow \text{MgSO}_4 \rightarrow \text{MgCl}_2 \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$ .
17.  $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CuO} \rightarrow \text{Cu}$ .
18.  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ .
19.  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{FeCl}_3$ .
20.  $\text{Zn} \rightarrow \text{ZnSO}_4 \rightarrow \text{ZnCl}_2 \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ .
21.  $\text{Fe} \rightarrow \text{FeSO}_4 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ .
22.  $\text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Na}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$ .
23.  $\text{Sn} \rightarrow \text{SnCl}_2 \rightarrow \text{Sn}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{Sn}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{SnSO}_4$ .
24.  $\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$ .





## 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ХИМИИ

### А. Теоретическая часть

В основе шкалы относительных атомных масс лежит  $1/12$  часть массы атома углерода  $^{12}\text{C}$  [1]. Эту единицу называют атомной единицей массы (а.е.м.).  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

**Относительная атомная масса элемента  $A_r(\text{x})$**  – это число, показывающее, во сколько раз средняя масса его атома природного изотопного состава больше  $1/12$  массы атома углерода  $^{12}\text{C}$ :

$$A_r(\text{X}) = \frac{m_{\text{cp}}(\text{атома X})}{\frac{1}{12} m(\text{атома } ^{12}\text{C})}.$$

**Относительная молекулярная масса вещества  $M_r(\text{x})$**  – это число, показывающее, во сколько раз средняя масса молекулы природного изотопного состава больше  $1/12$  массы атома углерода  $^{12}\text{C}$ :

$$M_r(\text{X}) = \frac{m_{\text{cp}}(\text{молекулы X})}{\frac{1}{12} m(\text{атома } ^{12}\text{C})}.$$

**Относительная молекулярная масса вещества равна сумме произведений относительных атомных масс атомов на их число в составе молекулы:**

$$M_r(\text{H}_2\text{SO}_4) = 2A_r(\text{H}) + A_r(\text{S}) + 4A_r(\text{O}) = 2 \cdot 1 + 32 + 4 \cdot 16 = 98.$$

**Моль** – это количество вещества, в котором содержится  $6,02 \cdot 10^{23}$  его структурных единиц.

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  называется постоянной Авогадро и показывает число структурных единиц в одном моле любого вещества.

Величина, связывающая массу и количество вещества, – **молярная масса,  $M(\text{X})$** . Она равна отношению массы (г) вещества к его количеству (моль):

$$M(\text{X}) = \frac{m(\text{X})}{n(\text{X})}, \quad \text{т. е. масса 1 моль вещества.}$$

Размерность молярной массы – г/моль.

Отношение числа частиц  $N(\text{X})$  в системе к постоянной Авогадро  $N_A$  определяет **количество вещества**:



$$n(X) = \frac{N(X)}{N_A} [\text{моль}].$$

Отсюда, зная количество вещества, можно определить число частиц в системе:  $N(X) = n(X) \cdot N_A$ .

Зная молярную массу вещества и его физическую массу, можно также рассчитать количества вещества:

$$n(X) = \frac{m(X)}{M(X)} [\text{моль}].$$

В 1811 году итальянский физик и химик А. Авогадро сформулировал закон, носящий его имя:

**В равных объемах различных газов, измеренных при одинаковой температуре и давлении, содержится одинаковое число молекул.**

Из закона Авогадро вытекает важное следствие:

1 моль любого газа при нормальных условиях ( $T = 273 \text{ К}$ ,  $P = 101325 \text{ Па}$ ) занимает объем  $22,4 \text{ дм}^3$ . Этот объем называется **молярным**, обозначается  $V_M = 22,4 \text{ дм}^3/\text{моль}$ .

Из закона Авогадро и его следствия находим третью формулу для расчета количества вещества газа при н. у.:

$$n(X) = \frac{V(X)}{V_M} [\text{моль}].$$

**Эквивалентом вещества** называется его реальная частица (атом, молекула, ион) или условная частица (доля атома, доля молекулы, доля иона), которая эквивалентна **одному катиону водорода** в кислотно-основных реакциях или **одному электрону** в окислительно-восстановительных реакциях [2].

**Фактор эквивалентности**  $f_{\text{экв}}(X)$  – это число, показывающее, какая доля реальной частицы является эквивалентом. Численные значения  $f_{\text{экв}}$  различных веществ можно рассчитывать следующим образом:

$$f_{\text{экв}}(\text{элемента}) = \frac{1}{\text{валентность}};$$

$$f_{\text{экв}}(\text{кислоты}) = \frac{1}{\text{основность}};$$



$$f_{\text{эkv}}(\text{основания}) = \frac{1}{\text{кислотность}};$$

$$f_{\text{эkv}}(\text{соли}) = \frac{1}{\text{валентность} \cdot \text{число атомов металла}};$$

$$f_{\text{эkv}} \left( \begin{array}{l} \text{окислителя или} \\ \text{восстановителя} \end{array} \right) = \frac{1}{\text{число принятых или отданных электронов}}.$$

**Молярная масса эквивалентов вещества (X) обозначается  $M_{\text{эkv}}(X)$  и выражается в г/моль.  $M_{\text{эkv}}(X)$  равна произведению фактора эквивалентности на молярную массу вещества ( $M(X)$ ):**  $M_{\text{эkv}}(X) = f_{\text{эkv}}(X) \cdot M(X)$ .

**Закон эквивалентов: массы взаимодействующих веществ пропорциональны молярным массам эквивалентов этих веществ.**

Если  $m(X_1)$  и  $m(X_2)$  – массы вступивших в реакцию веществ, а  $M_{\text{эkv}}(X_1)$  и  $M_{\text{эkv}}(X_2)$  – молярные массы эквивалентов этих веществ, то математическое выражение закона эквивалентов имеет вид:

$$\frac{m(X_1)}{m(X_2)} = \frac{M_{\text{эkv}}(X_1)}{M_{\text{эkv}}(X_2)}.$$

Количество эквивалентов вещества X  $n_{\text{эkv}}(X)$  можно рассчитать, используя равенство:  $n_{\text{эkv}}(X) = m(X)/M_{\text{эkv}}(X)$ .

### **Б. Примеры решения типовых задач**

**Пример 1.** Вычислите объем 68 г аммиака при нормальных условиях.

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Д а н о:</b><br/> <math>m(\text{NH}_3) = 68 \text{ г}</math><br/> при н. у.</p> | <p><b>Р е ш е н и е:</b><br/> Определяется молярная масса аммиака, она численно совпадает с его относительной молекулярной массой:<br/> <math>M_r(\text{NH}_3) = A_r(\text{N}) + 3A_r(\text{H}) =</math><br/> <math>14 + 3 \cdot 1 = 17;</math><br/> <math>M(\text{NH}_3) = 17 \text{ г/моль}.</math></p> |
| <p><math>V(\text{NH}_3) - ?</math></p>  |   |

Количество вещества аммиака рассчитывается по формуле:





$$n(\text{NH}_3) = \frac{m(\text{NH}_3)}{M(\text{NH}_3)},$$

где  $n(\text{NH}_3)$  – количество вещества аммиака, моль;  
 $m(\text{NH}_3)$  – масса аммиака, г;  
 $M(\text{NH}_3)$  – молярная масса аммиака, г/моль.

$$n(\text{NH}_3) = \frac{68}{17} = 4 \text{ [моль]}.$$

Используя молярный объем газа при нормальных условиях,  $V_M = 22,4 \text{ дм}^3/\text{моль}$ , определяется объем аммиака:

$$\begin{aligned} V(\text{NH}_3) &= V_M \cdot n(\text{NH}_3); \\ V(\text{NH}_3) &= 22,4 \cdot 4 = 89,6 \text{ [дм}^3\text{]}. \end{aligned}$$

**Пример 2.** Какой объем займут 27 г оксида углерода(IV) при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении 104 кПа?

| <i>Д а н о:</i>   | <i>Р е ш е н и е:</i>  |
|---|--|
| $m(\text{CO}_2) = 27 \text{ г}$<br>$t = 27^\circ\text{C}$<br>$P = 104 \text{ кПа} =$<br>$104 \cdot 10^3 \text{ Па}$<br><hr/> $V(\text{CO}_2) - ?$ | <p>Для определения объема данной массы газа необходимо применить уравнение Клапейрона-Менделеева:</p> $P \cdot V = \frac{m(\text{CO}_2)}{M(\text{CO}_2)} \cdot R \cdot T,$ |

где  $P$  – давление газа, Па;  $V$  – объем газа,  $\text{м}^3$ ;  
 $m(\text{CO}_2)$  – масса газа, г;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная  $8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ ;  $T$  – абсолютная температура, К;  $M(\text{CO}_2)$  – молярная масса газа, г/моль.

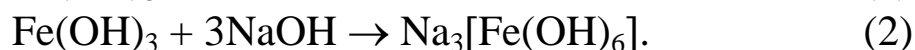
Определяется молярная масса газа и абсолютная температура:  
 $M_r(\text{CO}_2) = A_r(\text{C}) + 2A_r(\text{O}) = 12 + 2 \cdot 16 = 44$ ;  
 $M(\text{CO}_2) = 44 \text{ г/моль}$ ;  
 $T = t + 273 = 27 + 273 = 300 \text{ К}$ .

Из уравнения Клапейрона-Менделеева выражается объем газа и выполняется расчет:

$$V = \frac{m(\text{CO}_2) \cdot R \cdot T}{P \cdot M(\text{CO}_2)} = \frac{27 \cdot 8,314 \cdot 300}{104 \cdot 10^3 \cdot 44} = 1,472 \cdot 10^{-2} \text{ [м}^3\text{]}.$$



**Пример 3.** Для гидроксида железа(III) определите в указанных реакциях молярную массу, факторы эквивалентности, молярные массы эквивалентов:



### **Р е ш е н и е:**

В первой реакции амфотерный гидроксид проявляет свойства двухкислотного основания, поэтому

$$f_{\text{экв}} \text{Fe(OH)}_3 = 1/\text{кислотность} = 1/2;$$

$$M_r \text{Fe(OH)}_3 = A_r(\text{Fe}) + 3A_r(\text{O}) + 3A_r(\text{H}) = 56 + 3 \cdot 16 + 3 \cdot 1 = 107;$$

$$M \text{Fe(OH)}_3 = 107 \text{ г/моль};$$

$$M_{\text{экв}} \text{Fe(OH)}_3 = 1/2 \cdot 107 \text{ г/моль} = 53,5 \text{ г/моль}.$$

А во второй реакции – свойства трехосновной кислоты, поэтому  $f_{\text{экв}} \text{Fe(OH)}_3 = 1/\text{основность} = 1/3;$

$$M_{\text{экв}} \text{Fe(OH)}_3 = 1/3 \cdot 107 \text{ г/моль} = 35,7 \text{ г/моль}.$$

### **В. Индивидуальные задания**

**2.1.** Для порции вещества X массой  $m(X)$  рассчитайте:  
а) количество вещества, б) число молекул, в) массу одной молекулы в граммах.

|           | <b>Вещество (X)</b> | <b><math>m(X)</math>, г</b> |
|-----------|---------------------|-----------------------------|
| <b>01</b> | оксид серы(IV)      | 60                          |
| <b>02</b> | сероводород         | 37                          |
| <b>03</b> | оксид азота(I)      | 95                          |
| <b>04</b> | фторид фосфора(III) | 64                          |
| <b>05</b> | аммиак              | 51                          |
| <b>06</b> | фторид серы(IV)     | 260                         |
| <b>07</b> | хлороводород        | 49                          |
| <b>08</b> | оксид азота(IV)     | 120                         |
| <b>09</b> | фторид фосфора(V)   | 116                         |
| <b>10</b> | оксид азота(II)     | 255                         |
| <b>11</b> | фторид серы(VI)     | 184                         |
| <b>12</b> | селеноводород       | 160                         |



|           | <b>Вещество (X)</b> | <b>m(X), г</b> |
|-----------|---------------------|----------------|
| <b>13</b> | водород             | 73             |
| <b>14</b> | оксид азота(III)    | 80             |
| <b>15</b> | бромоводород        | 300            |
| <b>16</b> | оксид углерода(IV)  | 96             |
| <b>17</b> | фторид кремния(IV)  | 53             |
| <b>18</b> | иодоводород         | 190            |
| <b>19</b> | оксид углерода(II)  | 60             |
| <b>20</b> | фторид селена(VI)   | 105            |
| <b>21</b> | кислород            | 120            |
| <b>22</b> | сероводород         | 235            |
| <b>23</b> | фторид фосфора(III) | 285            |
| <b>24</b> | оксид азота(I)      | 29             |

**2.2.** А. Рассчитайте объем и массу порции газа X количеством вещества  $n(X)$  при нормальных условиях. Б. Определите число частиц (молекул или атомов) в данной порции газа.

|           | <b>Газ (X)</b>     | <b>n(X), моль</b> |
|-----------|--------------------|-------------------|
| <b>01</b> | бромоводород       | 2,0               |
| <b>02</b> | оксид азота(I)     | 2,5               |
| <b>03</b> | оксид серы(IV)     | 0,4               |
| <b>04</b> | аммиак             | 1,5               |
| <b>05</b> | оксид углерода(II) | 6,2               |
| <b>06</b> | аргон              | 2,3               |
| <b>07</b> | оксид азота(II)    | 1,5               |
| <b>08</b> | оксид углерода(IV) | 3,1               |
| <b>09</b> | гелий              | 2,7               |
| <b>10</b> | хлор               | 3,8               |
| <b>11</b> | иодоводород        | 1,3               |
| <b>12</b> | фторид серы(VI)    | 0,6               |
| <b>13</b> | неон               | 2,1               |
| <b>14</b> | фтор               | 1,7               |
| <b>15</b> | сероводород        | 5,2               |
| <b>16</b> | метан              | 5,5               |
| <b>17</b> | оксид азота(IV)    | 3,4               |



|           | Газ (X)          | $n(X)$ , моль |
|-----------|------------------|---------------|
| <b>18</b> | хлороводород     | 2,9           |
| <b>19</b> | азот             | 2,0           |
| <b>20</b> | кислород         | 1,4           |
| <b>21</b> | селеноводород    | 0,6           |
| <b>22</b> | оксид азота(III) | 3,0           |
| <b>23</b> | водород          | 2,3           |
| <b>24</b> | оксид серы(IV)   | 4,1           |

**2.3.** А. Рассчитайте молярную массу газа, заданный объём которого при нормальных условиях имеет соответствующую массу. Б. Определите число молекул, содержащихся в данном объёме газа?

|           | $V$ , дм <sup>3</sup> | $m$ , г |
|-----------|-----------------------|---------|
| <b>01</b> | 2,8                   | 2,70    |
| <b>02</b> | 1,3                   | 1,86    |
| <b>03</b> | 1,4                   | 1,06    |
| <b>04</b> | 2,4                   | 3,00    |
| <b>05</b> | 3,2                   | 4,00    |
| <b>06</b> | 4,8                   | 9,43    |
| <b>07</b> | 2,0                   | 7,14    |
| <b>08</b> | 7,3                   | 11,08   |
| <b>09</b> | 1,0                   | 0,71    |
| <b>10</b> | 5,6                   | 9,13    |
| <b>11</b> | 5,6                   | 4,25    |
| <b>12</b> | 3,2                   | 4,57    |
| <b>13</b> | 1,3                   | 0,99    |
| <b>14</b> | 7,6                   | 0,68    |
| <b>15</b> | 2,7                   | 2,05    |
| <b>16</b> | 4,0                   | 3,04    |
| <b>17</b> | 4,6                   | 16,43   |
| <b>18</b> | 1,5                   | 2,01    |
| <b>19</b> | 3,3                   | 9,43    |
| <b>20</b> | 6,0                   | 7,50    |
| <b>21</b> | 7,0                   | 0,63    |



|    | V, дм <sup>3</sup> | m, г  |
|----|--------------------|-------|
| 22 | 7,4                | 12,06 |
| 23 | 8,4                | 12.00 |
| 24 | 3,0                | 9,51  |

**2.4.** Определите факторы эквивалентности и рассчитайте молярные массы эквивалентов подчеркнутых веществ в реакциях своего варианта.

|    | Реакции   |
|----|---|
| 01 | $\underline{\text{S}} + 2\text{F}_2 = \text{SF}_4$<br>$\underline{\text{H}_3\text{PO}_4} + \text{NaOH} = \text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}$                  |
| 02 | $\underline{\text{Zn}} + 2\text{HCl} = \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$<br>$\underline{\text{Ca(OH)}_2} + \text{HCl} = \text{CaOHCl} + \text{H}_2\text{O}$                   |
| 03 | $\underline{\text{C}} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$<br>$2\text{NaOH} + \underline{\text{H}_3\text{PO}_4} = \text{Na}_2\text{HPO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$                 |
| 04 | $\underline{\text{N}_2} + 3\text{H}_2 = 2\text{NH}_3$<br>$\underline{\text{Zn(OH)}_2} + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2[\text{Zn(OH)}_4]$                                    |
| 05 | $\underline{\text{S}} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$<br>$\underline{\text{Al(OH)}_3} + \text{HCl} = \text{Al(OH)}_2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$                         |
| 06 | $\underline{\text{S}} + 3\text{F}_2 = \text{SF}_6$<br>$\underline{\text{H}_2\text{SO}_4} + \text{NaOH} = \text{NaHSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$                           |
| 07 | $\underline{\text{Cu}} + \text{Cl}_2 = \text{CuCl}_2$<br>$\underline{\text{Cr(OH)}_3} + 3\text{NaOH} = \text{Na}_3[\text{Cr(OH)}_6]$                                    |
| 08 | $\underline{\text{Mg}} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{MgSO}_4 + \text{H}_2$<br>$\text{NaOH} + \underline{\text{H}_2\text{SO}_4} = \text{NaHSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ |
| 09 | $\underline{2\text{P}} + 3\text{Cl}_2 = 2\text{PCl}_3$<br>$\underline{\text{Al(OH)}_3} + 2\text{HCl} = \text{AlOHCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$                           |
| 10 | $\underline{\text{Sn}} + 2\text{HCl} = \text{SnCl}_2 + \text{H}_2$<br>$\underline{\text{Cr(OH)}_3} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{CrOHSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$     |
| 11 | $\underline{2\text{P}} + 5\text{Cl}_2 = 2\text{PCl}_5$<br>$\underline{\text{H}_3\text{PO}_4} + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{HPO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$            |
| 12 | $\underline{2\text{B}} + 3\text{Cl}_2 = 2\text{BCl}_3$<br>$\underline{\text{H}_2\text{CrO}_4} + \text{KOH} = \text{KHCrO}_4 + \text{H}_2\text{O}$                       |
| 13 | $\underline{2\text{Ba}} + \text{O}_2 = 2\text{BaO}$<br>$\underline{\text{H}_3\text{PO}_4} + \text{Ba(OH)}_2 = \text{BaHPO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$                     |





|    | Реакции  |
|----|--|
| 14 | $\underline{\text{Si}} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$<br>$\underline{\text{Mg(OH)}}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{MgSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$                     |
| 15 | $\underline{\text{Si}} + 2\text{F}_2 = \text{SiF}_4$<br>$\underline{\text{Cu(OH)}}_2 + \text{HNO}_3 = \text{CuOHNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$                            |
| 16 | $\underline{\text{S}} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{S}$<br>$\underline{\text{Ba(OH)}}_2 + \text{HCl} = \text{BaOHCl} + \text{H}_2\text{O}$                            |
| 17 | $4\underline{\text{B}} + 3\text{O}_2 = 2\text{B}_2\text{O}_3$<br>$\underline{\text{Al(OH)}}_3 + \text{NaOH} = \text{Na[Al(OH)}_4]$                                     |
| 18 | $2\underline{\text{C}} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$<br>$\underline{\text{Sn(OH)}}_2 + \text{HNO}_3 = \text{SnOHNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$                               |
| 19 | $2\underline{\text{B}} + 3\text{Cl}_2 = 2\text{BCl}_3$<br>$\underline{\text{H}_3\text{PO}_4} + \text{Ca(OH)}_2 = \text{CaHPO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$                 |
| 20 | $\underline{\text{Zn}} + 2\text{HCl} = \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$<br>$\underline{\text{H}_2\text{S}} + \text{NaOH} = \text{NaHS} + \text{H}_2\text{O}$                |
| 21 | $\underline{\text{S}} + 3\text{F}_2 = \text{SF}_6$<br>$\underline{\text{Sr(OH)}}_2 + \text{HCl} = \text{SrOHCl} + \text{H}_2\text{O}$                                  |
| 22 | $\underline{\text{C}} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$<br>$\underline{\text{Fe(OH)}}_3 + 2\text{HCl} = \text{FeOHCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$                               |
| 23 | $\underline{\text{Mg}} + 2\text{HCl} = \text{MgCl}_2 + \text{H}_2$<br>$\underline{\text{H}_3\text{PO}_4} + \text{NaOH} = \text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ |
| 24 | $\underline{\text{S}} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$<br>$\underline{\text{Al(OH)}}_3 + 3\text{NaOH} = \text{Na}_3[\text{Al(OH)}_6]$                                       |

**2.5.** Рассчитайте объём водорода, который выделится при взаимодействии соответствующей навески металла с кислотой в указанных условиях.

|    | Металл   | $m_{(\text{Me})}$ , г | $t$ , °C | $P$ , кПа |
|----|----------|-----------------------|----------|-----------|
| 01 | алюминий | 18                    | 15       | 98,30     |
| 02 | магний   | 12                    | 0        | 97,80     |
| 03 | стронций | 44                    | 5        | 102,90    |
| 04 | цинк     | 95                    | 9        | 102,90    |
| 05 | железо   | 32                    | 17       | 98,00     |
| 06 | натрий   | 52                    | 7        | 102,30    |
| 07 | калий    | 11                    | 3        | 101,80    |



|           | <b>Металл</b> | <b>m<sub>(Me)</sub>, г</b> | <b>t, °C</b> | <b>P, кПа</b> |
|-----------|---------------|----------------------------|--------------|---------------|
| <b>08</b> | марганец      | 37                         | 10           | 97,90         |
| <b>09</b> | никель        | 90                         | 5            | 99,00         |
| <b>10</b> | цинк          | 20                         | 27           | 102,20        |
| <b>11</b> | кадмий        | 15                         | 33           | 105,80        |
| <b>12</b> | олово         | 46                         | 23           | 99,80         |
| <b>13</b> | кальций       | 80                         | 17           | 101,20        |
| <b>14</b> | алюминий      | 12                         | 18           | 76,70         |
| <b>15</b> | цинк          | 27                         | 27           | 127,50        |
| <b>16</b> | магний        | 18                         | 30           | 98,50         |
| <b>17</b> | железо        | 70                         | 12           | 116,30        |
| <b>18</b> | стронций      | 47                         | 22           | 93,50         |
| <b>19</b> | натрий        | 38                         | 28           | 128,60        |
| <b>20</b> | калий         | 65                         | 20           | 64,00         |
| <b>21</b> | кальций       | 12                         | 19           | 87,60         |
| <b>22</b> | цинк          | 44                         | 35           | 99,87         |
| <b>23</b> | магний        | 57                         | 10           | 127,80        |
| <b>24</b> | марганец      | 63                         | 0            | 89,90         |



### 3. СТРОЕНИЕ АТОМА. ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН. ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

#### *А. Теоретическая часть*

**Электронная орбиталь (ЭО)** – это область около ядерного пространства атома, в которой пребывание электрона наиболее вероятно. Электронная орбиталь характеризуется тремя параметрами, получившими название **квантовых чисел** ( $n, l, m_l$ ) [3, 4].

**Главное квантовое число  $n$**  определяет общую энергию электрона на энергетическом уровне и размеры ЭО; принимает значения натурального ряда чисел:  $n = 1, 2, 3, 4 \dots \infty$ .

Совокупность электронов в атоме с одинаковым значением главного квантового числа образует электронный слой:  $n = 1$  (K);  $n = 2$  (L);  $n = 3$  (M);  $n = 4$  (N) и т. д.

**Орбитальное (побочное) квантовое число  $l$**  характеризует пространственную форму орбитали и зависит от  $n$ . Оно принимает целочисленные значения от 0 до  $(n - 1)$ :

$$l = 0, 1, 2, 3 \dots (n - 1).$$

Для  $n = 1$ ,  $l = 0$ ; для  $n = 2$ ,  $l = 0, 1$ ; для  $n = 3$ ,  $l = 0, 1, 2$ ; для  $n = 4$ ,  $l = 0, 1, 2, 3$ .

Число подуровней на каждом энергетическом уровне **равно значению его главного квантового числа**.

ЭО, для которых  $l = 0$ , называют s-орбиталями,  $l = 1$  – p-орбиталями,  $l = 2$  – d-орбиталями и  $l = 3$  – f-орбиталями.

S-ЭО соответствует форма шара; p-ЭО – форма симметричной объемной восьмерки; d-ОЭ – форма двух пересекающихся объемных восьмерок. Форма f-ЭО еще более усложнена.

**Магнитное квантовое число  $m_l$**  определяет магнитный момент и ориентацию ЭО в пространстве, зависит от  $l$ . Магнитное квантовое число принимает значения от  $-l$  через 0 до  $+l$ . Так, если  $l = 2$ , то  $m_l = -2, -1, 0, +1, +2$ , т. е. имеет пять значений. Число значений  $m_l$  при данном орбитальном кван-



товом числе  $l$ , равное  $(2l + 1)$ , определяет число возможных ориентаций ЭО в пространстве и число орбиталей на подуровне: s – одна ЭО, p – три ЭО, d – пять ЭО, f – семь ЭО.

Для характеристики «*спина*» электрона, его собственного или внутреннего момента количества движения микрочастицы, введено **спиновое квантовое число  $m_s$** . Оно принимает два значения:  $+1/2$  и  $-1/2$ .

Заполнение ЭО в атомах элементов происходит в соответствии с принципом Паули, принципом наименьшей энергии, правилом Клечковского и правилом Хунда.

**Принцип Паули:** в многоэлектронном атоме не может быть двух электронов, имеющих одинаковый набор всех четырех квантовых чисел.

**Принцип наименьшей энергии:** заполнение подуровней в многоэлектронном атоме происходит в порядке последовательного увеличения их энергии, что соответствует наименьшей энергии электрона и атома в целом.

**Правило Клечковского:** заполнение подуровней происходит в порядке последовательного увеличения суммы главного и орбитального квантовых чисел  $(n + l)$ , в случае равенства этих сумм сначала заполняется подуровень с меньшим значением квантового числа.

**Правило Хунда:** в пределах подуровня электроны стремятся занять максимальное число орбиталей, т. е. располагаются так, чтобы их суммарный спин был максимальным, только в этом случае энергия атома минимальна.

В зависимости от того, на какой энергетический подуровень в атоме поступает последний электрон, элементы делятся на **s-, p-, d- и f-элементы**.

При этом **s-элементы** составляют I и II главные подгруппы периодической системы (а также H и He); **p-элементы** – III, IV, V, VI, VII, VIII главные подгруппы; **d-элементы** – побочные подгруппы периодической системы; а **f-элементы** (лантаноиды и актиноиды) вынесены за ее пределы.



У s-элементов валентными являются **s-электроны внешнего слоя**, у p-элементов – **s- и p-электроны внешнего слоя**, а у d-элементов – **s-электроны внешнего слоя и d-электроны предвнешнего слоя**.

Причина возникновения химической связи обусловлена тем, что образование многоатомной системы сопровождается выигрышем в энергии (уменьшением общей энергии системы).

В зависимости от распределения электронной плотности между атомами в веществах различают основные виды связи – ковалентную, ионную и металлическую.

Для описания свойств и строения различных молекулярных частиц наиболее часто применяют метод валентных связей (МВС), метод молекулярных орбиталей (ММО) и метод отталкивания неподеленных электронных пар валентных орбиталей (метод Гиллеспи).

МВС позволяет объяснить пространственную структуру молекулы с позиции **теории гибридизации атомных орбиталей**.

**Гибридизация** – это математическое преобразование волновой функции в уравнении Шредингера, выравнивающее валентные электронные орбитали центрального атома по форме и по энергии. Гибридизация возможна за счет **выигрыша в энергии при образовании гибридными орбиталями  $\sigma$ -связей и более симметричного распределения электронной плотности в молекуле**.

Если гибридные орбитали образуются в результате взаимодействия s- и одной p-электронных орбиталей, то говорят об **sp-гибридизации**. Две гибридные sp-орбитали располагаются в поле ядра атома так, чтобы взаимодействие между ними было минимальным, т. е. под углом  $180^\circ$ . Молекулы, в составе которых находятся центральные атомы с sp-гибридными орбиталями, имеют **линейную структуру** ( $\text{BeH}_2$ ,  $\text{BeF}_2$ ,  $\text{BeCl}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{MgBr}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и др.).

При взаимодействии одной s- и двух p-орбиталей имеет место **sp<sup>2</sup>-гибридизация**. Образующиеся три гибридные sp<sup>2</sup>-





орбитали располагаются в одной плоскости, угол между ними равен  $120^\circ$ . Такой тип гибридизации имеет место в молекулах **треугольной формы**  $\text{BF}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{AlH}_3$ ,  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{SO}_3$  и др.

**$\text{sp}^3$ -гибридизация** возникает при взаимодействии одной s- и трех p-орбиталей. Примером являются молекулы  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{SiCl}_4$  и др., имеющие **форму тетраэдра**.

Встречаются  **$\text{sp}^3\text{d}^2$ - ( $\text{d}^2\text{sp}^3$ -) и  $\text{sp}^3\text{d}$ -гибридизации**. В первом случае пространственная конфигурация гибридных валентных орбиталей центральных атомов **октаэдрическая** ( $\text{SF}_6$ ), во втором – **тригональная бипирамида** ( $\text{PF}_5$ ,  $\text{PCl}_5$ ,  $\text{PBr}_5$  и др.).

ММО безошибочно предсказывает магнитные свойства молекулярной частицы и ее устойчивость, а также позволяет описывать частицы с нечетным суммарным числом всех валентных электронов химически связанных атомов.

Метод Гиллеспи позволяет объяснить экспериментальные данные о валентных углах в молекулярных частицах, имеющих в составе центрального атома неподеленные электронные пары ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{ClF}_3$ ).

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Составьте электронные формулы атомов кальция и титана. Определите их валентные электроны.

#### ***Решение:***

Кальций и титан – элементы 4-го периода, их атомы имеют четыре электронных слоя, причем четвертый является внешним.

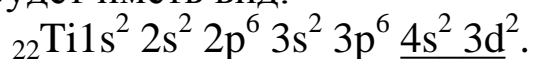
Кальций ( $Z = 20$ ) – элемент IIА подгруппы, следовательно, на его внешний 4s-подуровень поступают два электрона, а предвнешние уровни и подуровни максимально заполнены в соответствии с принципом наименьшей энергии и принципом Паули.

Электронная формула кальция:  ${}_{20}\text{Ca } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 \underline{4s^2}$ .



Валентные электроны –  $4s^2$ , т. е. кальций относится к *s-элементам*.

После заполнения  $4s$ -подуровня электроны поступают на  $3d$ -подуровень (принцип наименьшей энергии), поэтому электронная формула титана, порядковый номер которого 22 (IVB подгруппа), будет иметь вид:



Последний, 22-й, электрон занимает  $d$ -орбиталь, следовательно, титан относится к *d-элементам*. Валентные электроны –  $4s^2 3d^2$ , т. е.  $s$ -электроны внешнего слоя и  $d$ -электроны предвнешнего слоя.

**Пример 2.** Определите положение в периодической системе химических элементов, атомы которых имеют следующие валентные электроны: а)  $\dots 3s^2 3p^1$ ; б)  $\dots 4s^2 3d^5$ .

Укажите их порядковые номера. Какова их высшая степень окисления? Составьте формулы отвечающих им оксидов.

### ***Решение:***

Число энергетических уровней в атоме равно номеру периода, в котором находится данный элемент.

А. Электроны атома первого химического элемента расположены на трех энергетических уровнях, следовательно, он находится *в третьем периоде*. Общее число валентных электронов равно трем, последний электрон поступает на  $p$ -подуровень, следовательно, этот элемент расположен *в IIIA подгруппе* и его порядковый номер 13. Это алюминий,  ${}_{13}\text{Al}$ . Степень окисления алюминия равна +3. Молекулярная формула оксида –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Б. Электроны атома второго химического элемента расположены на четырех энергетических уровнях, следовательно, он находится *в четвертом периоде*. Общее число валентных электронов равно семи. Последний электрон расположен на  $d$ -подуровне, т. е. этот элемент является  $d$ -элементом. Поэтому он принадлежит к *VIB подгруппе* и имеет порядковый номер 25. Это марганец,  ${}_{25}\text{Mn}$ .



Высшая степень окисления марганца равна +7 (численно равна номеру группы). Формула оксида, отвечающая этой степени окисления, –  $\text{Mn}_2\text{O}_7$ .

**Пример 3.** Какой из элементов – бериллий или кальций – обладает более выраженными металлическими свойствами?

**Решение:**

Атомы бериллия и кальция имеют следующие электронные формулы:  ${}_4\text{Be } 1s^2 2s^2$ ;  ${}_{20}\text{Ca } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$ .

Химическая природа металлических элементов обуславливается способностью атомов достаточно легко терять электроны и проявлять восстановительные свойства, что находит отражение в такой энергетической характеристике, как *энергия ионизации*.

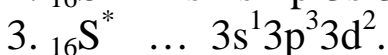
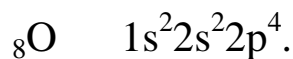
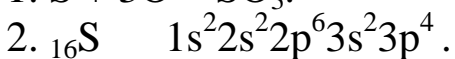
**Энергия ионизации ( $E_{\text{и}}$ )** – это энергия, которая затрачивается для отрыва одного электрона от нейтрального атома в основном состоянии. В главных подгруппах периодической системы химических элементов с ростом порядкового номера элемента и эффективных радиусов атомов энергия ионизации уменьшается. Это соответствует усилению металлических свойств химических элементов в подгруппе:  $E_{\text{и}}(\text{Ca}) = 589,53 \text{ кДж/моль}$ ;  $E_{\text{и}}(\text{Be}) = 900,41 \text{ кДж/моль}$ .

Следовательно, элемент кальций обладает более выраженными металлическими свойствами, чем бериллий.

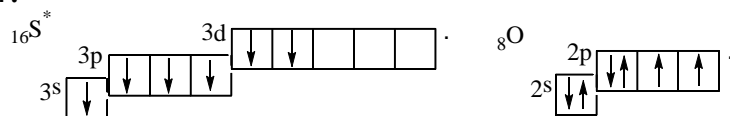
**Пример 4.** Определите тип гибридизации орбиталей центрального атома и пространственную структуру молекулы  $\text{SO}_3$ .

**Решение:**

Устанавливается пространственная структура молекулы  $\text{SO}_3$  с использованием следующей схемы.

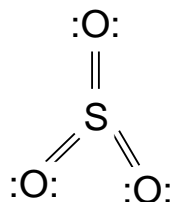


4.



5. Атом серы связан с тремя атомами кислорода, значит, число  $\sigma$ -связей и число гибридных орбиталей равно трем.

6. Тип гибридизации –  $sp^2$ . Гибридные орбитали направлены в пространстве под углом  $120^\circ$ . Молекула  $SO_3$  имеет форму плоского треугольника:



7. После образования  $\sigma$ -связей у атома серы осталось три неиспользованных валентных электрона, а у каждого атома кислорода – по одному электрону. Следовательно, каждый атом кислорода связан с атомом серы дополнительно  $\pi$ -связью.

**Пример 5.** Составьте энергетические диаграммы молекулярных частиц  $F_2$  и  $F_2^+$ . Сопоставьте магнитные свойства и определите порядок связи этих частиц.

### *Решение:*

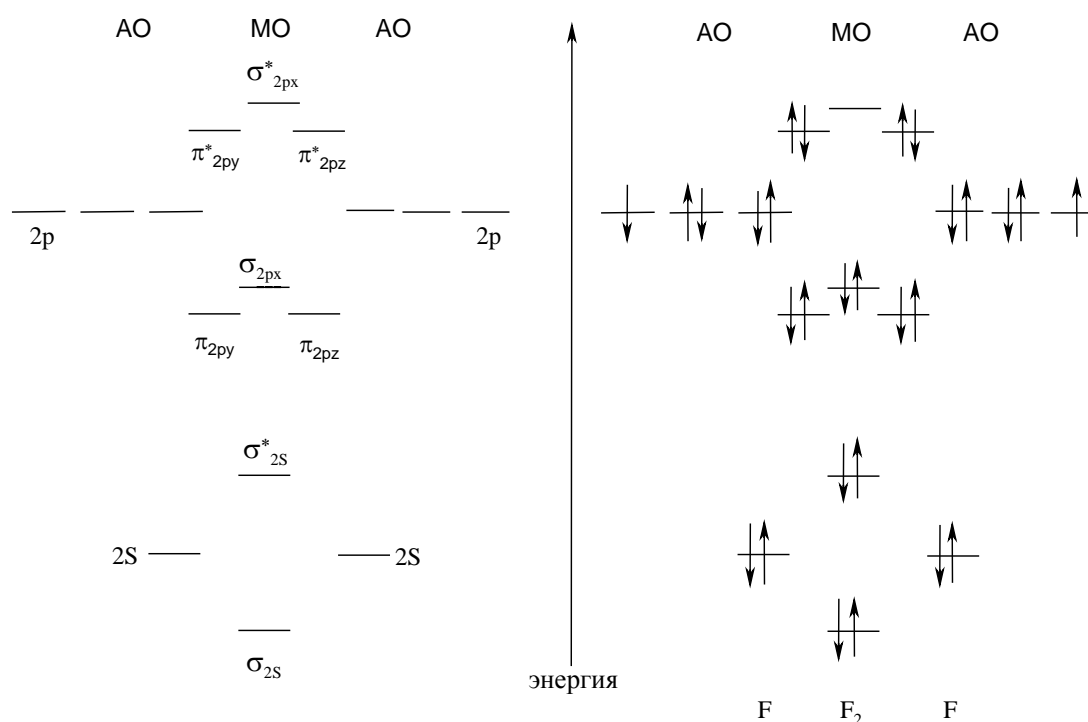
Атомы элементов второго периода, образующие молекулярные частицы, имеют заполненные электронами орбитали К-слоя и орбитали валентного слоя. Орбитали первого электронного слоя не принимают участия в образовании связей, они составляют остов частиц. Обозначим его буквами КК.

При линейной комбинации атомных  $2s$ - и  $2p$ -орбиталей возникают молекулярные орбитали двух видов – связывающие и разрыхляющие. При взаимодействии  $2s$ -орбиталей двухатомных частиц образуется связывающая  $\sigma_{2s}$  и разрыхляющая  $\sigma_{2s}^*$ -орбитали.

$\pi$ -молекулярные орбитали получаются при комбинации  $2p_z$  и  $2p_y$ -орбиталей. Молекулярные  $\pi_{2py}$  и  $\pi_{2pz}$  – связывающие, а также  $\pi_{2py}^*$  и  $\pi_{2pz}^*$  – разрыхляющие орбитали имеют одинаковую энергию, но отличаются ориентацией в пространстве. Из двух  $2p_x$ -орбиталей атомов образуются  $\sigma_{2px}$ - и

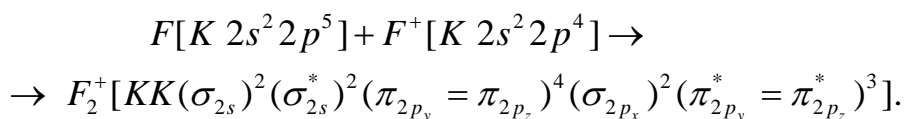
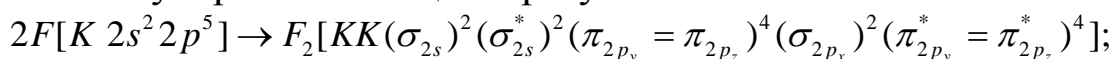


$\sigma_{2px}^*$ -орбитали. Энергия этих орбиталей больше, чем энергия  $\pi$ -орбиталей, связывающих и разрыхляющих. Заполнение молекулярных орбиталей подчиняется принципу наименьшей энергии, принципу Паули и правилу Хунда (см. диаграмму).



Заполнение электронами молекулярных орбиталей в частицах происходит согласно приводимой энергетической диаграмме.

Молекулярные частицы образуются по схемам:



Молекула  $F_2$  – диамагнитна, так как все электроны парные. Молекулярный ион  $F_2^+$  является парамагнитным. Он имеет один неспаренный электрон. Порядок связей соответственно составляет  $(8 - 6)/2 = 1$  (для  $F_2$ ) и  $(8 - 5)/2 = 1,5$  (для  $F_2^+$ ). Энергия связи в молекулярном ионе  $F_2^+$  больше, чем в молекуле  $F_2$ .





### ***В. Индивидуальные задания***

**3.1.** А. Напишите электронные формулы атомов представленных элементов. Б. Укажите их валентные электроны.

|           |                                   |
|-----------|-----------------------------------|
| <b>01</b> | <u>кальций</u> , кадмий, таллий   |
| <b>02</b> | калий, серебро, <u>свинец</u>     |
| <b>03</b> | магний, железо, <u>висмут</u>     |
| <b>04</b> | рубидий, кобальт, <u>полоний</u>  |
| <b>05</b> | <u>стронций</u> , никель, астат   |
| <b>06</b> | натрий, медь, <u>индий</u>        |
| <b>07</b> | цезий, цинк, <u>олово</u>         |
| <b>08</b> | алюминий, скандий, <u>йод</u>     |
| <b>09</b> | <u>кремний</u> , титан, криптон   |
| <b>10</b> | бор, ванадий, <u>сурьма</u>       |
| <b>11</b> | <u>кальций</u> , серебро, фосфор  |
| <b>12</b> | барий, кадмий, <u>селен</u>       |
| <b>13</b> | рубидий, лантан, <u>мышьяк</u>    |
| <b>14</b> | <u>галлий</u> , цирконий, сурьма  |
| <b>15</b> | скандий, золото, <u>теллур</u>    |
| <b>16</b> | цезий, актиний, <u>индий</u>      |
| <b>17</b> | <u>кальций</u> , цирконий, висмут |
| <b>18</b> | натрий, гафний, <u>полоний</u>    |
| <b>19</b> | <u>индий</u> , технеций, цинк     |
| <b>20</b> | <u>таллий</u> , вольфрам, бром    |
| <b>21</b> | рубидий, актиний, <u>астат</u>    |
| <b>22</b> | франций, осмий, <u>сурьма</u>     |
| <b>23</b> | <u>барий</u> , никель, радон      |
| <b>24</b> | калий, серебро, <u>хлор</u>       |

**3.2.** А. Определите, к каким электронным семействам принадлежат элементы из задания 3.1. Б. Для атома подчеркнутого элемента приведите электронно-графические формулы валентных орбиталей в основном и в возможных возбужденных состояниях атома.



**3.3.** А. По представленным конфигурациям валентных электронов атомов элементов определите положение элементов в периодической системе, указав период, группу и подгруппу. Б. Составьте полные электронные формулы атомов данных элементов. В. Для подчеркнутой конфигурации определите число неспаренных электронов атома в основном состоянии.

|           |                                 |                              |                              |
|-----------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>01</b> | $7s^2$                          | $6s^26p^5$                   | <u><math>5s^24d^2</math></u> |
| <b>02</b> | <u><math>3s^23p^6</math></u>    | $5s^24d^5$                   | $6s^1$                       |
| <b>03</b> | $5s^14d^{10}$                   | $7s^1$                       | <u><math>3s^23p^3</math></u> |
| <b>04</b> | $6s^2$                          | <u><math>5s^25p^2</math></u> | $4s^23d^8$                   |
| <b>05</b> | $5s^25p^6$                      | <u><math>6s^25d^4</math></u> | $4s^2$                       |
| <b>06</b> | $6s^15d^{10}$                   | $4s^1$                       | <u><math>6s^26p^4</math></u> |
| <b>07</b> | $7s^2$                          | $5s^24d^{10}$                | <u><math>6s^25d^6</math></u> |
| <b>08</b> | <u><math>6s^26p^4</math></u>    | $4s^23d^3$                   | $5s^2$                       |
| <b>09</b> | <u><math>4s^23d^8</math></u>    | $5s^1$                       | $6s^26p^3$                   |
| <b>10</b> | $6s^2$                          | <u><math>5s^25p^5</math></u> | $4s^13d^{10}$                |
| <b>11</b> | $5s^25p^2$                      | <u><math>4s^23d^8</math></u> | $7s^2$                       |
| <b>12</b> | $5s^24d^{10}$                   | $6s^1$                       | <u><math>4s^24p^4</math></u> |
| <b>13</b> | $4s^2$                          | $6s^26p^4$                   | <u><math>5s^24d^5</math></u> |
| <b>14</b> | <u><math>4s^24p^4</math></u>    | $6s^15d^{10}$                | $5s^2$                       |
| <b>15</b> | <u><math>6s^25d^6</math></u>    | $4s^1$                       | $3s^23p^1$                   |
| <b>16</b> | $7s^2$                          | $4s^24p^1$                   | <u><math>6s^25d^2</math></u> |
| <b>17</b> | <u><math>4s^24p^2</math></u>    | $7s^26d^4$                   | $3s^2$                       |
| <b>18</b> | $5s^14d^{10}$                   | $4s^2$                       | <u><math>3s^23p^3</math></u> |
| <b>19</b> | $2s^2$                          | $5s^25p^1$                   | <u><math>4s^23d^7</math></u> |
| <b>20</b> | $5s^24d^1$                      | <u><math>6s^26p^5</math></u> | $3s^1$                       |
| <b>21</b> | $4s^24p^6$                      | <u><math>5s^2</math></u>     | $7s^26d^5$                   |
| <b>22</b> | $6s^1$                          | $5s^25p^2$                   | <u><math>4s^23d^3</math></u> |
| <b>23</b> | <u><math>6s^26p^4</math></u>    | $5s^24d^5$                   | $4s^1$                       |
| <b>24</b> | <u><math>5s^14d^{10}</math></u> | $7s^2$                       | $5s^25p^5$                   |

**3.4.** Определите, какой из трех представленных элементов обладает: 1) наибольшим значением атомного радиуса; 2) наибольшим значением энергии ионизации атома;



- 3) наименьшим значением энергии сродства к электрону,  
 4) наименьшей относительной электроотрицательностью.

Объясните свой ответ.

|    |                            |
|----|----------------------------|
| 01 | калий, рубидий, цезий      |
| 02 | кремний, сера, хлор        |
| 03 | хлор, бром, йод            |
| 04 | алюминий, кремний, сера,   |
| 05 | сера, селен, теллур        |
| 06 | олово, теллур, йод         |
| 07 | кремний, германий, олово   |
| 08 | германий, селен, бром      |
| 09 | углерод, кремний, германий |
| 10 | бор, кислород, фтор        |
| 11 | магний, кальций, стронций  |
| 12 | индий, олово, теллур       |
| 13 | кислород, сера, селен      |
| 14 | бор, углерод, кислород     |
| 15 | стронций, барий, радий     |
| 16 | свинец, полоний, аstat     |
| 17 | индий, олово, йод          |
| 18 | галлий, германий, селен    |
| 19 | алюминий, галлий, индий    |
| 20 | бериллий, магний, кальций  |
| 21 | селен, теллур, полоний     |
| 22 | рубидий, цезий, франций    |
| 23 | натрий, кремний, хлор      |
| 24 | бериллий, кальций, барий   |

**3.5.** На основе метода валентных связей определите для каждой из указанных частиц: а) число  $\sigma$ - и  $\pi$ - связей, б) тип гибридизации валентных орбиталей центрального атома, в) геометрическую форму частицы.

|    |   |
|----|---|
| 01 | $\text{CCl}_4, \text{SO}_3, \text{NH}_4^+$    |
| 02 | $\text{BCl}_3, \text{SF}_6, \text{CO}_3^{2-}$ |



|           |   |
|-----------|---|
| <b>03</b> | $\text{CO}_2, \text{PCl}_5, \text{PO}_4^{3-}$                 |
| <b>04</b> | $\text{BeI}_2, \text{AlCl}_3, \text{BH}_4^-$                  |
| <b>05</b> | $\text{NH}_3, \text{CO}_2, \text{ClO}_4^-$                    |
| <b>06</b> | $\text{MgCl}_2, \text{COF}_2, \text{AsO}_4^{3-}$              |
| <b>07</b> | $\text{SeO}_3, \text{SO}_2\text{Cl}_2, \text{SO}_4^{2-}$      |
| <b>08</b> | $\text{SiH}_4, \text{C}_2\text{H}_2, \text{IO}_6^{5-}$        |
| <b>09</b> | $\text{BeH}_2, \text{C}_2\text{H}_4, \text{TeO}_6^{6-}$       |
| <b>10</b> | $\text{SO}_2, \text{BF}_3, \text{NH}_4^+$                     |
| <b>11</b> | $\text{H}_2\text{O}, \text{C}_2\text{H}_6, \text{SiO}_3^{2-}$ |
| <b>12</b> | $\text{BF}_3, \text{CF}_4, \text{ClO}_4^-$                    |
| <b>13</b> | $\text{CS}_2, \text{CH}_4, \text{BF}_4^-$                     |
| <b>14</b> | $\text{CHCl}_3, \text{SiO}_2, \text{AsO}_4^{3-}$              |
| <b>15</b> | $\text{COCl}_2, \text{SO}_2\text{F}_2, \text{BO}_2^-$         |
| <b>16</b> | $\text{CH}_3\text{Cl}, \text{AlI}_3, \text{PO}_4^{3-}$        |
| <b>17</b> | $\text{COS}, \text{NH}_3, \text{IO}_6^{5-}$                   |
| <b>18</b> | $\text{CSCl}_2, \text{POF}_3, \text{TeO}_6^{6-}$              |
| <b>19</b> | $\text{BH}_3, \text{C}_2\text{H}_2, \text{ClO}_4^-$           |
| <b>20</b> | $\text{BeCl}_2, \text{BF}_3, \text{SO}_4^{2-}$                |
| <b>21</b> | $\text{PCl}_5, \text{SF}_6, \text{BO}_2^-$                    |
| <b>22</b> | $\text{CH}_2\text{Cl}_2, \text{SeF}_6, \text{BF}_4^-$         |
| <b>23</b> | $\text{SO}_3, \text{CO}_2, \text{CO}_3^{2-}$                  |
| <b>24</b> | $\text{PCl}_5, \text{C}_2\text{H}_4, \text{TeO}_6^{6-}$       |

**3.6.** А. Определите пространственное строение указанных частиц при помощи метода Гиллеспи. Б. Объясните, у каких частиц электрический момент диполя будет отличен от нуля.

|           |   |
|-----------|---|
| <b>01</b> | $\text{CH}_2\text{Cl}_2, \text{SO}_3, \text{SO}_2$      |
| <b>02</b> | $\text{BCl}_3, \text{CO}_2, \text{NH}_3$                |
| <b>03</b> | $\text{COCl}_2, \text{PCl}_5, \text{SnCl}_2$            |
| <b>04</b> | $\text{CH}_4, \text{SO}_2\text{F}_2, \text{PH}_3$       |
| <b>05</b> | $\text{CH}_3\text{Cl}, \text{SF}_6, \text{H}_2\text{O}$ |
| <b>06</b> | $\text{MgCl}_2, \text{CSCl}_2, \text{NF}_3$             |
| <b>07</b> | $\text{SiHCl}_3, \text{POF}_3, \text{SF}_4$             |
| <b>08</b> | $\text{COS}, \text{SeO}_3, \text{ClF}_3$                |
| <b>09</b> | $\text{CCl}_4, \text{CS}_2, \text{XeF}_2$               |



|           |  |
|-----------|--|
| <b>10</b> | SO <sub>3</sub> , SeO <sub>2</sub> , ICl <sub>5</sub>                |
| <b>11</b> | SiO <sub>2</sub> , PCl <sub>5</sub> , XeF <sub>4</sub>               |
| <b>12</b> | SiF <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , TeO <sub>2</sub>                |
| <b>13</b> | BF <sub>3</sub> , PCl <sub>5</sub> , SeCl <sub>2</sub>               |
| <b>14</b> | SiO <sub>2</sub> , CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> |
| <b>15</b> | COF <sub>2</sub> , PH <sub>3</sub> , SeO <sub>2</sub>                |
| <b>16</b> | AlI <sub>3</sub> , CF <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub>                 |
| <b>17</b> | SF <sub>6</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O                 |
| <b>18</b> | SeO <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>                 |
| <b>19</b> | HCN, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , NF <sub>3</sub> ,               |
| <b>20</b> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , SeO <sub>3</sub> , SnCl <sub>2</sub> |
| <b>21</b> | CSCl <sub>2</sub> , SnCl <sub>4</sub> , AsH <sub>3</sub>             |
| <b>22</b> | C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> , CS <sub>2</sub> , NF <sub>3</sub>   |
| <b>23</b> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , SiH <sub>4</sub> , ClF <sub>3</sub>  |
| <b>24</b> | IF <sub>6</sub> , COS, BrF <sub>5</sub>                              |

**3.7.** Используя положения метода молекулярных орбиталей, для каждой из двух указанных частиц:

а) составьте энергетическую диаграмму образования молекулярных орбиталей; б) напишите формулу электронной конфигурации; в) определите наличие или отсутствие магнитных свойств; г) рассчитайте порядок связи.

Сделайте вывод о том, какая из двух частиц более устойчива.

|           |   |           |  |
|-----------|---|-----------|--|
| <b>01</b> | Li <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> <sup>-</sup>             | <b>13</b> | H <sub>2</sub> , CN <sup>+</sup>                           |
| <b>02</b> | O <sub>2</sub> , NO <sup>+</sup>                          | <b>14</b> | Be <sub>2</sub> <sup>+</sup> , NO                          |
| <b>03</b> | N <sub>2</sub> , F <sub>2</sub> <sup>+</sup>              | <b>15</b> | N <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CO <sup>-</sup>              |
| <b>04</b> | O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , NO                          | <b>16</b> | O <sub>2</sub> <sup>-</sup> , He <sub>2</sub> <sup>+</sup> |
| <b>05</b> | CO, F <sub>2</sub>  | <b>17</b> | Li <sub>2</sub> , CO                                       |
| <b>06</b> | NO <sup>-</sup> , B <sub>2</sub>                          | <b>18</b> | N <sub>2</sub> , F <sub>2</sub> <sup>+</sup>               |
| <b>07</b> | CN <sup>-</sup> , F <sub>2</sub> <sup>-</sup>             | <b>19</b> | N <sub>2</sub> <sup>+</sup> , NO <sup>-</sup>              |
| <b>08</b> | NO <sup>+</sup> , Ne <sub>2</sub> <sup>+</sup>            | <b>20</b> | CN <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup>              |
| <b>09</b> | F <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>                           | <b>21</b> | O <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> <sup>+</sup>              |
| <b>10</b> | CN <sup>-</sup> , CO <sup>+</sup>                         | <b>22</b> | H <sub>2</sub> , F <sub>2</sub> <sup>-</sup>               |
| <b>11</b> | NO, O <sub>2</sub> <sup>-</sup>                           | <b>23</b> | CO, NO   |
| <b>12</b> | O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> <sup>+</sup> | <b>24</b> | B <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CN <sup>-</sup>              |





## 4. ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

### *А. Теоретическая часть*

Под тепловым эффектом химической реакции принято понимать количество теплоты, выделяемое или поглощаемое в результате превращения исходных веществ в продукты в количествах, соответствующих уравнению химической реакции [3, 4]. Теплота реакции в изобарно-изотермическом процессе равна изменению энтальпии системы  $\Delta H$ .

Реакции, протекающие с выделением теплоты в окружающую среду ( $\Delta H < 0$ ), называют **экзотермическими**, а с поглощением теплоты ( $\Delta H > 0$ ) – **эндотермическими**. Для того чтобы тепловые эффекты химических реакций были сравнимыми, их относят к **стандартным условиям**:

$P = 101325 \text{ Па}$ ,  $T = \text{const}$  (298,15 К),  $n(x) = 1 \text{ моль}$ .

Такой тепловой эффект называется **стандартным**, обозначается  $\Delta H_{298}^0$  и выражается в кДж/моль.

Для различных расчетов пользуются термохимическими уравнениями реакций. В них указываются: 1) абсолютная величина и знак теплового эффекта; 2) агрегатные состояния веществ; 3) допускаются дробные коэффициенты.

**Стандартный тепловой эффект химической реакции равен разности между суммой стандартных энтальпий образования продуктов реакции и суммой стандартных энтальпий образования исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов** (первое следствие из закона Гесса).

**Стандартной энтальпией образования химического соединения** называют тепловой эффект реакции образования 1 моль вещества из соответствующих простых веществ, устойчивых при стандартных условиях, и обозначают  $\Delta H_{f, 298}^0$  (вещества).

Стандартные энтальпии образования простых веществ, устойчивых при  $P = 101325 \text{ Па}$  и  $T = 298,15 \text{ К}$  (например,



графит, ромбическая сера, белый фосфор, кристаллический йод и т. д.), **приняты равными нулю.**

Любая система, в том числе и химическая, стремится самопроизвольно перейти в наиболее вероятное состояние при данных условиях. Многочисленные опытные данные показывают, что наиболее вероятным является такое состояние, когда частицы, составляющие систему, расположены в пространстве наиболее беспорядочно. Для описания подобных процессов вводят функцию состояния системы, называемую **энтропией**, и обозначают  $S$ .

**Энтропия системы является мерой неупорядоченности ее состояния на молекулярном уровне.**

Она выражается в Дж/моль·К.

Значениями  $S_{298}^0$  веществ пользуются для определения изменения энтропии в химической реакции при стандартных условиях  $\Delta S_{298}^0$ . Поскольку энтропия является функцией состояния системы, ее изменение равно:

$$\Delta S_{298}^0 = \sum i S_{298}^0 (\text{прод}) - \sum j S_{298}^0 (\text{исх}),$$

где  $i$  и  $j$  – стехиометрические коэффициенты в уравнении химической реакции.

Устойчивость системы определяется одновременно двумя факторами: **энтальпийным** и **энтропийным**. Для учета этих факторов в закрытых системах (при  $T = \text{const}$  и  $P = \text{const}$ ) Гиббсом была введена термодинамическая функция  $G = H - TS$ , названная **энергией Гиббса**. Ее изменение в ходе процесса определяется уравнением:  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ ,

а в стандартных условиях:  $\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - 298 \cdot \Delta S_{298}^0$ .

Из этого уравнения следует, что **вероятность протекания процесса возрастает по мере того, как значение  $\Delta H$  становится более отрицательным, а  $\Delta S$  – более положительным.** Следовательно, по характеру изменения энергии Гиббса можно судить о возможности самопроизвольного протекания процессов в указанных условиях, в том числе и химических реакций.



**Если  $\Delta G < 0$ , то прямая реакция самопроизвольно протекать может.**

**Если  $\Delta G = 0$ , система находится в равновесии, т. е. скорость прямой реакции равна скорости обратной.**

**Если  $\Delta G > 0$  – прямая реакция самопроизвольно протекать не может.**

Кроме приведенной выше формулы, для расчета  $\Delta G_{298}^0$  химических реакций используются стандартные энергии Гиббса образования исходных веществ и продуктов реакции,  $\Delta G_{f, 298}^0$ .

**Стандартной энергией Гиббса образования химического соединения** называют изменение энергии Гиббса реакции образования 1 моль вещества из простых веществ, устойчивых при стандартных условиях. Для простых веществ, устойчивых при  $P = 101325$  Па и  $T = 298$  К, стандартные энергии Гиббса образования принимаются равными нулю.

Поскольку энергия Гиббса является функцией состояния системы, ее изменение для химической реакции в стандартных условиях можно рассчитать по формуле:

$$\Delta G_{298}^0 = \sum i \Delta G_{f, 298}^0 (\text{прод}) - \sum j \Delta G_{f, 298}^0 (\text{исх}),$$

где  $i$  и  $j$  – стехиометрические коэффициенты в уравнении химической реакции.

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Для реакции, протекающей в газовой фазе,  $\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 = 4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$  рассчитайте:

***Решение:***

1. Тепловой эффект  $\Delta H_{298}^0$ .

Согласно первому следствию из закона Гесса,

$$\Delta H_{298}^0 = 4\Delta H_{f, 298}^0(\text{CO}) + 2\Delta H_{f, 298}^0(\text{H}_2\text{O}) - \Delta H_{f, 298}^0(\text{CH}_4) - 3\Delta H_{f, 298}^0(\text{CO}_2);$$

$$\Delta H_{298}^0 = 4(-110,53) + 2(-241,81) - (-74,85) - 3(-393,51) = 329,64 \text{ кДж}.$$



$\Delta H^{\circ}_{298} > 0$ , следовательно, прямая реакция протекает с поглощением тепла (эндотермическая), а обратная реакция – с выделением тепла (экзотермическая).

2. Изменение энтропии  $\Delta S^{\circ}_{298}$ .

$$\Delta S^{\circ}_{298} = 4S^{\circ}_{298}(\text{CO}) + 2S^{\circ}_{298}(\text{H}_2\text{O}) - S^{\circ}_{298}(\text{CH}_4) - 3S^{\circ}_{298}(\text{CO}_2);$$

$$\Delta S^{\circ}_{298} = 4 \cdot 197,55 + 2 \cdot 188,72 - 186,27 - 3 \cdot 213,66 = 340,39 \text{ Дж/К}.$$

Возрастание энтропии в ходе прямой реакции связано с увеличением числа частиц в газообразном состоянии в продуктах реакции ( $\Delta n = 6 - 4 = 2$  моль).

3. Изменение энергии Гиббса  $\Delta G^{\circ}_{298}$ .

Рассчитать можно двумя способами:

а) по уравнению:  $\Delta G^{\circ}_{298} = \Delta H^{\circ}_{298} - 298 \cdot \Delta S^{\circ}_{298}$ ,

$$\Delta G^{\circ}_{298} = 329,64 - 298 \cdot 340,39 \cdot 10^{-3} = 228,20 \text{ кДж};$$

б) используя стандартные энергии Гиббса образования веществ:

$$\Delta G^{\circ}_{298} = 4\Delta G^{\circ}_{f, 298}(\text{CO}) + 2\Delta G^{\circ}_{f, 298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta G^{\circ}_{f, 298}(\text{CH}_4) - 3\Delta G^{\circ}_{f, 298}(\text{CO}_2);$$

$$\Delta G^{\circ}_{298} = 4 \cdot (-137,18) + 2 \cdot (228,61) - (-50,85) - 3 \cdot (-394,37) = 228,14 \text{ кДж}.$$

4. Определите направление процесса при стандартных условиях.

При  $P = \text{const}$  и  $T = \text{const}$  самопроизвольно протекают только те процессы, которые сопровождаются уменьшением энергии Гиббса ( $\Delta G_{p,T} < 0$ ).

При протекании прямой реакции энергия Гиббса возрастает ( $\Delta G^{\circ}_{298} > 0$ ), а обратной – убывает ( $\Delta G^{\circ}_{298} < 0$ ). Следовательно, при стандартных условиях реакция идет в сторону образования  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ .

## ***В. Индивидуальные задания***

**4.1.** А. На основе справочных величин стандартных энтальпий образования ( $\Delta H^{\circ}_{f, 298}(\text{X})$ ) соответствующих веществ и первого следствия из закона Гесса рассчитайте тепловой эффект реакции при стандартных условиях. Б. Определите, эндо- или экзотермической является данная реакция.



|    |   |
|----|---|
| 01 | $3\text{CuO}_{(\text{кр})} + 2\text{Fe}_{(\text{кр})} = 3\text{Cu}_{(\text{кр})} + \text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})}$            |
| 02 | $2\text{CuO}_{(\text{кр})} + \text{C}_{(\text{графит})} = 2\text{Cu}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$                     |
| 03 | $\text{C}_{(\text{графит})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} = \text{CO}_{(\text{г})} + \text{H}_{2(\text{г})}$                  |
| 04 | $\text{C}_{(\text{графит})} + \text{CO}_{2(\text{г})} = 2\text{CO}_{(\text{г})}$  |
| 05 | $\text{CO}_{(\text{г})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} = \text{CO}_{2(\text{г})} + \text{H}_{2(\text{г})}$                     |
| 06 | $2\text{CO}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{CO}_{2(\text{г})}$   |
| 07 | $\text{CuO}_{(\text{кр})} + \text{H}_{2(\text{г})} = \text{Cu}_{(\text{кр})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$                   |
| 08 | $\text{FeO}_{(\text{кр})} + \text{H}_{2(\text{г})} = \text{Fe}_{(\text{кр})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$                   |
| 09 | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{H}_{2(\text{г})} = 2\text{Fe}_{(\text{кр})} + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$      |
| 10 | $\text{CuO}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{(\text{г})} = \text{CO}_{2(\text{г})} + \text{Cu}_{(\text{кр})}$                           |
| 11 | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{CO}_{(\text{г})} = 2\text{Fe}_{(\text{кр})} + 3\text{CO}_{2(\text{г})}$              |
| 12 | $\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{кр})} + 4\text{H}_{2(\text{г})} = 3\text{Fe}_{(\text{кр})} + 4\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$      |
| 13 | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{H}_{2(\text{г})} = 2\text{Fe}_{(\text{кр})} + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$      |
| 14 | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 2\text{Al}_{(\text{кр})} = 2\text{Fe}_{(\text{кр})} + \text{Al}_2\text{O}_{3(\text{кр})}$   |
| 15 | $3\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{кр})} + 8\text{Al}_{(\text{кр})} = 9\text{Fe}_{(\text{кр})} + 4\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{кр})}$ |
| 16 | $3\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + \text{CO}_{(\text{г})} = 2\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{кр})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$    |
| 17 | $\text{FeO}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{(\text{г})} = \text{Fe}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$                           |
| 18 | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{CO}_{(\text{г})} = 2\text{Fe}_{(\text{кр})} + 3\text{CO}_{2(\text{г})}$              |
| 19 | $4\text{NH}_{3(\text{г})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{N}_{2(\text{г})} + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$                 |
| 20 | $3\text{Fe}_{(\text{кр})} + 4\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} = \text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{кр})} + 4\text{H}_{2(\text{г})}$      |
| 21 | $\text{SiH}_{4(\text{г})} + 2\text{O}_{2(\text{г})} = \text{SiO}_{2(\text{кр})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$               |
| 22 | $4\text{HCl}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{Cl}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$                 |
| 23 | $2\text{Fe}_{(\text{кр})} + 3\text{CO}_{2(\text{г})} = \text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{CO}_{(\text{г})}$              |
| 24 | $\text{Na}_2\text{CO}_{3(\text{кр})} + 2\text{C}_{(\text{графит})} = 2\text{Na}_{(\text{кр})} + 3\text{CO}_{(\text{г})}$          |

**4.2.** А. Используя справочные значения стандартных энергий Гиббса образования соответствующих веществ ( $\Delta G_{\text{f}, 298}^0(\text{X})$ ), рассчитайте  $\Delta G_{298}^0$  указанной реакции. Б. Сделайте вывод о возможности самопроизвольного протекания этой реакции при стандартных условиях.

|    |   |
|----|---|
| 01 | $6\text{HCl}_{(\text{г})} + \text{O}_{3(\text{г})} = 3\text{Cl}_{2(\text{г})} + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$ |
| 02 | $\text{CH}_{4(\text{г})} + 2\text{O}_{2(\text{г})} = \text{CO}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$  |
| 03 | $\text{CH}_{4(\text{г})} + 3\text{CO}_{2(\text{г})} = 4\text{CO}_{(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ |
| 04 | $2\text{SO}_{3(\text{г})} = 2\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})}$                                    |



|           |  |
|-----------|--|
| <b>05</b> | $2\text{CuO}_{(\text{кр})} = \text{O}_{2(\text{г})} + 2\text{Cu}_{(\text{кр})}$  |
| <b>06</b> | $\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{C}_{(\text{графит})} = 2\text{Al}_{(\text{к})} + 3\text{CO}_{(\text{г})}$                 |
| <b>07</b> | $3\text{NO}_{(\text{г})} = \text{N}_2\text{O}_{(\text{г})} + \text{NO}_{2(\text{г})}$  |
| <b>08</b> | $3\text{H}_{2(\text{г})} + \text{N}_{2(\text{г})} = 2\text{NH}_{3(\text{г})}$  |
| <b>09</b> | $\text{CaCO}_{3(\text{кр})} = \text{CaO}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$  |
| <b>10</b> | $\text{CaO}_{(\text{кр})} + \text{C}_{(\text{графит})} = \text{Ca}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{(\text{г})}$                             |
| <b>11</b> | $4\text{HCl}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{Cl}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$                      |
| <b>12</b> | $4\text{NO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{N}_2\text{O}_{5(\text{г})}$  |
| <b>13</b> | $\text{C}_{(\text{графит})} + \text{CO}_{2(\text{г})} = 2\text{CO}_{(\text{г})}$   |
| <b>14</b> | $4\text{NH}_{3(\text{г})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{N}_{2(\text{г})} + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$                      |
| <b>15</b> | $2\text{NO}_{(\text{г})} + \text{Cl}_{2(\text{г})} = 2\text{NOCl}_{(\text{г})}$  |
| <b>16</b> | $2\text{Na}_2\text{O}_{(\text{кр})} + 2\text{Cl}_{2(\text{г})} = 4\text{NaCl}_{(\text{кр})} + \text{O}_{2(\text{г})}$                  |
| <b>17</b> | $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = \text{Cr}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + \text{N}_{2(\text{г})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ |
| <b>18</b> | $2\text{HF}_{(\text{г})} + \text{O}_{3(\text{г})} = \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})} + \text{F}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})}$ |
| <b>19</b> | $\text{SiH}_{4(\text{г})} + 2\text{O}_{2(\text{г})} = \text{SiO}_{2(\text{кр})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$                    |
| <b>20</b> | $\text{CO}_{(\text{г})} + \text{Cl}_{2(\text{г})} = \text{COCl}_{2(\text{г})}$   |
| <b>21</b> | $\text{PCl}_{3(\text{г})} + \text{Cl}_{2(\text{г})} = \text{PCl}_{5(\text{г})}$  |
| <b>22</b> | $2\text{KClO}_{3(\text{кр})} = 2\text{KCl}_{(\text{кр})} + 3\text{O}_{2(\text{г})}$  |
| <b>23</b> | $\text{CaO}_{(\text{кр})} + \text{C}_{(\text{графит})} = \text{Ca}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{(\text{г})}$                             |
| <b>24</b> | $\text{C}_{(\text{графит})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} = \text{CO}_{(\text{г})} + \text{H}_{2(\text{г})}$                       |

**4.3.** А. Предскажите знак изменения энтропии ( $\Delta S^0 > 0$ ,  $\Delta S^0 < 0$ ) в реакции из задания 4.2 при стандартных условиях. Б. Проверьте свое предположение расчетом  $\Delta S^0_{298}$ , используя справочные значения абсолютных стандартных энтропий соответствующих веществ ( $S^0_{298}(\text{X})$ ).

**4.4.** На основе справочных значений стандартных энтальпий образования ( $\Delta H^0_{\text{f}, 298}(\text{X})$ ) и абсолютных стандартных энтропий ( $S^0_{298}(\text{X})$ ) соответствующих веществ рассчитайте: а)  $\Delta G^0_{298}$  реакции из задания 4.2; б) сравните полученный результат с результатом расчета в задании 4.2.

**4.5.** Используя справочные значения  $\Delta H^0_{\text{f}, 298}(\text{X})$  соответствующих компонентов указанной реакции, рассчитайте её тепловой эффект, учитывая, что реакция протекает в водном растворе.





|           |   |
|-----------|---|
| <b>01</b> | $\text{AgNO}_3 + \text{NaCl} = \text{AgCl}_{(\text{кр})} + \text{NaNO}_3$                           |
| <b>02</b> | $\text{BaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{BaSO}_{4(\text{кр})} + 2\text{NaCl}$                |
| <b>03</b> | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{CaCO}_{3(\text{кр})} + 2\text{NaNO}_3$   |
| <b>04</b> | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{CaSO}_{4(\text{кр})} + 2\text{NaNO}_3$   |
| <b>05</b> | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{NaCl} = \text{PbCl}_{2(\text{кр})} + 2\text{NaNO}_3$             |
| <b>06</b> | $\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} = \text{CuS}_{(\text{кр})} + \text{Na}_2\text{SO}_4$           |
| <b>07</b> | $\text{ZnCl}_2 + \text{Na}_2\text{S} = \text{ZnS}_{(\text{кр})} + 2\text{NaCl}$                     |
| <b>08</b> | $2\text{AgNO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{Ag}_2\text{SO}_{4(\text{кр})} + 2\text{NaNO}_3$    |
| <b>09</b> | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 = \text{BaSO}_{4(\text{кр})} + 2\text{KNO}_3$     |
| <b>10</b> | $\text{NiCl}_2 + \text{Na}_2\text{S} = \text{NiS}_{(\text{кр})} + 2\text{NaCl}$                     |
| <b>11</b> | $\text{NiCl}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Ni}(\text{OH})_{2(\text{кр})} + 2\text{NaCl}$                 |
| <b>12</b> | $\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} = \text{CuS}_{(\text{кр})} + \text{Na}_2\text{SO}_4$           |
| <b>13</b> | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{PbSO}_{4(\text{кр})} + 2\text{NaNO}_3$   |
| <b>14</b> | $\text{SrCl}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 = \text{SrCO}_{3(\text{кр})} + 2\text{KCl}$                  |
| <b>15</b> | $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{KOH} = \text{K}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$    |
| <b>16</b> | $\text{HCl} + \text{KOH} = \text{KCl} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$                            |
| <b>17</b> | $\text{AgNO}_3 + \text{KBr} = \text{AgBr}_{(\text{кр})} + \text{KNO}_3$                             |
| <b>18</b> | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{KCl} = \text{PbCl}_{2(\text{кр})} + 2\text{KNO}_3$               |
| <b>19</b> | $\text{ZnCl}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 = \text{ZnCO}_{3(\text{кр})} + 2\text{KCl}$                  |
| <b>20</b> | $3\text{CaCl}_2 + 2\text{Na}_3\text{PO}_4 = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_{2(\text{кр})} + 6\text{NaCl}$ |
| <b>21</b> | $\text{AlCl}_3 + 3\text{NaOH} = \text{Al}(\text{OH})_{3(\text{кр})} + 3\text{NaCl}$                 |
| <b>22</b> | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + \text{Na}_2\text{S} = \text{PbS}_{(\text{кр})} + 2\text{NaNO}_3$        |
| <b>23</b> | $\text{NiSO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{S} = \text{NiS}_{(\text{кр})} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$   |
| <b>24</b> | $\text{BaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{BaCO}_{3(\text{кр})} + 2\text{NaCl}$                |



## 5. СКОРОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ. ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

### *А. Теоретическая часть*

Для гомогенных реакций (исходные вещества и продукты реакции образуют одну фазу), протекающих при постоянном объеме, **под скоростью химической реакции понимают количество актов элементарного химического взаимодействия в единице объема реакционного пространства в единицу времени** [4]. Элементарным химическим актом называется единичный акт взаимодействия или превращения частиц, в результате которого образуются новые частицы продуктов реакции или промежуточных соединений.

**Количественно скорость гомогенной реакции** (при  $V = \text{const}$ ) выражается изменением концентрации реагирующих веществ в единицу времени. Обычно концентрации выражаются в моль/дм<sup>3</sup>, а время в секундах, отсюда скорость химической реакции имеет размерность моль/дм<sup>3</sup>·с. Так как концентрации реагирующих веществ непрерывно изменяются, то для точного определения скорости следует пользоваться понятием мгновенной скорости реакции  $r_t$ , т. е. скорости в

данный момент времени: 
$$r_t = \pm \frac{dC(X)}{d\tau},$$

где  $C(X)$  – молярная концентрация любого из исходных веществ или продуктов реакции.

Поскольку для исходных веществ  $dC(X) < 0$ , перед формулой берется знак минус, а для продуктов реакции – знак плюс,  $dC(X) > 0$ .

В некоторых случаях может использоваться понятие средней скорости: 
$$r_{\text{cp}} = \pm \frac{C_2(X) - C_1(X)}{\tau_2 - \tau_1},$$

где  $C_1(X)$  – молярная концентрация одного из реагирующих веществ в некоторый момент времени  $\tau_1$ ;

$C_2(X)$  – молярная концентрация одного из реагирующих веществ в момент времени  $\tau_2$ .



На скорость рассматриваемых гомогенных реакций, как правило, влияют концентрации реагентов, температура и действие катализаторов.

Зависимость скорости реакции от концентрации реагентов (при постоянной температуре) описывается **кинетическим уравнением реакции**, устанавливаемым опытным путем (физическими и физико-химическими методами).

Например, для реакции  $aA + bB = cC + dD$  кинетическое уравнение, найденное экспериментально, имеет вид:

$$r = k \cdot C^{n_1}(A) \cdot C^{n_2}(B),$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности – **константа скорости реакции**;

$n_1$  и  $n_2$  – показатели степеней (не равные, как правило, стехиометрическим коэффициентам, кроме простых реакций).

Из данного уравнения вытекает, что при  $C(A) = C(B) = 1$  моль/дм<sup>3</sup> скорость реакции численно равна константе скорости. Поэтому **константу скорости** иногда называют **удельной скоростью**. Ее величина не зависит от концентрации реагирующих веществ и времени, а определяется природой реакции, температурой и некоторыми другими факторами.

Важными кинетическими характеристиками химических реакций являются молекулярность и порядок.

**Молекулярность** реакции определяется числом активных частиц, участвующих в одном элементарном химическом акте. Молекулярность реакции всегда целое положительное число: один, два, реже три. Понятие молекулярности реакции относится к простым (элементарным) реакциям или к отдельным стадиям сложных реакций.

**Общий порядок реакции** называется сумма показателей степеней, с которыми концентрации реагентов входят в кинетическое уравнение. Так для рассматриваемого уравнения общий порядок реакции равен  $(n_1 + n_2)$ , где  $n_1$  и  $n_2$  – порядки реакций соответственно по веществам А и В.



В простых (элементарных) реакциях, протекающих в одну стадию, молекулярность совпадает с порядком реакции. Несовпадение этих характеристик говорит о том, что реакция протекает в несколько стадий, т. е. является сложной.

Скорость простых химических реакций и большинства сложных с повышением температуры возрастает.

Зависимость удельной скорости (константы скорости реакции) от температуры (при постоянных концентрациях реагирующих веществ) выражается **уравнением Аррениуса** [2]:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}},$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $A$  – коэффициент пропорциональности;  $e$  – основание натурального логарифма;  $T$  – абсолютная температура;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $E_a$  – энергия активации реагирующей частицы (избыток энергии, по сравнению со средней величиной, необходимый для осуществления элементарного акта химического взаимодействия).

**Катализ** – это процесс изменения скорости химической реакции при действии некоторых веществ – **катализаторов**. Катализаторами могут быть различные вещества, которые, образуя с реагентами промежуточные продукты, изменяют скорость реакции и выделяются в последующих стадиях количественно неизменными. Катализаторы способны увеличивать скорость реакции (**положительный катализ**) или уменьшать ее (**отрицательный катализ**). Последние обычно называют ингибиторами.

**Обратимость реакций** является одной из общих и принципиальных особенностей химических процессов. Строго говоря, **обратимыми, т. е. протекающими одновременно в прямом и обратном направлениях, являются любые химические реакции**. Однако для многих процессов обратная реакция может быть настолько медленной, что современными методами химического анализа ее трудно определить. Поэтому обратимостью реакций можно пренебречь. Эти реакции называют **практически необратимыми**. К ним условно



относятся те процессы, при которых исходные вещества остаются в количествах, меньших  $10^{-12}$ – $10^{-15}$  моль в  $\text{дм}^3$  (меньше  $10^{10}$  молекул). **Практически необратимыми считают обычно реакции, в результате которых один из образующихся продуктов выводится из сферы реакции (выпадает в виде осадка, выделяется в виде газа).**

О степени протекания процесса можно судить на основании **закона действующих масс**, которому подчиняется система в состоянии равновесия: отношение произведения равновесных концентраций продуктов к произведению равновесных концентраций исходных веществ, взятых в степенях, равных стехиометрическим коэффициентам, является величиной постоянной. Эту величину называют константой равновесия и обозначают  $K_C$ .

Для выражения состояния равновесия при взаимодействии между газообразными веществами часто вместо концентраций используют равновесные парциальные давления реагентов  $\bar{P}$ , при этом константа равновесия обозначается  $K_p$ . Для равновесной газовой системы:  $\text{H}_2(\text{г}) + \text{I}_2(\text{г}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{г})$ ,

$$K_p = \frac{\bar{P}^2(\text{HI})}{\bar{P}(\text{H}_2) \cdot \bar{P}(\text{I}_2)}.$$

Константа химического равновесия зависит от природы реагентов и температуры.

Влияние различных факторов на состояние химического равновесия качественно описывается принципом смещения равновесия Ле Шателье: **если изменить условия, при которых система находится в состоянии равновесия, то равновесие смещается в направлении, способствующем ослаблению этого воздействия.**

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Для реакции, протекающей в газовой фазе,  
 $\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 = 4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$  (реакция эндотермическая),  
напишите:



**Решение:**

1. Выражение константы равновесия  $K_c$ .

$$K_c = \frac{[\text{CO}]^4 [\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{CH}_4][\text{CO}_2]^3},$$

где  $[\text{CO}]$ ,  $[\text{H}_2\text{O}]$ ,  $[\text{CH}_4]$  и  $[\text{CO}_2]$  – равновесные концентрации веществ (моль/дм<sup>3</sup>).

2. Укажите, как нужно изменить:

а) концентрации веществ; б) давление; в) температуру, чтобы сместить равновесие в сторону продуктов реакции.

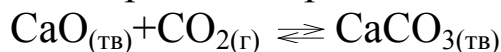
Согласно принципу Ле Шателье, для смещения равновесия в сторону продуктов реакции следует:

а) увеличить концентрации исходных веществ и уменьшить концентрации продуктов реакции;

б) понизить общее давление в системе (увеличив ее объем), так как прямая реакция протекает с образованием большего числа моль газообразных веществ ( $\Delta n > 0$ );

в) повысить температуру, так как прямая реакция эндотермическая ( $\Delta H_{298}^\circ > 0$ ).

**Пример 2.** Для гетерогенной реакции



напишите:

**Решение:**

1. Выражение константы равновесия  $K_c$ .

Для гетерогенных реакций с участием газообразных веществ константа равновесия  $K_c$  выражается через концентрации только газообразных реагентов:

$$K_c = \frac{1}{[\text{CO}_2]}.$$

2. Укажите, как сместится равновесие реакции:

а) при понижении температуры;

б) при повышении давления;

в) при изменении количества  $\text{CaCO}_3$  в системе.

В соответствии с принципом Ле Шателье:





а) при понижении температуры равновесие сместится в сторону экзотермической реакции ( $\Delta H_{298}^{\circ} < 0$ ).

Тепловой эффект данной реакции равен:

$$\Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{f, 298}^{\circ}(\text{CaCO}_3) - \Delta H_{f, 298}^{\circ}(\text{CaO}) - \Delta H_{f, 298}^{\circ}(\text{CO}_2);$$

$$\Delta H_{298}^{\circ} = -1206,83 + 635,09 + 393,51 = -178,23 \text{ кДж/моль.}$$

$\Delta H_{298}^{\circ} < 0$ , следовательно, при понижении температуры равновесие сместится вправо (прямая реакция);

б) при повышении давления (уменьшении объема системы) равновесие сместится вправо, в сторону образования меньшего числа моль газообразных веществ ( $\Delta n < 0$ ), образуется дополнительное количество  $\text{CaCO}_3$ ;

в) количество  $\text{CaCO}_3$  в системе не оказывает влияния на состояние химического равновесия.

### ***В. Индивидуальные задания***

**5.1.** Протекание элементарной обратимой химической реакции в гомогенной газовой системе описывается приведенным ниже уравнением.

Для прямой и обратной реакций: а) напишите кинетические уравнения; б) определите общий порядок и молекулярность; в) рассчитайте, как изменится скорость прямой и обратной реакций, если при достижении равновесия увеличить давление в системе в два раза.

|           |                                      |           |                                      |
|-----------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| <b>01</b> | $A + B \rightleftharpoons AB$        | <b>13</b> | $A_2 + 2B \rightleftharpoons A_2B_2$ |
| <b>02</b> | $A \rightleftharpoons C$             | <b>14</b> | $A + B_2 \rightleftharpoons AB_2$    |
| <b>03</b> | $2A \rightleftharpoons A_2$          | <b>15</b> | $B_2 \rightleftharpoons 2B$          |
| <b>04</b> | $A + 2B \rightleftharpoons AB_2$     | <b>16</b> | $A_2 + 2B_2 \rightleftharpoons 3C_2$ |
| <b>05</b> | $2A + B \rightleftharpoons A_2B$     | <b>17</b> | $B \rightleftharpoons D$             |
| <b>06</b> | $A_2 + B_2 \rightleftharpoons 2AB$   | <b>18</b> | $2A_2 + B_2 \rightleftharpoons 3D_2$ |
| <b>07</b> | $A_2 \rightleftharpoons 2A$          | <b>19</b> | $2A_3 \rightleftharpoons 3A_2$       |
| <b>08</b> | $2A + B_2 \rightleftharpoons A_2B_2$ | <b>20</b> | $B \rightleftharpoons C$             |
| <b>09</b> | $A_2 + B \rightleftharpoons A_2B$    | <b>21</b> | $2B \rightleftharpoons B_2$          |
| <b>10</b> | $2A_2 + B \rightleftharpoons 2C$     | <b>22</b> | $3A_2 \rightleftharpoons 2A_3$       |
| <b>11</b> | $A \rightleftharpoons D$             | <b>23</b> | $A + B \rightleftharpoons C$         |
| <b>12</b> | $A + B_2 \rightleftharpoons AB_2$    | <b>24</b> | $A_2 + 2B \rightleftharpoons 2AB$    |



**5.2.** В гомогенной системе начальные молярные концентрации первого и второго реагентов составляют соответственно 1 моль/дм<sup>3</sup> и 2 моль/дм<sup>3</sup>. Рассчитайте: а) константу химического равновесия; б) равновесные концентрации исходных реагентов, если в равновесной системе концентрация продукта составила 0,5 моль/дм<sup>3</sup>.

|           |   |
|-----------|---|
| <b>01</b> | $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$                               |
| <b>02</b> | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |
| <b>03</b> | $\text{H}_2 + \text{Br}_2 \rightleftharpoons 2\text{HBr}$                               |
| <b>04</b> | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$                       |
| <b>05</b> | $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4$             |
| <b>06</b> | $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$                                 |
| <b>07</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$             |
| <b>08</b> | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| <b>09</b> | $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{HCl}$                               |
| <b>10</b> | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |
| <b>11</b> | $\text{PCl}_3 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{PCl}_5$                            |
| <b>12</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Br}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ |
| <b>13</b> | $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$                             |
| <b>14</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$             |
| <b>15</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ |
| <b>16</b> | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| <b>17</b> | $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$                               |
| <b>18</b> | $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$                              |
| <b>19</b> | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$                                 |
| <b>20</b> | $\text{PCl}_3 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{PCl}_5$                            |
| <b>21</b> | $\text{H}_2 + \text{F}_2 \rightleftharpoons 2\text{HF}$                                 |
| <b>22</b> | $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4$             |
| <b>23</b> | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| <b>24</b> | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |

**5.3.** В гомогенной системе равновесные молярные концентрации первого реагента, второго реагента и продукта реакции равны соответственно 0,25 моль/дм<sup>3</sup>, 0,5 моль/дм<sup>3</sup> и



0,5 моль/дм<sup>3</sup>. Рассчитайте: а) начальные концентрации реагентов; б) константу химического равновесия.

|    |   |
|----|---|
| 01 | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |
| 02 | $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$                             |
| 03 | $\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$            |
| 04 | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |
| 05 | $\text{F}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{HF}$                                 |
| 06 | $\text{PCl}_3 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{PCl}_5$                            |
| 07 | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$                                 |
| 08 | $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$                              |
| 09 | $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$                               |
| 10 | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| 11 | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ |
| 12 | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{F}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$   |
| 13 | $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$                               |
| 14 | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Br}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ |
| 15 | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$                                 |
| 16 | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |
| 17 | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$                       |
| 18 | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| 19 | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$             |
| 20 | $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$                                 |
| 21 | $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4$             |
| 22 | $\text{PCl}_3 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{PCl}_5$                            |
| 23 | $\text{H}_2 + \text{Br}_2 \rightleftharpoons 2\text{HBr}$                               |
| 24 | $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$                               |

**5.4.** В гомогенной системе равновесная молярная концентрация первого реагента равна 2 моль/дм<sup>3</sup>, продукта – 4 моль/дм<sup>3</sup>. Константа равновесия равна 5. Рассчитайте: а) начальные концентрации реагентов; б) равновесную концентрацию второго реагента.

|    |   |
|----|---|
| 01 | $\text{O}_2 + 2\text{SO}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$ |
| 02 | $\text{H}_2 + \text{Br}_2 \rightleftharpoons 2\text{HBr}$   |
| 03 | $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$  |



|           |   |
|-----------|---|
| <b>04</b> | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                              |
| <b>05</b> | $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$                             |
| <b>06</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ |
| <b>07</b> | $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{HCl}$                               |
| <b>08</b> | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$                                 |
| <b>09</b> | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| <b>10</b> | $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$                               |
| <b>11</b> | $\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$            |
| <b>12</b> | $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$                               |
| <b>13</b> | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$                                 |
| <b>14</b> | $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4$             |
| <b>15</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$             |
| <b>16</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ |
| <b>17</b> | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$                       |
| <b>18</b> | $\text{F}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{HF}$                                 |
| <b>19</b> | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                              |
| <b>20</b> | $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4$             |
| <b>21</b> | $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$                                 |
| <b>22</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Br}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ |
| <b>23</b> | $\text{PCl}_3 + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{PCl}_5$                            |
| <b>24</b> | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{F}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$   |

**5.5.** А. Напишите выражение константы химического равновесия указанной обратимой реакции. Б. Используя принцип Ле Шателье, определите, как повлияет повышение давления на равновесие данной реакции.

|           |   |
|-----------|---|
| <b>01</b> | $4\text{HCl}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{Cl}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$            |
| <b>02</b> | $3\text{Fe}_{(\text{кр})} + 4\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{кр})} + 4\text{H}_{2(\text{г})}$ |
| <b>03</b> | $\text{H}_{2(\text{г})} + \text{Cl}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{HCl}_{(\text{г})}$  |
| <b>04</b> | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + 3\text{H}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{Fe}_{(\text{кр})} + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ |
| <b>05</b> | $\text{BaO}_{(\text{кр})} + \text{C}_{(\text{кр})} \rightleftharpoons \text{Ba}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{(\text{г})}$                       |
| <b>06</b> | $\text{CaCO}_{3(\text{кр})} \rightleftharpoons \text{CaO}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$  |
| <b>07</b> | $\text{S}_{(\text{кр})} + \text{O}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons \text{SO}_{2(\text{г})}$  |
| <b>08</b> | $\text{CO}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons \text{C}_{(\text{кр})} + \text{O}_{2(\text{г})}$  |



|           |  |
|-----------|--|
| <b>09</b> | $\text{CO}_{2(\text{г})} + \text{H}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons \text{CO}_{(\text{г})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$               |
| <b>10</b> | $2\text{COF}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons \text{CO}_{2(\text{г})} + \text{CF}_{4(\text{г})}$   |
| <b>11</b> | $2\text{NO}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{NO}_{2(\text{г})}$   |
| <b>12</b> | $\text{F}_{2(\text{г})} + 2\text{ClO}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{ClO}_2\text{F}_{(\text{г})}$                                   |
| <b>13</b> | $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кр})} + \text{H}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_{(\text{кр})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ |
| <b>14</b> | $2\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{SO}_{3(\text{г})}$  |
| <b>15</b> | $3\text{H}_{2(\text{г})} + \text{N}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{NH}_{3(\text{г})}$   |
| <b>16</b> | $\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{кр})} + \text{H}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 3\text{FeO}_{(\text{кр})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$ |
| <b>17</b> | $2\text{H}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$                                       |
| <b>18</b> | $\text{CH}_{4(\text{г})} \rightleftharpoons \text{C}_{(\text{кр})} + 2\text{H}_{2(\text{г})}$  |
| <b>19</b> | $2\text{CO}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{CO}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})}$   |
| <b>20</b> | $\text{C}_{(\text{кр})} + \text{CO}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{CO}_{(\text{г})}$  |
| <b>21</b> | $\text{SO}_{2(\text{г})} + \text{NO}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons \text{SO}_{3(\text{г})} + \text{NO}_{(\text{г})}$                      |
| <b>22</b> | $2\text{NO}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_{4(\text{г})}$   |
| <b>23</b> | $2\text{N}_2\text{O}_{(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{N}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})}$                                       |
| <b>24</b> | $\text{N}_{2(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} \rightleftharpoons 2\text{NO}_{(\text{г})}$   |

**5.6.** Используя принцип Ле Шателье, определите, как необходимо изменить: а) температуру, б) внешнее давление, в) концентрацию исходных веществ, г) концентрацию продуктов реакции, чтобы сместить равновесие гомогенной газовой реакции в прямом направлении.

|           | <i>Реакция</i>   | $\Delta H_{298}^0, \text{кДж}$ |
|-----------|--|--------------------------------|
| <b>01</b> | $\text{PCl}_5 \rightleftharpoons \text{PCl}_3 + \text{Cl}_2$                     | +87,8                          |
| <b>02</b> | $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$     | -41,2                          |
| <b>03</b> | $4\text{HCl} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cl}_2$ | -114,4                         |
| <b>04</b> | $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$                          | +52,7                          |
| <b>05</b> | $2\text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2 + \text{O}_2$                          | -182,5                         |
| <b>06</b> | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons 2\text{NOCl}$                       | -77,3                          |
| <b>07</b> | $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$                      | -197,9                         |
| <b>08</b> | $3\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}_3$                                     | +284,5                         |
| <b>09</b> | $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$                | -483,6                         |
| <b>10</b> | $\text{COCl}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{Cl}_2$                       | +108,9                         |
| <b>11</b> | $\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$                           | +57,3                          |
| <b>12</b> | $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$                       | -91,9                          |



|           | <i>Реакция</i>   | $\Delta H^0_{298}, \text{кДж}$ |
|-----------|--|--------------------------------|
| <b>13</b> | $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$                        | -114,0                         |
| <b>14</b> | $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$     | +41,2                          |
| <b>15</b> | $2\text{HBr} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{Br}_2$                        | +72,8                          |
| <b>16</b> | $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cl}_2 \rightleftharpoons 4\text{HCl} + \text{O}_2$ | +114,4                         |
| <b>17</b> | $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$          | +247,3                         |
| <b>18</b> | $\text{H}_2 + \text{F}_2 \rightleftharpoons 2\text{HF}$                          | -546,6                         |
| <b>19</b> | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$                          | +182,5                         |
| <b>20</b> | $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{COCl}_2$                       | -108,9                         |
| <b>21</b> | $2\text{NOCl} \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{Cl}_2$                       | +77,3                          |
| <b>22</b> | $\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$     | -311,4                         |
| <b>23</b> | $2\text{HCl} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{Cl}_2$                        | +184,6                         |
| <b>24</b> | $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$     | +41,2                          |

**5.7.** Дайте определение всем величинам, входящим в уравнения, какова их размерность? Укажите физический смысл **k**.

| Порядок реакции | Дифференциальное уравнение | Величина C              | Величина k                     |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Нулевой         | $-dC/dt = kC^0$            | $C = C_0 - kt$          | $1/t \cdot [C_0 - C]$          |
| Первый          | $-dC/dt = kC^1$            | $\ln C = \ln C_0 - kt$  | $1/t \cdot [\ln C/C_0]$        |
| Второй          | $-dC/dt = kC^2$            | $1/C = 1/C_0 + kt$      | $1/t \cdot [1/C - 1/C_0]$      |
| Третий          | $-dC/dt = kC^3$            | $1/C^2 = 1/C_0^2 + 2kt$ | $1/2t \cdot [1/C^2 - 1/C_0^2]$ |

**5.8.** Напишите кинетические уравнения для реакций.

| № | Уравнение реакции   | Вид реакции    |
|---|---|----------------|
| 1 | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{HCl} = \text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ | 1-ый порядок   |
| 2 | $\text{SO}_2\text{Cl}_2 = \text{SO}_2 + \text{Cl}_2$                | 2-ой порядок   |
| 3 | $\text{C}_2\text{H}_6 = 2\text{CH}_3\cdot$                          | 3-ий порядок   |
| 4 | $\text{C}_4\text{H}_8 + \text{HBr} = \text{C}_4\text{H}_9\text{Br}$ | Сложная        |
| 5 | $2\text{NO} + \text{H}_2 = \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$         | Многостадийная |
| 6 | $2\text{H}_2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$          | Цепная         |
| 7 | $2\text{S}_2 + \text{CH}_4 = 2\text{H}_2\text{S} + \text{CS}_2$     | Фотохимическая |
| 8 | $\text{Cl}_2 + \text{CO} = \text{COCl}_2$                           | Каталитическая |





| №  | Уравнение реакции   | Вид реакции      |
|----|---|------------------|
| 9  | $\text{CH}_4 + \text{Br}_2 = \text{CH}_3\text{Br} + \text{HBr}$             | Сложная          |
| 10 | $2\text{NO}_2 = \text{N}_2\text{O}_4$                                       | Элементарная     |
| 11 | $2\text{HF} + \text{O} = \text{F}_2 + \text{H}_2\text{O}$                   | Тримолекулярная  |
| 12 | $\text{H}_2 + \text{CCl}_4 = \text{CHCl}_3 + \text{HCl}$                    | Простая          |
| 13 | $2\text{NO}_2 = 2\text{NO} + \text{O}_2$                                    | Бимолекулярная   |
| 14 | $\text{C}_2\text{H}_5\text{F} = \text{C}_2\text{H}_4 + \text{HF}$           | Мономолекулярная |
| 15 | $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | Простая          |
| 16 | $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{NH}_3 = \text{CH}_3\text{NH}_2 + \text{HCl}$  | Одностадийная    |
| 17 | $2\text{NO} + \text{Cl}_2 = 2\text{NOCl}$                                   | Элементарная     |
| 18 | $\text{N}_2\text{O}_4 = 2\text{NO}$   | Мономолекулярная |
| 19 | $\text{CH}_3\text{Br} + \text{NH}_3 = \text{CH}_3\text{NH}_2 + \text{HBr}$  | Простая          |
| 20 | $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CH}_3\text{COH}$         | Бимолекулярная   |

**5.9.** Используя расчетные уравнения (зад. 5.7) для реакции второго порядка разложения ацетальдегида  $\text{CH}_3\text{CHO} = \text{CH}_4 + \text{CO}$  с константой скорости  $0,343 \text{ дм}^3/\text{моль}$  и начальной концентрацией исходного вещества  $0,01 \text{ моль/дм}^3$ , определите:

- 1) концентрацию ацетальдегида через 10 минут после начала реакции;
- 2) время, в течение которого его исходная концентрация уменьшится в 3 раза.

**5.10.** Дайте определение величины  $t_{1/2}$ , укажите порядки реакций, для которых эти уравнения используются:

- 1)  $t_{1/2} = \ln 2/k$ ;
- 2)  $t_{1/2} = 1/C_0 k$ .

**5.11.** Определите периоды полупревращения:

1) вещества  $\text{C}_2\text{H}_4$  для реакции 1-го порядка:  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{HCl} = \text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ , если константа скорости равна  $0,72 \text{ мин}^{-1}$ ;

2) вещества  $\text{SO}_2\text{Cl}_2$  для реакции 2-го порядка:  $\text{SO}_2\text{Cl}_2 = \text{SO}_2 + \text{Cl}_2$ , если исходная концентрация  $\text{SO}_2\text{Cl}_2$  составляла  $2 \text{ моль/дм}^3$ , а константа скорости  $0,5 \text{ дм}^3/\text{моль мин}$ .



## 6. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РАСТВОРОВ

### *А. Теоретическая часть*

**Истинным раствором** называют однородную гомогенную систему из двух или нескольких веществ, в которой компоненты находятся в виде молекул или ионов. Размер частиц в таких растворах имеет величину  $\approx 10^{-10}$  м, поэтому они не могут быть обнаружены ни невооруженным глазом, ни с помощью микроскопа.

Количественный состав растворов можно выразить различными способами. Чаще всего это делают с помощью долей, концентраций и физических величин.

**Массовая доля вещества  $\omega(X)$** , выраженная в процентах, показывает, какая масса растворенного вещества (г) содержится в 100 г раствора. Если  $\omega(\text{NaCl}) = 20 \%$ , это значит, что в 100 г раствора содержится 20 г NaCl.

Чтобы рассчитать массовую долю, необходимо разделить массу растворенного вещества  $m(X)$  на массу раствора  $m_p$  и выразить это отношение в процентах:

$$\omega(X) = \frac{m(X)}{m_p} \cdot 100 \%$$

При решении задач необходимо помнить, что масса раствора равна сумме масс растворенного вещества и растворителя ( $\text{H}_2\text{O}$ ):  $m_p = m(X) + m(\text{H}_2\text{O})$ .

**Молярная доля растворенного вещества** – это отношение количества растворенного вещества к общему количеству веществ в растворе. Обозначается молярная доля  $\chi(X)$ , величина безразмерная:

$$\chi(X) = \frac{n(X)}{n(X) + n(\text{H}_2\text{O})}$$

**Молярная концентрация вещества  $C(X)$**  выражается количеством растворенного вещества (моль), содержащегося в 1  $\text{дм}^3$  раствора.



Если  $C(K_2SO_4) = 0,5$  моль/дм<sup>3</sup>, то это значит, что в 1 дм<sup>3</sup> раствора содержится 0,5 моль  $K_2SO_4$ .

Расчет молярной концентрации можно выполнить по формулам, где  $V_P$  – объем раствора:

$$C(X) = \frac{n(X)}{V_P} = \frac{m(X)}{M(X) \cdot V_P} \quad [\text{моль/дм}^3].$$

**Молярная концентрация эквивалентов вещества  $C_{\text{эkv}}(X)$**  выражается количеством эквивалентов растворенного вещества (моль) в 1 дм<sup>3</sup> раствора.

Если  $C_{\text{эkv}}(NaNO_3) = 0,2$  моль/дм<sup>3</sup>, то 0,2 моль эквивалентов  $NaNO_3$  содержится в 1 дм<sup>3</sup> раствора.

Рассчитать молярную концентрацию эквивалентов можно по формулам:

$$C_{\text{эkv}}(X) = \frac{n_{\text{эkv}}(X)}{V_P} = \frac{m(X)}{M_{\text{эkv}}(X) \cdot V_P} \quad [\text{моль/дм}^3].$$

**Моляльность раствора  $B(X)$**  – это физическая величина, которая определяется количеством растворенного вещества (моль), содержащегося в 1 кг растворителя ( $H_2O$ ).

Если  $B(NaOH) = 1,2$  моль/кг, то это значит, что 1,2 моль  $NaOH$  содержится в 1 кг  $H_2O$ .

Расчет моляльности раствора можно выполнить по следующим формулам:

$$B(X) = \frac{n(X)}{m(H_2O)} = \frac{m(X)}{M(X) \cdot m(H_2O)} \quad [\text{моль/кг}].$$

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Определите молярную долю, моляльность, молярную концентрацию карбоната натрия в водном растворе с массовой долей растворенного вещества 13 % (плотность раствора 1,135 г/см<sup>3</sup>).



| <i>Д а н о:</i>  | <i>Р е ш е н и е:</i>   |
|--|---|
| $W(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 13 \%$<br>$\rho = 1,135 \text{ г/см}^3$                                     | Массовая доля карбоната натрия в % показывает, сколько граммов растворенного вещества содержится в 100 г раствора, т. е. $m_p = 100 \text{ г}$ ;<br>$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 13 \text{ г}$ , тогда<br>$m(\text{H}_2\text{O}) = m_p - m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 100 \text{ г} - 13 \text{ г} = 87 \text{ г}$ . |
| $\chi(\text{Na}_2\text{CO}_3) - ?$<br>$C(\text{Na}_2\text{CO}_3) - ?$<br>$B(\text{Na}_2\text{CO}_3) - ?$ |   |

Молярная доля растворенного вещества в растворе выражается отношением количества вещества карбоната натрия к общему количеству веществ в растворе:

$$\chi(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{n(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{n(\text{Na}_2\text{CO}_3) + n(\text{H}_2\text{O})}, \text{ а}$$

$$n(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{M(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = \frac{13 \text{ г}}{106 \text{ г/моль}} = 0,12 \text{ моль},$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{H}_2\text{O})} = \frac{87 \text{ г}}{18 \text{ г/моль}} = 4,8 \text{ моль}.$$

Тогда

$$\chi(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{0,12}{0,12 + 4,8} = \frac{0,12}{4,92} = 0,024.$$

Моляльность карбоната натрия в растворе равна отношению числа моль этого вещества к массе воды в кг:

$$B(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{n(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{0,12 \text{ моль}}{0,087 \text{ кг}} = 1,38 \text{ моль/кг}.$$

Молярная концентрация растворенного вещества получается из выражения:

$$C(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{n(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{V_p}, \text{ где}$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho} = \frac{100 \text{ г}}{1,135 \text{ г/см}^3} = 88,1 \text{ см}^3 = 0,0881 \text{ дм}^3;$$



$$C(\text{NaCO}_3) = \frac{0,12 \text{ моль}}{0,881 \text{ дм}^3} = 1,36 \text{ моль/дм}^3.$$

**Пример 2.** Вычислите массовую долю, молярную концентрацию эквивалентов растворенного вещества в растворе, полученном при растворении 24 г гидроксида натрия в 176 см<sup>3</sup> воды (плотность раствора 1,045 г/см<sup>3</sup>).

**Дано:**

$$\begin{aligned} m(\text{NaOH}) &= 24 \text{ г} \\ V(\text{H}_2\text{O}) &= 176 \text{ см}^3 \\ \rho &= 1,045 \text{ г/см}^3 \\ \rho(\text{H}_2\text{O}) &= 1 \text{ г/см}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(\text{NaOH}) &- ? \\ C(\text{NaOH}) &- ? \\ C_{\text{экв}}(\text{NaOH}) &- ? \end{aligned}$$

**Решение:**

Находится массовая доля гидроксида натрия в растворе:

$$W(\text{NaOH}) = \frac{m(\text{NaOH})}{m_p} \cdot 100 \%,$$

$$\begin{aligned} m_p &= m(\text{NaOH}) + m(\text{H}_2\text{O}) = \\ &= m(\text{NaOH}) + \rho(\text{H}_2\text{O}) \cdot V(\text{H}_2\text{O}) = \\ &= 24 \text{ г} + 1 \text{ г/см}^3 \cdot 176 \text{ см}^3 = 200 \text{ г}. \end{aligned}$$

Тогда

$$W(\text{NaOH}) = \frac{24 \text{ г}}{200 \text{ г}} \cdot 100 \% = 12 \%.$$

Рассчитывается молярная концентрация растворенного вещества в растворе по формуле:

$$C(\text{NaOH}) = \frac{m(\text{NaOH})}{M(\text{NaOH}) \cdot V_p}, \quad \text{где}$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho} = \frac{200 \text{ г}}{1,045 \text{ г/см}^3} = 0,191 \text{ дм}^3.$$

Следовательно,

$$C(\text{NaOH}) = \frac{24 \text{ г}}{40 \text{ г/моль} \cdot 0,191 \text{ дм}^3} = 3,14 \text{ моль/дм}^3.$$

Вычисляется молярная концентрация эквивалентов NaOH в растворе:

$$C_{\text{экв}}(\text{NaOH}) = z \cdot C(\text{NaOH}),$$

где  $z$  – число эквивалентности, равное кислотности основания.

$$C_{\text{экв}}(\text{NaOH}) = 1 \cdot 3,14 \text{ моль/дм}^3 = 3,14 \text{ моль/дм}^3.$$



## ***В. Индивидуальные задания***

**6.1.** Вычислите массовую долю вещества X в растворе, содержащем указанное количество вещества  $n(X)$  в заданном объеме воды  $V(H_2O)$ .

|           | <b><i>Вещество (X)</i></b> | <b><i><math>n(X)</math>,<br/>моль</i></b> | <b><i><math>V(H_2O)</math>,<br/>дм<sup>3</sup></i></b> |
|-----------|----------------------------|---|--|
| <b>01</b> | хлорид аммония             | 0,4                                       | 0,1  |
| <b>02</b> | сульфат калия              | 0,6                                       | 0,1  |
| <b>03</b> | карбонат натрия            | 1,3                                       | 0,5  |
| <b>04</b> | хлорид калия               | 0,5                                       | 0,2  |
| <b>05</b> | нитрат меди(II)            | 1,3                                       | 1,2  |
| <b>06</b> | хлорид натрия              | 1,4                                       | 1,0  |
| <b>07</b> | сульфат меди(II)           | 1,1                                       | 0,4  |
| <b>08</b> | хлорид магния              | 2,0                                       | 0,9  |
| <b>09</b> | бромид кальция             | 1,2                                       | 0,8  |
| <b>10</b> | нитрат аммония             | 1,6                                       | 0,8  |
| <b>11</b> | сульфат калия              | 1,7                                       | 0,6  |
| <b>12</b> | бромид натрия              | 1,8                                       | 0,9  |
| <b>13</b> | нитрат кальция             | 2,1                                       | 1,1  |
| <b>14</b> | иодид калия                | 0,3                                       | 0,3  |
| <b>15</b> | сульфат меди(II)           | 3,2                                       | 1,5  |
| <b>16</b> | хлорид олова(II)           | 1,5                                       | 0,5  |
| <b>17</b> | хлорид цинка               | 2,1                                       | 0,8  |
| <b>18</b> | нитрат серебра(I)          | 1,3                                       | 0,5  |
| <b>19</b> | нитрат натрия              | 3,2                                       | 1,3  |
| <b>20</b> | карбонат калия             | 1,9                                       | 1,6  |
| <b>21</b> | сульфат железа(III)        | 1,2                                       | 2,0  |
| <b>22</b> | хлорид алюминия            | 1,8                                       | 1,9  |
| <b>23</b> | хромат калия               | 3,1                                       | 1,8  |
| <b>24</b> | карбонат аммония           | 3,5                                       | 2,2  |

**6.2.** Рассчитайте, какой объем воды необходимо прибавить к раствору объемом  $V_1$  с массовой долей растворенного





вещества  $\omega_1(X)$  и плотностью  $\rho_1$  для получения раствора с массовой долей растворенного вещества  $\omega_2(X)$ .

|           | $\omega_1(X), \%$ | $V_1, \text{см}^3$ | $\rho_1, \text{г/см}^3$ | $\omega_2(X), \%$ |
|-----------|-------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| <b>01</b> | 8                 | 80                 | 1,072                   | 3                 |
| <b>02</b> | 35                | 150                | 1,229                   | 20                |
| <b>03</b> | 4                 | 250                | 1,033                   | 2                 |
| <b>04</b> | 20                | 100                | 1,194                   | 10                |
| <b>05</b> | 50                | 400                | 1,525                   | 30                |
| <b>06</b> | 8                 | 300                | 1,072                   | 5                 |
| <b>07</b> | 12                | 150                | 1,045                   | 8                 |
| <b>08</b> | 20                | 300                | 1,226                   | 12                |
| <b>09</b> | 50                | 400                | 1,668                   | 35                |
| <b>10</b> | 40                | 200                | 1,374                   | 15                |
| <b>11</b> | 50                | 250                | 1,540                   | 20                |
| <b>12</b> | 12                | 500                | 1,045                   | 7                 |
| <b>13</b> | 4                 | 400                | 1,026                   | 3                 |
| <b>14</b> | 8                 | 200                | 1,071                   | 6                 |
| <b>15</b> | 4                 | 250                | 1,047                   | 1                 |
| <b>16</b> | 8                 | 400                | 1,084                   | 7                 |
| <b>17</b> | 50                | 200                | 1,545                   | 15                |
| <b>18</b> | 4                 | 350                | 1,034                   | 1                 |
| <b>19</b> | 27                | 300                | 1,165                   | 10                |
| <b>20</b> | 35                | 200                | 1,220                   | 15                |
| <b>21</b> | 50                | 300                | 1,525                   | 25                |
| <b>22</b> | 8                 | 250                | 1,010                   | 2                 |
| <b>23</b> | 15                | 100                | 1,071                   | 9                 |
| <b>24</b> | 10                | 200                | 1,055                   | 7                 |

**6.3.** А. Вычислите массу вещества X, которую следует добавить к водному раствору объемом  $V_1$  с массовой долей растворенного вещества  $\omega_1(X)$  и плотностью  $\rho_1$  для получения раствора с массовой долей  $\omega_2(X)$ . Б. Рассчитайте моляльность полученного раствора.



|           | <i>Вещество<br/>(X)</i>                         | $\omega_1, \%$ | $V_1, \text{дм}^3$ | $\rho_1, \text{г/см}^3$ | $\omega_2, \%$ |
|-----------|---|----------------|--------------------|-------------------------|----------------|
| <b>01</b> | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                 | 8              | 0,08               | 1,072                   | 15             |
| <b>02</b> | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                  | 35.5           | 0,40               | 1,229                   | 41             |
| <b>03</b> | FeSO <sub>4</sub>                               | 4              | 0,25               | 1,033                   | 14             |
| <b>04</b> | AgNO <sub>3</sub>                               | 20             | 0,10               | 1,194                   | 25             |
| <b>05</b> | NaOH  | 50             | 0,40               | 1,525                   | 60             |
| <b>06</b> | NH <sub>4</sub> Cl                              | 8              | 0,30               | 1,071                   | 15             |
| <b>07</b> | KOH   | 12             | 0,30               | 1,045                   | 20             |
| <b>08</b> | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 20             | 0,30               | 1,226                   | 40             |
| <b>09</b> | AgNO <sub>3</sub>                               | 50             | 0,40               | 1,668                   | 60             |
| <b>10</b> | KBr   | 40             | 0,20               | 1,374                   | 60             |
| <b>11</b> | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                  | 50             | 0,50               | 1,540                   | 70             |
| <b>12</b> | NaOH  | 12             | 0,55               | 1,045                   | 30             |
| <b>13</b> | K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   | 4              | 0,20               | 1,026                   | 12             |
| <b>14</b> | ZnCl <sub>2</sub>                               | 8              | 0,35               | 1,071                   | 20             |
| <b>15</b> | CdSO <sub>4</sub>                               | 4              | 0,25               | 1,038                   | 10             |
| <b>16</b> | CuSO <sub>4</sub>                               | 8              | 0,30               | 1,084                   | 14             |
| <b>17</b> | KI  | 50             | 0,20               | 1,545                   | 60             |
| <b>18</b> | BaCl <sub>2</sub>                               | 4              | 0,35               | 1,034                   | 15             |
| <b>19</b> | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>               | 10             | 0,40               | 1,081                   | 24             |
| <b>20</b> | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                  | 35             | 0,40               | 1,220                   | 45             |
| <b>21</b> | NaOH  | 50             | 0,30               | 1,525                   | 65             |
| <b>22</b> | LiOH  | 4              | 0,30               | 1,048                   | 15             |
| <b>23</b> | NH <sub>4</sub> Cl                              | 8              | 0,30               | 1,071                   | 15             |
| <b>24</b> | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                 | 8              | 0.20               | 1,072                   | 20             |

**6.4.** А. Рассчитайте массу вещества X и объем воды, необходимые для приготовления раствора указанной молярной концентрации  $C(X)$  (или молярной концентрации эквивалентов  $C_{\text{экр}}(X)$ ) объемом  $V$  и плотностью  $\rho$ . Б. Вычислите массовую и молярную доли растворенного вещества в полученном растворе.



|    | <i>Вещество (X)</i> | <i>Концентрация,<br/>моль/дм<sup>3</sup></i> | <i>V,<br/>дм<sup>3</sup></i> | <i>ρ,<br/>г/см<sup>3</sup></i> |
|----|---------------------|--|------------------------------|--------------------------------|
| 01 | гидроксид натрия    | $C(X) = 2,80$                                | 0,75                         | 1,110                          |
| 02 | сульфат калия       | $C_{\text{экв}}(X) = 0,72$                   | 1,20                         | 1,047                          |
| 03 | нитрит натрия       | $C(X) = 0,60$                                | 2,40                         | 1,024                          |
| 04 | хлорид хрома(III)   | $C_{\text{экв}}(X) = 1,15$                   | 0,50                         | 1,016                          |
| 05 | карбонат калия      | $C(X) = 0,45$                                | 0,24                         | 1,050                          |
| 06 | сульфат аммония     | $C_{\text{экв}}(X) = 1,90$                   | 1,30                         | 1,057                          |
| 07 | хлорид никеля(II)   | $C(X) = 1,24$                                | 0,60                         | 1,044                          |
| 08 | нитрат алюминия     | $C_{\text{экв}}(X) = 3,30$                   | 1,25                         | 1,176                          |
| 09 | хромат калия        | $C(X) = 1,50$                                | 2,70                         | 1,215                          |
| 10 | фосфорная кислота   | $C_{\text{экв}}(X) = 1,05$                   | 3,00                         | 1,017                          |
| 11 | ацетат свинца(II)   | $C(X) = 0,56$                                | 1,40                         | 1,128                          |
| 12 | сульфат алюминия    | $C_{\text{экв}}(X) = 1,65$                   | 0,60                         | 1,176                          |
| 13 | хлорид железа(III)  | $C(X) = 0,55$                                | 1,50                         | 1,099                          |
| 14 | сульфат цинка       | $C_{\text{экв}}(X) = 2,34$                   | 3,40                         | 1,181                          |
| 15 | нитрат калия        | $C(X) = 2,00$                                | 0,95                         | 1,118                          |
| 16 | сульфид калия       | $C_{\text{экв}}(X) = 3,30$                   | 1,60                         | 1,136                          |
| 17 | хлорид алюминия     | $C(X) = 0,31$                                | 2,10                         | 1,034                          |
| 18 | нитрат цинка        | $C_{\text{экв}}(X) = 2,50$                   | 0,25                         | 1,187                          |
| 19 | бромид калия        | $C(X) = 2,42$                                | 1,15                         | 1,197                          |
| 20 | хлорид бария        | $C_{\text{экв}}(X) = 1,28$                   | 2,00                         | 1,113                          |
| 21 | нитрат кальция      | $C(X) = 1,10$                                | 1,70                         | 1,128                          |
| 22 | карбонат натрия     | $C_{\text{экв}}(X) = 1,90$                   | 2,20                         | 1,095                          |
| 23 | сульфат натрия      | $C(X) = 1,30$                                | 3,10                         | 1,150                          |
| 24 | ацетат натрия       | $C_{\text{экв}}(X) = 3,60$                   | 2,00                         | 1,135                          |

**6.5.** Вещество X массой  $m(X)$  растворено в воде объемом  $V(H_2O)$  (плотность раствора  $\rho$ ). Рассчитайте: а) массовую долю вещества X; б) молярную концентрацию вещества X, в) молярную концентрацию эквивалентов вещества X, г) моляльность раствора.

|    | <i>Вещество (X)</i> | <i>m, г</i> | <i>V(H<sub>2</sub>O), дм<sup>3</sup></i> | <i>ρ, г/см<sup>3</sup></i> |
|----|---------------------|-------------|--|----------------------------|
| 01 | хлорид бария        | 8           | 0,092                                    | 1,072                      |
| 02 | карбонат калия      | 6           | 0,094                                    | 1,053                      |



|           |                    |    |       |       |
|-----------|--------------------|----|-------|-------|
| <b>03</b> | нитрат алюминия    | 4  | 0,096 | 1,031 |
| <b>04</b> | бромид цинка       | 10 | 0,090 | 1,093 |
| <b>05</b> | сульфат натрия     | 2  | 0,098 | 1,016 |
| <b>06</b> | фосфорная к-та     | 17 | 0,083 | 1,095 |
| <b>07</b> | хлорид натрия      | 12 | 0,088 | 1,086 |
| <b>08</b> | карбонат калия     | 10 | 0,090 | 1,090 |
| <b>09</b> | нитрат железа(III) | 14 | 0,086 | 1,117 |
| <b>10</b> | силикат натрия     | 16 | 0,084 | 1,187 |
| <b>11</b> | гидроксид калия    | 11 | 0,089 | 1,098 |
| <b>12</b> | сульфат меди(II)   | 8  | 0,092 | 1,084 |
| <b>13</b> | хлорид кальция     | 16 | 0,084 | 1,039 |
| <b>14</b> | гидроксид натрия   | 5  | 0,095 | 1,054 |
| <b>15</b> | сульфат калия      | 10 | 0,090 | 1,082 |
| <b>16</b> | нитрат аммония     | 18 | 0,082 | 1,074 |
| <b>17</b> | хлорид никеля(II)  | 8  | 0,092 | 1,079 |
| <b>18</b> | нитрат цинка       | 20 | 0,080 | 1,187 |
| <b>19</b> | фосфорная к-та     | 12 | 0,088 | 1,064 |
| <b>20</b> | сульфат алюминия   | 14 | 0,086 | 1,152 |
| <b>21</b> | хлорид железа(III) | 20 | 0,080 | 1,182 |
| <b>22</b> | карбонат калия     | 6  | 0,094 | 1,053 |
| <b>23</b> | сульфид натрия     | 10 | 0,090 | 1,115 |
| <b>24</b> | бромид магния      | 4  | 0,096 | 1,032 |



## 7. СВОЙСТВА РАСТВОРОВ НЕЭЛЕКТРОЛИТОВ

### *А. Теоретическая часть*

К **коллигативным свойствам** (не зависят от природы вещества, а определяются только количеством частиц в растворе) **предельно разбавленных растворов** (можно пренебречь взаимодействием между частицами растворенного вещества) **неэлектролитов** относятся: **осмотическое давление раствора, давление насыщенного пара растворителя над раствором, повышение температуры кипения и понижение температуры замерзания раствора** [3, 4].

**Осмозом** называют самопроизвольную диффузию молекул растворителя в раствор через полупроницаемую перегородку (проницаема только для молекул растворителя).

Таким образом, раствор лишь в том случае находится в равновесии с растворителем при наличии разделяющей их полупроницаемой перегородки, если к последней со стороны раствора приложено некоторое давление, называемое **осмотическим**.

В соответствии с законом Вант-Гоффа **осмотическое давление предельно разбавленного раствора численно равно тому давлению, которое производило бы растворенное вещество, если бы оно при данной температуре в газообразном состоянии занимало объем, равный объему раствора**.

Математическое выражение закона следующее:

$$\pi \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

где  $\pi$  – осмотическое давление;  $n$  – число молей растворенного вещества в объеме раствора  $V$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура.

Закон Вант-Гоффа можно записать так:

$$\pi = C \cdot R \cdot T,$$

где  $C$  – молярная концентрация растворенного вещества.

$\pi$  измеряется в данном уравнении в кПа. Растворы, которые имеют одинаковое осмотическое давление, называют **изотоническими**.



Давление пара над жидкостью пропорционально числу частиц, находящихся в газообразном состоянии. Пар, находящийся в равновесии с жидкостью, называется **насыщенным паром**. Чем больше концентрация раствора (чем меньше молекул растворителя в единице объема), тем меньше давление насыщенного пара.

Обозначим давление насыщенного пара чистого растворителя  $P^0$ , а давление насыщенного пара растворителя над раствором  $P$ . Тогда абсолютное понижение давления насыщенного пара растворителя над раствором будет:  $P^0 - P = \Delta P$ .

Отношение этой разницы к давлению насыщенного пара чистого растворителя называется **относительным понижением давления насыщенного пара** растворителя.

В соответствии с первым законом Рауля: **относительное понижение давления насыщенного пара растворителя над предельно разбавленным раствором равно молярной доле растворенного вещества**.

Математическое выражение закона имеет следующий вид:

$$(P^0 - P)/P^0 = n(\text{в-ва})/(n(\text{в-ва}) + n(\text{р-ля})) = \chi (\text{в-ва}).$$

В прямой зависимости от давления насыщенного пара над раствором нелетучего вещества находятся температуры кипения и отвердевания раствора.

Процессы кипения и отвердевания растворов были детально изучены Раулем. Он установил закон, впоследствии названный вторым законом Рауля: **повышение температуры кипения или понижение температуры отвердевания предельно разбавленных растворов прямо пропорционально их моляльности**.

Таким образом, можно записать:

$$\Delta T_{\text{кип}} = K_{\text{зб}} \cdot V \quad \text{и} \quad \Delta T_{\text{отв}} = K_{\text{кр}} \cdot V.$$

Коэффициенты пропорциональности  $K_{\text{зб}}$  и  $K_{\text{кр}}$  называются, соответственно, **эбулиоскопической** и **криоскопической** постоянными. Они не зависят от природы растворенного ве-



щества и характеризуют лишь растворитель. Для воды эти постоянные имеют значения:  $K_{\text{зб}} = 0,52$ ;  $K_{\text{кр}} = 1,86$ .

### ***Б. Индивидуальные задания***

**7.1.** В водном растворе объемом  $V$  содержится вещество  $X$  массой  $m(X)$ . Рассчитайте осмотическое давление этого раствора при температуре  $t$ .

|           | <b><i>Вещество (X)*</i></b> | <b><i><math>m(X)</math>, г</i></b> | <b><i><math>V</math>, дм<sup>3</sup></i></b> | <b><i><math>t</math>, °C</i></b> |
|-----------|-----------------------------|------------------------------------|--|----------------------------------|
| <b>01</b> | глюкоза                     | 90                                 | 4,0  | 27                               |
| <b>02</b> | сахароза                    | 16                                 | 0,5  | 20                               |
| <b>03</b> | глицерин                    | 12                                 | 1,5  | 15                               |
| <b>04</b> | этанол                      | 18                                 | 2,0  | 0                                |
| <b>05</b> | анилин                      | 18                                 | 3,0  | 12                               |
| <b>06</b> | сахароза                    | 27                                 | 2,5  | 27                               |
| <b>07</b> | глюкоза                     | 30                                 | 6,5  | 13                               |
| <b>08</b> | анилин                      | 35                                 | 5,2  | 8                                |
| <b>09</b> | глюкоза                     | 140                                | 2,0  | 17                               |
| <b>10</b> | глицерин                    | 78                                 | 3,5  | 14                               |
| <b>11</b> | анилин                      | 15                                 | 0,7  | 24                               |
| <b>12</b> | этанол                      | 120                                | 3,5  | 10                               |
| <b>13</b> | сахароза                    | 275                                | 1,5  | 30                               |
| <b>14</b> | глюкоза                     | 45                                 | 2,5  | 17                               |
| <b>15</b> | сахароза                    | 20                                 | 2,0  | 13                               |
| <b>16</b> | глицерин                    | 25                                 | 2,5  | 27                               |
| <b>17</b> | анилин                      | 10                                 | 1,5  | 17                               |
| <b>18</b> | глюкоза                     | 30                                 | 1,5  | 37                               |
| <b>19</b> | глицерин                    | 39                                 | 2,5  | 27                               |
| <b>20</b> | этанол                      | 80                                 | 0,5  | 20                               |
| <b>21</b> | анилин                      | 40                                 | 6,5  | 27                               |
| <b>22</b> | глюкоза                     | 70                                 | 2,5  | 27                               |
| <b>23</b> | анилин                      | 30                                 | 1,5  | 27                               |
| <b>24</b> | мочевина                    | 70                                 | 2,5  | 17                               |

\*Примечание: Название вещества

Формула

глюкоза

$C_6H_{12}O_6$





| Название вещества | Формула              |
|-------------------|----------------------|
| сахароза          | $C_{12}H_{22}O_{11}$ |
| глицерин          | $C_3H_5(OH)_3$       |
| этанол            | $C_2H_5OH$           |
| анилин            | $C_6H_5NH_2$         |
| мочевина          | $(NH_2)_2CO$         |

**7.2.** В водном растворе объемом  $V$  содержится неэлектролит  $X$  массой  $m(X)$ . Рассчитайте молярную массу неэлектролита, если осмотическое давление его раствора при температуре  $t$  равно  $\pi$ .

|           | $m(X), г$ | $V, дм^3$ | $t, ^\circ C$ | $\pi, кПа$ |
|-----------|-----------|-----------|---------------|------------|
| <b>01</b> | 5,96      | 1,0       | 20            | 242        |
| <b>02</b> | 58,96     | 3,0       | 40            | 284        |
| <b>03</b> | 18,4      | 1,0       | 0             | 454        |
| <b>04</b> | 45,04     | 2,0       | 27            | 312        |
| <b>05</b> | 52,76     | 1,0       | 0             | 350        |
| <b>06</b> | 23,41     | 1,0       | 20            | 950        |
| <b>07</b> | 2,02      | 0,5       | 0             | 51         |
| <b>08</b> | 1,29      | 0,5       | 33            | 109        |
| <b>09</b> | 3,39      | 0,2       | 0             | 214        |
| <b>10</b> | 2,32      | 0,1       | 25            | 618        |
| <b>11</b> | 91,7      | 1,0       | 27            | 1270       |
| <b>12</b> | 74,0      | 1,0       | 22            | 530        |
| <b>13</b> | 34,4      | 1,0       | 20            | 245        |
| <b>14</b> | 12,65     | 1,0       | 20            | 171        |
| <b>15</b> | 30,6      | 1,0       | 20            | 810        |
| <b>16</b> | 66,83     | 2,0       | 20            | 452        |
| <b>17</b> | 84,78     | 1,5       | 27            | 412        |
| <b>18</b> | 11,44     | 0,5       | 27            | 620        |
| <b>19</b> | 31,8      | 1,5       | 20            | 287        |
| <b>20</b> | 7,49      | 0,5       | 25            | 206        |
| <b>21</b> | 7,30      | 1,5       | 0             | 240        |
| <b>22</b> | 11,64     | 2,0       | 0             | 220        |
| <b>23</b> | 21,41     | 1,0       | 25            | 570        |
| <b>24</b> | 32,1      | 1,0       | 27            | 234        |



**7.3.** Давление насыщенного пара воды при 100 °С равно 101325 Па. Вычислите давление водяного пара над раствором нелетучего неэлектролита X при температуре 100 °С, если массовая доля неэлектролита в растворе равна  $\omega(X)$ .

|           | <i>Вещество (X)*</i> | <i><math>\omega(X),\%</math></i> |
|-----------|----------------------|----------------------------------|
| <b>01</b> | мочевина             | 4                                |
| <b>02</b> | сахароза             | 10                               |
| <b>03</b> | глюкоза              | 15                               |
| <b>04</b> | глицерин             | 5                                |
| <b>05</b> | анилин               | 8                                |
| <b>06</b> | глюкоза              | 20                               |
| <b>07</b> | мочевина             | 10                               |
| <b>08</b> | глюкоза              | 10                               |
| <b>09</b> | сахароза             | 25                               |
| <b>10</b> | анилин               | 15                               |
| <b>11</b> | глицерин             | 7                                |
| <b>12</b> | сахароза             | 5                                |
| <b>13</b> | мочевина             | 3                                |
| <b>14</b> | сахароза             | 15                               |
| <b>15</b> | анилин               | 12                               |
| <b>16</b> | глицерин             | 11                               |
| <b>17</b> | глюкоза              | 5                                |
| <b>18</b> | анилин               | 20                               |
| <b>19</b> | мочевина             | 8                                |
| <b>20</b> | сахароза             | 6                                |
| <b>21</b> | глюкоза              | 12                               |
| <b>22</b> | глицерин             | 6                                |
| <b>23</b> | анилин               | 5                                |
| <b>24</b> | сахароза             | 18                               |

\*Формулы веществ указаны в задании 7.1

**7.4.** Вычислите температуру кипения и температуру кристаллизации водного раствора вещества X с массовой долей растворенного вещества  $\omega(X)$ .



|           | <b>Вещество (X)*</b> | <b><math>\omega(X)</math>, %</b> |
|-----------|----------------------|----------------------------------|
| <b>01</b> | глицерин             | 10                               |
| <b>02</b> | анилин               | 8                                |
| <b>03</b> | глюкоза              | 15                               |
| <b>04</b> | сахароза             | 17                               |
| <b>05</b> | мочевина             | 20                               |
| <b>06</b> | глицерин             | 11                               |
| <b>07</b> | сахароза             | 25                               |
| <b>08</b> | глюкоза              | 5                                |
| <b>09</b> | сахароза             | 19                               |
| <b>10</b> | анилин               | 15                               |
| <b>11</b> | глицерин             | 7                                |
| <b>12</b> | глюкоза              | 18                               |
| <b>13</b> | анилин               | 11                               |
| <b>14</b> | сахароза             | 23                               |
| <b>15</b> | глицерин             | 6                                |
| <b>16</b> | глюкоза              | 25                               |
| <b>17</b> | мочевина             | 12                               |
| <b>18</b> | сахароза             | 17                               |
| <b>19</b> | глицерин             | 25                               |
| <b>20</b> | анилин               | 10                               |
| <b>21</b> | мочевина             | 8                                |
| <b>22</b> | глюкоза              | 20                               |
| <b>23</b> | анилин               | 12                               |
| <b>24</b> | сахароза             | 5                                |

\*Формулы веществ указаны в задании 7.1

**7.5.** Неэлектролит X массой  $m(X)$  растворен в воде массой  $m(H_2O)$ . Рассчитайте молярную массу неэлектролита X, если известно, что данный раствор начинает кристаллизоваться при температуре  $t_{кр}$ .

|           | <b><math>m(X)</math>, г</b> | <b><math>m(H_2O)</math>, г</b> | <b><math>t_{кр}</math>, °C</b> |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>01</b> | 25,7                        | 300                            | -0,466                         |
| <b>02</b> | 2,3                         | 255                            | -0,280                         |
| <b>03</b> | 1.1                         | 30                             | -0,740                         |



|           | $m(X), \text{г}$ | $m(H_2O), \text{г}$ | $t_{кр}, \text{°C}$ |
|-----------|------------------|---------------------|---------------------|
| <b>04</b> | 20,0             | 403                 | -0,270              |
| <b>05</b> | 11,4             | 30                  | -7,600              |
| <b>06</b> | 5,0              | 40                  | -3,875              |
| <b>07</b> | 99,0             | 200                 | -2,690              |
| <b>08</b> | 16,2             | 84                  | -1,050              |
| <b>09</b> | 8,7              | 250                 | -0,360              |
| <b>10</b> | 2,1              | 50                  | -0,850              |
| <b>11</b> | 5,6              | 150                 | -1,160              |
| <b>12</b> | 5,0              | 200                 | -0,780              |
| <b>13</b> | 14,6             | 84                  | -3,500              |
| <b>14</b> | 2,3              | 125                 | -0,372              |
| <b>15</b> | 0,4              | 100                 | -0,124              |
| <b>16</b> | 7,3              | 100                 | -2,263              |
| <b>17</b> | 2,4              | 100                 | -0,248              |
| <b>18</b> | 19,6             | 100                 | -2,025              |
| <b>19</b> | 2,2              | 100                 | -0,440              |
| <b>20</b> | 0,9              | 100                 | -0,182              |
| <b>21</b> | 9,1              | 100                 | -1,840              |
| <b>22</b> | 48,2             | 100                 | -9,740              |
| <b>23</b> | 3,6              | 100                 | -0,196              |
| <b>24</b> | 57,5             | 100                 | -3,127              |



## 8. СВОЙСТВА РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

### *А. Теоретическая часть*

Экспериментальная проверка законов Вант-Гоффа и Рауля показала, что растворы многих веществ (**солей, кислот и щелочей**) им не подчиняются. Так, вычисленные значения осмотического давления, повышения температуры кипения и понижения температуры отвердевания растворов этих веществ всегда оказывались заниженными, по сравнению с полученными опытным путем [2]. В связи с этим, Вант-Гофф ввел поправочный коэффициент  $i$ , показывающий, во сколько раз расчетные значения этих величин ниже опытных:

$$i = \pi_{\text{оп.}}/\pi_{\text{рас.}} = \Delta P_{\text{оп.}}/\Delta P_{\text{рас.}} = \Delta T_{\text{отв.оп.}}/\Delta T_{\text{отв.рас.}} = \\ = \Delta T_{\text{кип.оп.}}/\Delta T_{\text{кип.рас.}}$$

Коэффициент  $i$  называют **изотоническим коэффициентом**. При его введении в уравнения Вант-Гоффа и Рауля получили соотношения, пригодные для описания свойств разбавленных растворов электролитов

$$\pi = icRT;$$

$$(P^0 - P)/P^0 = i n(\text{в-ва})/(i n(\text{в-ва}) + n(\text{р-ль}));$$

$$\Delta T_{\text{отв}} = i K_{\text{кр}} \cdot B; \quad \Delta T_{\text{кип}} = i K_{\text{эб}} \cdot B.$$

Коэффициент  $i$  зависит от природы раствора и его концентрации и больше единицы. Он показывает, во сколько раз увеличилось общее число частиц в растворе в результате электролитической диссоциации. Степень диссоциации и изотонический коэффициент связаны соотношением:

$$i = 1 + \alpha(k - 1),$$

где  $k$  – число ионов, образующихся при диссоциации одной молекулы.

**Электролиты** – это вещества, растворы и расплавы которых содержат заряженные частицы – ионы (катионы и анионы).



Важной особенностью растворов электролитов является способность проводить электрический ток. В отличие от металлов – проводников первого рода с **электронной проводимостью**, электролиты относятся к проводникам второго рода с **ионной проводимостью**.

Электролиты в растворах подразделяются на **сильные** и **слабые**. Критерием для классификации электролитов является их полная или частичная диссоциация.

**Если электролит в растворе диссоциирован нацело, т. е. находится только в виде гидратированных ионов, то его называют сильным.**

Процесс диссоциации сильных электролитов **необратимый**.

К сильным электролитам, если растворителем является вода, относятся:

1. Соли (средние, кислые, основные).
2. Растворимые основания щелочных металлов: LiOH, NaOH, KOH, RbOH, CsOH, и щелочноземельных металлов  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Sr(OH)}_2$ ,  $\text{Ba(OH)}_2$ .
3. Следующие кислоты – HCl, HBr, HI,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{HMnO}_4$  и др.

В водных растворах слабых электролитов одновременно присутствуют гидратированные ионы и недиссоциированные молекулы, между которыми устанавливается динамическое равновесие. Процесс диссоциации обратимый и равновесный.

Слабыми электролитами в водных растворах являются:

1. Кислоты – HF, HCN,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , HClO, HBrO, HIO,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и др.
2. Следующие основания –  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{Cr(OH)}_2$ ,  $\text{Mn(OH)}_2$ ,  $\text{Fe(OH)}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$  и др.
3. Амфотерные гидроксиды –  $\text{Be(OH)}_2$ ,  $\text{Al(OH)}_3$ ,  $\text{Pb(OH)}_2$ ,  $\text{Sn(OH)}_2$ ,  $\text{Cr(OH)}_3$ ,  $\text{Fe(OH)}_3$ ,  $\text{Zn(OH)}_2$  и др.

Многоосновные слабые кислоты ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) и многокислотные основания ( $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{Fe(OH)}_2$ ,  $\text{Cr(OH)}_2$ ,  $\text{Cu(OH)}_2$ ) диссоциируют ступенчато, т. е. в несколько стадий.



Способность таких электролитов к ступенчатой диссоциации объясняет образование кислых и основных солей.

**Степень электролитической диссоциации ( $\alpha$ )** – это доля продиссоциированных на ионы молекул. Она выражается в процентах или в долях от единицы (в расчетах). Если общее число молекул растворенного вещества  $N_0$  или общую молярную концентрацию  $C_0$  взять за единицу, то:

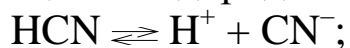
$$\alpha = \frac{N_{\text{дисс.}}}{N_0} \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{C_{\text{дисс.}}}{C_0},$$

где  $N_{\text{дисс.}}$  – число продиссоциировавших молекул;  $C_{\text{дисс.}}$  – молярная концентрация продиссоциировавших молекул.

Степень диссоциации слабых электролитов  $0 < \alpha < 1$ . При разбавлении раствора степень диссоциации увеличивается и в пределе стремится к единице.

Поскольку процесс диссоциации слабых электролитов является обратимым и равновесным, то его можно охарактеризовать константой химического равновесия, называемой в данном случае **константой диссоциации**,  $K_d$ .

Она равна отношению произведения равновесных молярных концентраций продуктов диссоциации к равновесной молярной концентрации исходных частиц. Например, для процесса диссоциации циановодородной кислоты **в водном растворе**:



$$K_d = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{CN}^-]}{[\text{HCN}]},$$

где  $[\text{H}^+]$ ,  $[\text{CN}^-]$ ,  $[\text{HCN}]$  – равновесные молярные концентрации частиц.

Как любая константа равновесия,  $K_d$  зависит только от природы электролита и температуры. Чем больше значение  $K_d$  для данного электролита, тем больше ионов образуется при его диссоциации.

Константа и степень электролитической диссоциации количественно взаимосвязаны. Эта связь математически выражается **законом разведения (разбавления)**, впервые сформулированным В. Оствальдом:





$$K_d = \frac{\alpha^2}{1-\alpha} C(X),$$

где  $C(X)$  – исходная молярная концентрация слабого электролита.

Это уравнение получено для бинарных электролитов, т. е. диссоциирующих на два иона. При очень малой степени диссоциации ( $\alpha \ll 1$ ) выражение  $(1 - \alpha)$  близко к единице, следовательно, для приближенных расчетов:

$$K_d = \alpha^2 C(X) \quad \text{или} \quad \alpha = \sqrt{\frac{K_d}{C(X)}}.$$

Полученная формула позволяет определять степень диссоциации слабых электролитов при различных концентрациях их водных растворов.

Оказалось, что если учесть все протекающие в растворах электролитов процессы (взаимодействия ионов растворенного вещества друг с другом и с молекулами растворителя, образование ионных ассоциатов), то уравнения законов Вант-Гоффа, Рауля, действующих масс, описывающие свойства идеальных растворов, будут справедливы и для реальных растворов электролитов. Этот учет осуществляется путем замены величин концентраций в уравнениях перечисленных законов на так называемые **«активности»**. Величина активности, обозначается буквой **а**, связана с величиной молярной концентрации **С** простым соотношением: **а = γС**, где **γ** – **коэффициент активности**.

В водных растворах коэффициент активности электролита зависит, в основном, от концентраций и зарядов всех присутствующих ионов. Для характеристики этой зависимости Льюис введено понятие об ионной силе раствора электролита. **Ионной силой электролита** называется величина **I**, равная полусумме произведений молярных концентраций **С** каждого из присутствующих в растворе ионов на квадрат их заряда **z**.

П. Дебаем и Э. Гюккелем была создана **электростатическая теория**, объясняющая свойства электролитов. Одно из



выражений для расчета среднего ионного коэффициента активности электролита типа АВ:  $\lg \gamma_{\pm} = -A z_1 z_2 \sqrt{I}$ , где  $A$  – коэффициент, зависящий от диэлектрической проницаемости растворителя и температуры. Для водных растворов при 25 °С  $A = 0,5$  и  $\lg \gamma_{\pm} = -0,5 z_1 z_2 \sqrt{I}$ . Из этой формулы следует, что чем больше ионная сила раствора, тем меньше коэффициент активности его ионов.

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Вычислите степень диссоциации циановодородной кислоты в ее водном растворе с молярной концентрацией 0,01 моль/дм<sup>3</sup>.

#### ***Решение:***

Циановодородная кислота – слабый электролит. В ее водном растворе устанавливается равновесие:



Количественно процесс электролитической диссоциации таких электролитов можно охарактеризовать степенью диссоциации ( $\alpha$ ) и константой диссоциации ( $K_d$ ), которые связаны соотношением (закон разбавления Оствальда):

$$K_d = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \cdot C(X),$$

где  $C(X)$  – исходная молярная концентрация слабого электролита.

Если  $\alpha \ll 1$ , можно приближенно принять разность  $(1 - \alpha)$ , равной единице. Тогда:

$$K_d = C(X) \cdot \alpha^2 \quad \text{и} \quad \alpha = \sqrt{K_d / C(X)}.$$

Величину  $K_d$  для водных растворов слабых электролитов при 298 К можно найти в справочнике. Так,  $K_d(\text{HCN}) = 4,9 \cdot 10^{-10}$ .

Вычисляется степень диссоциации:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_d(\text{HCN})}{C(\text{HCN})}} = \sqrt{\frac{4,9 \cdot 10^{-10}}{0,01}} = 2,2 \cdot 10^{-4}.$$



**Пример 2.** Определите равновесную молярную концентрацию катионов водорода в водном растворе азотистой кислоты с молярной концентрацией эквивалентов 0,01 моль/дм<sup>3</sup>.

**Решение:**

Азотистая кислота  $\text{HNO}_2$  – слабый электролит. Согласно уравнению диссоциации  $\text{HNO}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{NO}_2^-$ , равновесная молярная концентрация катионов водорода  $[\text{H}^+]$  численно равна концентрации продиссоциировавших молекул кислоты.

Если исходная молярная концентрация азотистой кислоты –  $\text{C}(\text{HNO}_2)$ , то концентрация продиссоциировавших молекул, следовательно:

$$[\text{H}^+] = \alpha \cdot \text{C}(\text{HNO}_2).$$

Так как степень диссоциации:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_d(\text{HNO}_2)}{\text{C}(\text{HNO}_2)}}, \text{ то}$$

$$\begin{aligned} [\text{H}^+] &= \sqrt{\frac{K_d(\text{HNO}_2)}{\text{C}(\text{HNO}_2)}} \cdot \text{C}(\text{HNO}_2) = \sqrt{\frac{K_d(\text{HNO}_2) \cdot \text{C}^2(\text{HNO}_2)}{\text{C}(\text{HNO}_2)}} = \\ &= \sqrt{K_d(\text{HNO}_2) \cdot \text{C}(\text{HNO}_2)}. \end{aligned}$$

$\text{C}(\text{HNO}_2)$  – молярная концентрация азотистой кислоты в растворе – определяется из соотношения:

$$\text{C}_{\text{экв}}(\text{HNO}_2) = z \cdot \text{C}(\text{HNO}_2),$$

где  $z$  – ее основность.

Так как  $\text{HNO}_2$  – одноосновная кислота, то

$$\text{C}(\text{HNO}_2) = \text{C}_{\text{экв}}(\text{HNO}_2) = 0,01 \text{ моль/дм}^3.$$

При подставлении значения  $K_d(\text{HNO}_2) = 4,0 \cdot 10^{-4}$  и  $\text{C}(\text{HNO}_2)$ , получается:

$$[\text{H}^+] = \sqrt{K_d(\text{HNO}_2) \cdot \text{C}(\text{HNO}_2)} = \sqrt{4,0 \cdot 10^{-4} \cdot 0,01} = 2 \cdot 10^{-3} [\text{моль/дм}^3].$$



### ***В. Индивидуальные задания***

**8.1.** А. Напишите уравнения электролитической диссоциации электролитов в водном растворе. Б. Для слабых электролитов составьте выражения констант диссоциации.

|           |  |
|-----------|--|
| <b>01</b> | NaOH, NH <sub>4</sub> OH, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HF  |
| <b>02</b> | CH <sub>3</sub> COOH, HNO <sub>3</sub> , KOH, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   |
| <b>03</b> | Ca(OH) <sub>2</sub> , HNO <sub>2</sub> , KHSO <sub>3</sub> , HCl   |
| <b>04</b> | Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , HBr, RbOH, HCN  |
| <b>05</b> | HNO <sub>3</sub> , Sr(OH) <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> OH                          |
| <b>06</b> | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , HI, H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> COOH            |
| <b>07</b> | HClO, H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HNO <sub>2</sub>               |
| <b>08</b> | NaHCO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CsOH                            |
| <b>09</b> | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , HClO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> OH              |
| <b>10</b> | NaBr, LiOH, H <sub>2</sub> S, HBrO   |
| <b>11</b> | H <sub>2</sub> Se, HClO <sub>4</sub> , KHS, H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   |
| <b>12</b> | H <sub>2</sub> Te, KMnO <sub>4</sub> , HNO <sub>2</sub> , Ba(OH) <sub>2</sub>  |
| <b>13</b> | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , HF, H <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> |
| <b>14</b> | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , HCN, NH <sub>4</sub> OH              |
| <b>15</b> | BaCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , Ca(OH) <sub>2</sub>             |
| <b>16</b> | HIO <sub>3</sub> , HClO, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Ba(OH) <sub>2</sub>  |
| <b>17</b> | Ca(OH) <sub>2</sub> , HClO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> , HF   |
| <b>18</b> | NH <sub>4</sub> OH, CsOH, H <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> , HCN  |
| <b>19</b> | HNO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , NaHCO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                              |
| <b>20</b> | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , LiOH, NH <sub>4</sub> OH                            |
| <b>21</b> | Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , HMnO <sub>4</sub> , KOH, H <sub>2</sub> S  |
| <b>22</b> | HNO <sub>2</sub> , Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>              |
| <b>23</b> | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, CaCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   |
| <b>24</b> | CrCl <sub>3</sub> , HF, NH <sub>4</sub> OH, K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   |

**8.2.** Составьте два молекулярных уравнения реакций, протекающих в растворах, по указанному ионно-молекулярному уравнению.



|    |   |
|----|---|
| 01 | $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3\downarrow$                           |
| 02 | $\text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ = \text{CO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$             |
| 03 | $\text{H}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O}$   |
| 04 | $\text{Cr}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Cr}(\text{OH})_3\downarrow$                      |
| 05 | $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- = \text{NH}_3\uparrow + \text{H}_2\text{O}$                |
| 06 | $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ = \text{CH}_3\text{COOH}$                         |
| 07 | $\text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{BaSO}_4\downarrow$                           |
| 08 | $\text{SO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ = \text{SO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$             |
| 09 | $\text{Zn}^{2+} + \text{S}^{2-} = \text{ZnS}\downarrow$                                 |
| 10 | $\text{Cu}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Cu}(\text{OH})_2\downarrow$                      |
| 11 | $3\text{Ca}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\downarrow$            |
| 12 | $\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$                      |
| 13 | $\text{Ba}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{BaCO}_3\downarrow$                           |
| 14 | $\text{Cu}^{2+} + \text{S}^{2-} = \text{CuS}\downarrow$                                 |
| 15 | $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_2\downarrow$                      |
| 16 | $\text{Pb}^{2+} + \text{S}^{2-} = \text{PbS}\downarrow$                                 |
| 17 | $\text{Ca}^{2+} + 2\text{F}^- = \text{CaF}_2\downarrow$                                 |
| 18 | $3\text{Mg}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} = \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2\downarrow$            |
| 19 | $\text{Ag}^+ + \text{Cl}^- = \text{AgCl}\downarrow$                                     |
| 20 | $\text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{PbSO}_4\downarrow$                           |
| 21 | $\text{Zn}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Zn}(\text{OH})_2\downarrow$                      |
| 22 | $\text{Mg}^{2+} + 2\text{F}^- = \text{MgF}_2\downarrow$                                 |
| 23 | $\text{Fe}(\text{OH})_2\downarrow + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ |
| 24 | $2\text{Ag}^+ + \text{CO}_3^{2-} = \text{Ag}_2\text{CO}_3\downarrow$                    |

**8.3.** Давление водяного пара над раствором вещества X при температуре t равно P. Массы вещества X и воды равны, соответственно, m(X) и m(H<sub>2</sub>O). Рассчитайте изотонический коэффициент данного раствора, если давление водяного пара над водой при указанной температуре равно P<sup>0</sup>.

|    | <i>Вещество (X)</i> | <i>m X,<br/>г</i> | <i>m H<sub>2</sub>O,<br/>г</i> | <i>t,<br/>°C</i> | <i>P,<br/>кПа</i> | <i>P<sup>0</sup>,<br/>кПа</i> |
|----|---------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|
| 01 | нитрат кальция      | 31,5              | 470                            | 17               | 1,89              | 1,94                          |
| 02 | хлорид кальция      | 66                | 90                             | 90               | 52,32             | 70,11                         |
| 03 | нитрат натрия       | 85                | 1000                           | 0                | 0,59              | 0,61                          |



|    | <i>Вещество (X)</i> | <i>m X,<br/>г</i> | <i>m H<sub>2</sub>O,<br/>г</i> | <i>t,<br/>°C</i> | <i>P,<br/>кПа</i> | <i>P<sup>0</sup>,<br/>кПа</i> |
|----|---------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|
| 04 | хлорид кальция      | 22                | 1000                           | 20               | 2,31              | 2,34                          |
| 05 | нитрат кальция      | 67                | 1000                           | 100              | 99,30             | 101,32                        |
| 06 | гидроксид натрия    | 2,5               | 1000                           | 100              | 101,1             | 101,32                        |
| 07 | сульфат натрия      | 7,5               | 450                            | 100              | 100,8             | 101,32                        |
| 08 | хлорид калия        | 25                | 100                            | 100              | 92,20             | 101,32                        |
| 09 | хлорид натрия       | 8                 | 90                             | 20               | 2,23              | 2,34                          |
| 10 | нитрат натрия       | 6                 | 100                            | 20               | 2,28              | 2,34                          |
| 11 | хлорид бария        | 34                | 1000                           | 0                | 0,60              | 0,61                          |
| 12 | нитрат калия        | 92                | 1000                           | 17               | 1,88              | 1,94                          |
| 13 | нитрат кальция      | 3,4               | 100                            | 17               | 1,92              | 1,94                          |
| 14 | нитрат бария        | 33                | 300                            | 90               | 68,69             | 70,11                         |
| 15 | хлорид бария        | 6,8               | 400                            | 90               | 69,82             | 70,11                         |
| 16 | гидроксид натрия    | 8,2               | 200                            | 20               | 2,26              | 2,34                          |
| 17 | сульфат натрия      | 14                | 900                            | 20               | 2,32              | 2,34                          |
| 18 | гидроксид натрия    | 5                 | 180                            | 100              | 99,01             | 101,32                        |
| 19 | нитрат кальция      | 33,4              | 500                            | 17               | 1,90              | 1,94                          |
| 20 | нитрат калия        | 41                | 500                            | 100              | 98,52             | 101,32                        |
| 21 | гидроксид натрия    | 4                 | 200                            | 90               | 68,93             | 70,11                         |
| 22 | хлорид бария        | 17                | 500                            | 20               | 2,32              | 2,34                          |
| 23 | хлорид натрия       | 3                 | 100                            | 0                | 0,60              | 0,61                          |
| 24 | хлорид калия        | 12,4              | 200                            | 100              | 98,66             | 101,32                        |

**8.4.** Вычислите ионную силу раствора, в 1 дм<sup>3</sup> которого содержится электролит X<sub>1</sub> количеством n(X<sub>1</sub>) и электролит X<sub>2</sub> количеством n(X<sub>2</sub>).

|    | <i>Электролит (X<sub>1</sub>)</i> | <i>n(X<sub>1</sub>),<br/>моль</i> | <i>Электролит (X<sub>2</sub>)</i> | <i>n(X<sub>2</sub>),<br/>моль</i> |
|----|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 01 | нитрат цинка                      | 0,005                             | нитрат натрия                     | 0,005                             |
| 02 | сульфат алюминия                  | 0,003                             | хлорид калия                      | 0,001                             |
| 03 | хлорид алюминия                   | 0,001                             | сульфат магния                    | 0,001                             |
| 04 | азотная кислота                   | 0,004                             | хлорид кальция                    | 0,006                             |
| 05 | нитрат цинка                      | 0,001                             | иодид калия                       | 0,003                             |
| 06 | хлорид стронция                   | 0,002                             | бромид калия                      | 0,002                             |
| 07 | хлорид алюминия                   | 0,001                             | бромид натрия                     | 0,005                             |



|           | <i>Электролит (<math>X_1</math>)</i> | <i><math>n(X_1)</math>,<br/>моль</i> | <i>Электролит (<math>X_2</math>)</i> | <i><math>n(X_2)</math>,<br/>моль</i> |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>08</b> | сульфат магния                       | 0,001                                | хлорид натрия                        | 0,004                                |
| <b>09</b> | фосфат натрия                        | 0,005                                | сульфат калия                        | 0,002                                |
| <b>10</b> | сульфат алюминия                     | 0,005                                | нитрат марганца(II)                  | 0,050                                |
| <b>11</b> | сульфат натрия                       | 0,002                                | гидроксид лития                      | 0,020                                |
| <b>12</b> | гидроксид калия                      | 0,030                                | сульфат калия                        | 0,001                                |
| <b>13</b> | гидроксид бария                      | 0,003                                | бромид бария                         | 0,010                                |
| <b>14</b> | серная кислота                       | 0,010                                | нитрат меди(II)                      | 0,005                                |
| <b>15</b> | серная кислота                       | 0,200                                | сульфат хрома(III)                   | 0,002                                |
| <b>16</b> | гидроксид калия                      | 0,080                                | сульфат калия                        | 0,002                                |
| <b>17</b> | хлорид натрия                        | 0,030                                | нитрат калия                         | 0,004                                |
| <b>18</b> | сульфат калия                        | 0,050                                | карбонат натрия                      | 0,002                                |
| <b>19</b> | нитрат кальция                       | 0,050                                | хлорид хрома(III)                    | 0,001                                |
| <b>20</b> | серная кислота                       | 0,500                                | хлорид железа(III)                   | 0,005                                |
| <b>21</b> | иодид кальция                        | 0,030                                | нитрат магния                        | 0,003                                |
| <b>22</b> | азотная кислота                      | 0,030                                | нитрат цинка                         | 0,002                                |
| <b>23</b> | фосфат натрия                        | 0,050                                | хлорид калия                         | 0,003                                |
| <b>24</b> | хлорид кальция                       | 0,040                                | сульфат алюминия                     | 0,003                                |

**8.5.** Рассчитайте активность ионов в растворе электролита X с молярной концентрацией электролита  $C(X)$ .

|           | <i>Электролит (X)</i> | <i><math>C(X)</math>, моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|-----------------------|---|
| <b>01</b> | сульфат натрия        | 0,0030  |
| <b>02</b> | гидроксид калия       | 0,0050  |
| <b>03</b> | азотная кислота       | 0,0100  |
| <b>04</b> | хлорид алюминия       | 0,0015  |
| <b>05</b> | хлорная кислота       | 0,0060  |
| <b>06</b> | сульфат цинка         | 0,0025  |
| <b>07</b> | серная кислота        | 0,0020  |
| <b>08</b> | хлорид кальция        | 0,0100  |
| <b>09</b> | хлорная кислота       | 0,0040  |
| <b>10</b> | фосфат калия          | 0,0015  |
| <b>11</b> | карбонат натрия       | 0,0025  |
| <b>12</b> | бромид магния         | 0,0080  |
| <b>13</b> | хлорид калия          | 0,0100  |





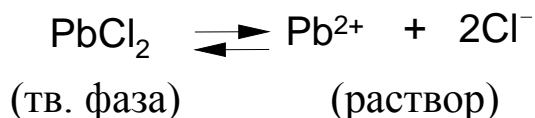
|           | <i>Электролит (X)</i> | <i>C(X), моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|-----------------------|----------------------------------|
| <b>14</b> | азотная кислота       | 0,0050                           |
| <b>15</b> | сульфат меди(II)      | 0,0025                           |
| <b>16</b> | гидроксид натрия      | 0,0100                           |
| <b>17</b> | сульфат калия         | 0,0015                           |
| <b>18</b> | хлорид хрома(III)     | 0,0010                           |
| <b>19</b> | нитрат магния         | 0,0025                           |
| <b>20</b> | иодид кальция         | 0,0050                           |
| <b>21</b> | гидроксид бария       | 0,0010                           |
| <b>22</b> | карбонат натрия       | 0,0030                           |
| <b>23</b> | нитрат натрия         | 0,0100                           |
| <b>24</b> | хлорид бария          | 0,0015                           |



## 9. ПРОИЗВЕДЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ

### *А. Теоретическая часть*

Если малорастворимый электролит  $\text{PbCl}_2$  в водном растворе диссоциирует на катионы  $\text{Pb}^{2+}$  и анионы  $\text{Cl}^-$ , то при данной температуре между твердой фазой и раствором устанавливается равновесие:



То есть в насыщенный водный раствор переходит в единицу времени столько ионов, сколько их вновь возвращается в твердую фазу (осадок). Применяется закон действующих масс к этому гетерогенному равновесию:

$$K_c = \frac{[\text{Pb}^{2+}] \cdot [\text{Cl}^-]^2}{[\text{PbCl}_2]} \text{ или } K_c \cdot [\text{PbCl}_2] = [\text{Pb}^{2+}] \cdot [\text{Cl}^-]^2.$$

Так как концентрация твердой фазы  $[\text{PbCl}_2]$  постоянна, то, следовательно, произведение  $K_c \cdot [\text{PbCl}_2]$  является величиной постоянной при данной температуре. Ее называют произведением растворимости (ПР):

$$\text{ПР} = [\text{Pb}^{2+}] \cdot [\text{Cl}^-]^2.$$

Таким образом, **ПР – это произведение равновесных молярных концентраций ионов в насыщенном водном растворе малорастворимого сильного электролита, взятых в степенях, равных их стехиометрическим коэффициентам.** Величины ПР некоторых солей при 298 К измерены и сведены в справочные таблицы.

Произведение растворимости характеризует растворимость соли: чем больше ПР, тем больше растворимость.

Из понятия ПР **вытекают условия образования и растворения осадков:**

- 1) если  $C_{\text{Pb}^{2+}} \cdot C_{\text{Cl}^-}^2 = \text{ПР}$ , раствор является **насыщенным**;
- 2) если  $C_{\text{Pb}^{2+}} \cdot C_{\text{Cl}^-}^2 > \text{ПР}$ , малорастворимая соль выпадает в осадок (**раствор перенасыщен**);



3) если  $C_{Pb^{2+}} \cdot C_{Cl^-}^2 < ПР$ , происходит **растворение осадка малорастворимой соли**.

### **Б. Примеры решения типовых задач**

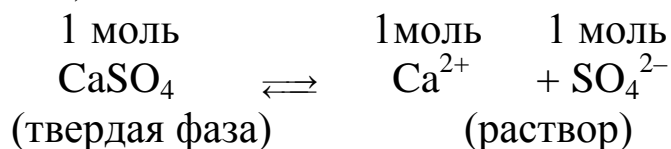
**Пример 1.** Произведение растворимости сульфата кальция  $3,7 \cdot 10^{-5}$ . Вычислите растворимость сульфата кальция в моль/дм<sup>3</sup> и г/дм<sup>3</sup>.

| <i>Д а н о:</i>   | <i>Р е ш е н и е:</i>   |
|---|---|
| $ПР(CaSO_4) = 3,7 \cdot 10^{-5}$<br>$S(\text{моль/дм}^3) - ?$<br>$S(\text{г/дм}^3) - ?$ | <p>Необходимо рассмотреть гетерогенное равновесие в насыщенном водном растворе труднорастворимой соли <math>CaSO_4</math>:</p> $CaSO_4 \rightleftharpoons Ca^{2+} + SO_4^{2-}$ <p>(твердая фаза)      (раствор)</p> |

Насыщенные растворы труднорастворимых электролитов, как правило, достаточно разбавлены. Поэтому межионными взаимодействиями можно пренебречь и считать, что произведение равновесных концентраций ионов, взятых в степенях, равных их стехиометрическим коэффициентам, при данной температуре есть величина постоянная, называемая произведением растворимости:

$$ПР(CaSO_4) = [Ca^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}].$$

Используя справочное значение произведения растворимости сульфата кальция, рассчитываем растворимость этой соли  $S$  (моль/дм<sup>3</sup>):



$$S = [Ca^{2+}] = [SO_4^{2-}]$$

$$ПР(CaSO_4) = [Ca^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}] = S^2, \text{ отсюда}$$



$$S = \sqrt{PP} = \sqrt{3,7 \cdot 10^{-5}} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3.$$

Выразим растворимость  $\text{CaSO}_4$  в г/дм<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} S(\text{г/дм}^3) &= S(\text{моль/дм}^3) \cdot M(\text{CaSO}_4) = \\ &= 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3 \cdot 136 \text{ г/моль} = 0,83 \text{ г/дм}^3. \end{aligned}$$

**Пример 2.** Определите, образуется ли осадок при сливании равных объемов водных растворов фторида натрия и хлорида кальция с молярной концентрацией растворенного вещества 0,1 моль/дм<sup>3</sup> и 0,002 моль/дм<sup>3</sup> соответственно.

**Дано:**

$$\begin{aligned} C(\text{NaF}) &= 0,1 \text{ моль/дм}^3 \\ C(\text{CaCl}_2) &= 0,002 \\ &\text{моль/дм}^3 \end{aligned}$$

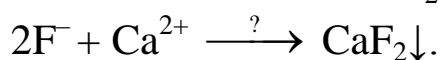
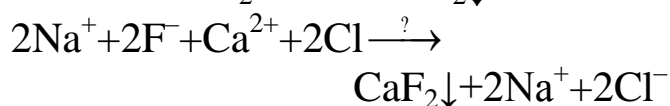
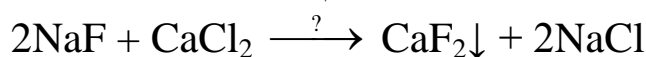
$$V_{p1} = V_{p2}$$

$$PP(\text{CaF}_2) = 4,0 \cdot 10^{-11}$$

Осадок – ?

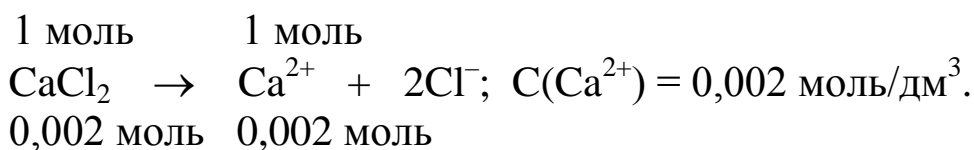
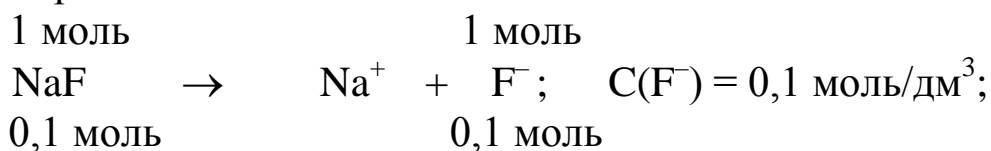
**Решение:**

Следует записать уравнение реакции:



Выпадение осадка труднорастворимого электролита из раствора происходит, когда произведение концентраций его ионов, взятых в степенях, равных стехиометрическим коэффициентам, превышает произведение растворимости данного вещества.

До сливания растворов молярные концентрации ионов  $\text{F}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$  равны:



После сливания общий объем раствора увеличивается в 2 раза, а концентрации ионов  $F^-$  и  $Ca^{2+}$  уменьшаются в 2 раза, следовательно:

$$C_1(F^-) = 0,05 \text{ моль/дм}^3; \quad C_1(Ca^{2+}) = 10^{-3} \text{ моль/дм}^3.$$

Необходимо найти произведение концентраций ионов  $F^-$  и  $Ca^{2+}$ , присутствующих в растворе, и сравнить его с  $ПР(CaF_2)$ :

$$C_1^2(F^-) \cdot C_1(Ca^{2+}) = (0,05)^2 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-6};$$

$2,5 \cdot 10^{-6} > 4,0 \cdot 10^{-11}$ , значит, осадок фторида кальция образуется.

### ***В. Индивидуальные задания***

**9.1.** Растворимость вещества X в воде при 20 °С равна  $s$ . Рассчитайте значение произведения растворимости вещества при указанной температуре.

|           | <b><i>Вещество (X)</i></b> | <b><i>s, моль/дм<sup>3</sup></i></b> |
|-----------|----------------------------|--------------------------------------|
| <b>01</b> | сульфат бария              | $1,5 \cdot 10^{-5}$                  |
| <b>02</b> | бромид меди(I)             | $5,0 \cdot 10^{-5}$                  |
| <b>03</b> | Ортофосфат серебра(I)      | $4,7 \cdot 10^{-6}$                  |
| <b>04</b> | гидроксид магния           | $1,0 \cdot 10^{-4}$                  |
| <b>05</b> | хромат серебра(I)          | $2,0 \cdot 10^{-4}$                  |
| <b>06</b> | карбонат никеля(II)        | $3,6 \cdot 10^{-4}$                  |
| <b>07</b> | сульфит бария              | $1,9 \cdot 10^{-5}$                  |
| <b>08</b> | карбонат цинка             | $3,0 \cdot 10^{-6}$                  |
| <b>09</b> | фторид свинца(II)          | $4,0 \cdot 10^{-3}$                  |
| <b>10</b> | бромид свинца(II)          | $1,3 \cdot 10^{-2}$                  |
| <b>11</b> | карбонат кальция           | $6,9 \cdot 10^{-5}$                  |
| <b>12</b> | бромид серебра(I)          | $8,0 \cdot 10^{-7}$                  |
| <b>13</b> | карбонат железа(II)        | $5,0 \cdot 10^{-6}$                  |
| <b>14</b> | сульфат серебра(I)         | $1,4 \cdot 10^{-2}$                  |
| <b>15</b> | фторид стронция            | $8,6 \cdot 10^{-4}$                  |
| <b>16</b> | хлорид свинца(II)          | $1,7 \cdot 10^{-2}$                  |
| <b>17</b> | иодид свинца(II)           | $2,0 \cdot 10^{-3}$                  |



|           | <i>Вещество (X)</i>   | <i>s, моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|-----------------------|-------------------------------|
| <b>18</b> | сульфид марганца(II)  | $1,6 \cdot 10^{-5}$           |
| <b>19</b> | карбонат кальция      | $6,9 \cdot 10^{-5}$           |
| <b>20</b> | карбонат кадмия       | $2,3 \cdot 10^{-6}$           |
| <b>21</b> | сульфат стронция      | $5,7 \cdot 10^{-4}$           |
| <b>22</b> | карбонат кобальта(II) | $4,0 \cdot 10^{-7}$           |
| <b>23</b> | карбонат никеля(II)   | $3,6 \cdot 10^{-4}$           |
| <b>24</b> | фторид бария          | $6,5 \cdot 10^{-3}$           |

**9.2.** Используя справочные значения произведений растворимости малорастворимых электролитов  $B_1$  и  $B_2$  при температуре 25 °С, рассчитайте молярные концентрации одноименных ионов  $X$  в насыщенных водных растворах этих электролитов (гидролизом пренебречь). Укажите, в растворе какого электролита концентрация ионов  $X$  выше и во сколько раз.

|           | <i>Электролит (<math>B_1</math>)</i><br><i>Электролит (<math>B_2</math>)</i> | <i>Ион (X)</i>     |
|-----------|--|--------------------|
| <b>01</b> | карбонат кальция<br>карбонат никеля(II)                                      | $\text{CO}_3^{2-}$ |
| <b>02</b> | карбонат кальция<br>сульфат кальция  | $\text{Ca}^{2+}$   |
| <b>03</b> | сульфат кальция<br>сульфат стронция  | $\text{SO}_4^{2-}$ |
| <b>04</b> | иодид серебра(I)<br>хромат серебра(I)  | $\text{Ag}^+$      |
| <b>05</b> | сульфат бария<br>сульфат кальция   | $\text{SO}_4^{2+}$ |
| <b>06</b> | хромат бария<br>фторид бария   | $\text{Ba}^{2+}$   |
| <b>07</b> | карбонат бария<br>карбонат магния  | $\text{CO}_3^{2-}$ |
| <b>08</b> | сульфид меди(II)<br>карбонат меди(II)  | $\text{Cu}^{2+}$   |
| <b>09</b> | сульфид свинца(II)   | $\text{S}^{2-}$    |



|           | <i>Электролит (B<sub>1</sub>)</i><br><i>Электролит (B<sub>2</sub>)</i> | <i>Ион (X)</i>                |
|-----------|--|-------------------------------|
|           | сульфид ртути(II)  |                               |
| <b>10</b> | хромат свинца(II)<br>хлорид свинца(II)                                 | Pb <sup>2+</sup>              |
| <b>11</b> | карбонат свинца(II)<br>карбонат стронция                               | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> |
| <b>12</b> | сульфид цинка<br>карбонат цинка  | Zn <sup>2+</sup>              |
| <b>13</b> | карбонат магния<br>фторид магния                                       | Mg <sup>2+</sup>              |
| <b>14</b> | карбонат кобальта(II)<br>карбонат железа(II)                           | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> |
| <b>15</b> | карбонат железа(II)<br>сульфид железа(II)                              | Fe <sup>2+</sup>              |
| <b>16</b> | иодид серебра(I)<br>иодид свинца(II)                                   | I <sup>-</sup>                |
| <b>17</b> | сульфид свинца(II)<br>сульфид олова(II)                                | S <sup>2-</sup>               |
| <b>18</b> | сульфат стронция<br>фторид стронция                                    | Sr <sup>2+</sup>              |
| <b>19</b> | сульфид олова(II)<br>иодид олова(II)                                   | Sn <sup>2+</sup>              |
| <b>20</b> | карбонат никеля(II)<br>сульфид никеля(II)                              | Ni <sup>2+</sup>              |
| <b>21</b> | карбонат кадмия<br>карбонат железа(II)                                 | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> |
| <b>22</b> | ортофосфат алюминия<br>ортофосфат магния                               | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |
| <b>23</b> | фторид кальция<br>фторид магния  | F <sup>-</sup>                |
| <b>24</b> | хромат серебра(I)<br>сульфат серебра(I)                                | Ag <sup>+</sup>               |

**9.3.** Произведения растворимости малорастворимых солей X<sub>1</sub> и X<sub>2</sub> при 25 °С соответственно равны ПР<sub>1</sub> и ПР<sub>2</sub>. Рас-





считайте растворимость этих солей в воде в моль/дм<sup>3</sup> и в г/дм<sup>3</sup> (гидролизом пренебречь).

|           | <i>Соль X<sub>1</sub></i><br><i>Соль X<sub>2</sub></i> | <i>ПР<sub>1</sub></i><br><i>ПР<sub>2</sub></i> |
|-----------|--|--|
| <b>01</b> | нитрит серебра(I)<br>карбонат серебра(I)               | $6,0 \cdot 10^{-4}$<br>$8,7 \cdot 10^{-12}$    |
| <b>02</b> | сульфат кальция<br>ортофосфат лития                    | $2,4 \cdot 10^{-5}$<br>$3,5 \cdot 10^{-9}$     |
| <b>03</b> | карбонат магния<br>фторид магния                       | $2,1 \cdot 10^{-5}$<br>$6,5 \cdot 10^{-9}$     |
| <b>04</b> | иодид серебра(I)<br>сульфид марганца(II)               | $8,3 \cdot 10^{-17}$<br>$2,5 \cdot 10^{-10}$   |
| <b>05</b> | сульфат бария<br>иодид свинца(II)                      | $1,1 \cdot 10^{-10}$<br>$1,1 \cdot 10^{-9}$    |
| <b>06</b> | бромид свинца(II)<br>карбонат стронция                 | $5,0 \cdot 10^{-5}$<br>$1,1 \cdot 10^{-10}$    |
| <b>07</b> | карбонат кальция<br>сульфид марганца(II)               | $4,8 \cdot 10^{-9}$<br>$2,5 \cdot 10^{-10}$    |
| <b>08</b> | бромид серебра(I)<br>карбонат серебра(I)               | $5,3 \cdot 10^{-13}$<br>$8,7 \cdot 10^{-12}$   |
| <b>09</b> | фторид магния<br>хлорид серебра(I)                     | $6,5 \cdot 10^{-9}$<br>$1,8 \cdot 10^{-10}$    |
| <b>10</b> | карбонат марганца(II)<br>иодид серебра(I)              | $4,9 \cdot 10^{-11}$<br>$8,3 \cdot 10^{-17}$   |
| <b>11</b> | иодид свинца(II)<br>карбонат железа(II)                | $1,1 \cdot 10^{-9}$<br>$2,9 \cdot 10^{-11}$    |
| <b>12</b> | карбонат никеля(II)<br>хромат кальция                  | $1,3 \cdot 10^{-7}$<br>$7,1 \cdot 10^{-4}$     |
| <b>13</b> | карбонат бария<br>фторид кальция                       | $5,1 \cdot 10^{-9}$<br>$4,0 \cdot 10^{-11}$    |
| <b>14</b> | сульфат стронция<br>фторид стронция                    | $2,1 \cdot 10^{-7}$<br>$2,5 \cdot 10^{-9}$     |
| <b>15</b> | карбонат кальция                                       | $4,8 \cdot 10^{-9}$                            |



|           |                     |                      |
|-----------|---------------------|----------------------|
|           | иодид свинца(II)    | $1,1 \cdot 10^{-9}$  |
| <b>16</b> | хромат бария        | $1,6 \cdot 10^{-10}$ |
|           | хромат свинца(II)   | $2,8 \cdot 10^{-13}$ |
| <b>17</b> | карбонат стронция   | $1,1 \cdot 10^{-10}$ |
|           | иодид свинца(II)    | $1,1 \cdot 10^{-9}$  |
| <b>18</b> | карбонат магния     | $2,1 \cdot 10^{-5}$  |
|           | фторид свинца(II)   | $2,7 \cdot 10^{-8}$  |
| <b>19</b> | сульфат стронция    | $2,1 \cdot 10^{-7}$  |
|           | фторид стронция     | $2,5 \cdot 10^{-9}$  |
| <b>20</b> | карбонат цинка      | $1,4 \cdot 10^{-11}$ |
|           | фторид кальция      | $4,0 \cdot 10^{-11}$ |
| <b>21</b> | хромат свинца(II)   | $2,8 \cdot 10^{-13}$ |
|           | фторид стронция     | $2,5 \cdot 10^{-9}$  |
| <b>22</b> | карбонат никеля(II) | $1,3 \cdot 10^{-7}$  |
|           | хлорид свинца(II)   | $1,6 \cdot 10^{-5}$  |
| <b>23</b> | сульфат свинца(II)  | $1,7 \cdot 10^{-8}$  |
|           | фторид магния       | $6,5 \cdot 10^{-9}$  |
| <b>24</b> | карбонат бария      | $5,1 \cdot 10^{-9}$  |
|           | фторид бария        | $1,7 \cdot 10^{-6}$  |

**9.4.** Рассчитайте, выпадет ли осадок, если смешать водный раствор вещества  $X_1$  с концентрацией  $C(X_1)$  объемом  $V_1$  и водный раствор вещества  $X_2$  с концентрацией  $C_{\text{экв}}(X_2)$  объемом  $V_2$ .

|           | <i>Вещество (<math>X_1</math>)</i><br><i>Вещество (<math>X_2</math>)</i> | $V_1, \text{дм}^3$<br>$V_2, \text{дм}^3$ | $C(X_1),$<br><i>моль/дм<sup>3</sup></i><br>$C_{\text{экв}}(X_2),$<br><i>моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|--|--|---|
| <b>01</b> | нитрат серебра(I)  | 2,0                                      | $1 \cdot 10^{-3}$   |
|           | хромат калия   | 1,0                                      | $2 \cdot 10^{-3}$   |
| <b>02</b> | фторид калия   | 1,0                                      | $1 \cdot 10^{-2}$   |
|           | нитрат магния  | 3,0                                      | $2 \cdot 10^{-3}$   |
| <b>03</b> | хлорид бария   | 0,1                                      | $1 \cdot 10^{-4}$   |
|           | хромат калия   | 0,5                                      | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| <b>04</b> | хромат калия   | 2,0                                      | $1 \cdot 10^{-5}$   |



|    | <i>Вещество (X<sub>1</sub>)</i><br><i>Вещество (X<sub>2</sub>)</i> | <i>V<sub>1</sub>, дм<sup>3</sup></i><br><i>V<sub>2</sub>, дм<sup>3</sup></i> | <i>C(X<sub>1</sub>),</i><br><i>моль/дм<sup>3</sup></i><br><i>C<sub>экв</sub>(X<sub>2</sub>),</i><br><i>моль/дм<sup>3</sup></i> |
|----|--|--|--|
|    | хлорид бария   | 3,0  | 4·10 <sup>-5</sup>   |
| 05 | хлорид бария   | 1,0  | 1·10 <sup>-2</sup>   |
|    | фторид калия   | 2,0  | 1·10 <sup>-8</sup>   |
| 06 | фторид калия   | 0,5  | 1·10 <sup>-2</sup>   |
|    | хлорид бария   | 0,8  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
| 07 | нитрат висмута(III)  | 0,2  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
|    | иодид калия  | 0,4  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
| 08 | нитрат серебра(I)  | 0,1  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
|    | иодид натрия   | 0,9  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
| 09 | хлорид кальция   | 1,5  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
|    | карбонат натрия  | 0,5  | 2·10 <sup>-4</sup>   |
| 10 | сульфат калия  | 0,4  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
|    | хлорид кальция   | 0,1  | 2·10 <sup>-4</sup>   |
| 11 | нитрат кальция   | 0,2  | 1·10 <sup>-3</sup>   |
|    | серная кислота   | 0,3  | 2·10 <sup>-2</sup>   |
| 12 | хлорид кальция   | 2,5  | 1·10 <sup>-3</sup>   |
|    | сульфат калия  | 0,5  | 2·10 <sup>-3</sup>   |
| 13 | нитрат серебра(I)  | 1,0  | 2·10 <sup>-2</sup>   |
|    | серная кислота   | 1,5  | 1·10 <sup>-1</sup>   |
| 14 | нитрат свинца(II)  | 0,5  | 1·10 <sup>-1</sup>   |
|    | хлорид натрия  | 0,4  | 4·10 <sup>-1</sup>   |
| 15 | хлорид натрия  | 2,0  | 1·10 <sup>-3</sup>   |
|    | нитрат серебра(I)  | 1,5  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
| 16 | сульфат калия  | 0,2  | 1·10 <sup>-2</sup>   |
|    | хлорид кальция   | 0,8  | 1·10 <sup>-2</sup>   |
| 17 | нитрат свинца(II)  | 0,1  | 2·10 <sup>-2</sup>   |
|    | хлорид натрия  | 0,2  | 1·10 <sup>-2</sup>   |
| 18 | хлорид бария   | 0,3  | 5·10 <sup>-3</sup>   |
|    | фторид калия   | 0,7  | 1·10 <sup>-2</sup>   |
| 19 | хромат калия   | 0,2  | 1·10 <sup>-3</sup>   |
|    | хлорид бария   | 0,1  | 1·10 <sup>-4</sup>   |
| 20 | хлорид стронция  | 1,0  | 2·10 <sup>-2</sup>   |



|           | <i>Вещество (<math>X_1</math>)</i><br><i>Вещество (<math>X_2</math>)</i> | $V_1, \text{дм}^3$<br>$V_2, \text{дм}^3$ | $C(X_1),$<br><i>моль/дм<sup>3</sup></i><br>$C_{\text{экв}}(X_2),$<br><i>моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|--|--|---|
|           | сульфат калия  | 0,4                                      | $4 \cdot 10^{-2}$   |
| <b>21</b> | нитрат магния  | 1,2                                      | $1 \cdot 10^{-1}$   |
|           | карбонат натрия  | 0,8                                      | $1 \cdot 10^{-2}$   |
| <b>22</b> | нитрат марганца(II)  | 0,4                                      | $4 \cdot 10^{-3}$   |
|           | сульфид натрия   | 1,0                                      | $6 \cdot 10^{-4}$   |
| <b>23</b> | иодид натрия   | 1,0                                      | $2 \cdot 10^{-3}$   |
|           | нитрат серебра(I)  | 2,0                                      | $2 \cdot 10^{-3}$   |
| <b>24</b> | сульфат калия  | 0,5                                      | $5 \cdot 10^{-2}$   |
|           | нитрат свинца(II)  | 0,3                                      | $2 \cdot 10^{-2}$   |



## 10. ИОННОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ ВОДЫ. ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ (pH)

### *А. Теоретическая часть*

Химически чистая вода является слабым электролитом. Процесс ее диссоциации можно описать упрощенным уравнением [4]:



Константа диссоциации воды при температуре 25 °С:

$$K_d = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} = 1,8 \cdot 10^{-16}. \quad (1)$$

Степень диссоциации воды очень мала ( $1,7 \cdot 10^{-9}$ ), поэтому равновесную молярную концентрацию молекул воды  $[\text{H}_2\text{O}]$  можно приравнять к общей концентрации воды:

$$[\text{H}_2\text{O}] = C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1000}{18 \cdot 1} = 55,5 \text{ моль/дм}^3.$$

Объединив постоянные величины в левой части уравнения (1) и обозначив их произведение  $K_{\text{H}_2\text{O}}$ , получается:

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = K_d \cdot [\text{H}_2\text{O}] = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-],$$

а при температуре 25 °С:

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 55,5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-16} = 10^{-14}.$$

В чистой воде, а также в любом водном растворе произведение равновесных молярных концентраций ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  – величина постоянная, называемая **ионным произведением воды**. Поэтому

– в чистой воде или нейтральном растворе:

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7} \text{ моль/дм}^3;$$

– в кислой среде:

$$[\text{H}^+] > 10^{-7} \text{ моль/дм}^3 \quad ([\text{OH}^-] < 10^{-7} \text{ моль/дм}^3);$$

– в щелочной среде:



$$[\text{H}^+] < 10^{-7} \text{ моль/дм}^3 \text{ } ([\text{OH}^-] > 10^{-7} \text{ моль/дм}^3).$$

Обычно для характеристики кислотности растворов принимают величину рН, называемую **водородным показателем**. рН определяют как отрицательный десятичный логарифм равновесной молярной концентрации ионов водорода:

$$\text{pH} = -\lg [\text{H}^+].$$

По аналогии определяют и **гидроксильный показатель**:

$$\text{pOH} = -\lg [\text{OH}^-].$$

Для любого водного раствора:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14.$$

Из сказанного следует, что в **нейтральных растворах**  $\text{pH} = \text{pOH} = 7$ . В **кислых растворах**  $\text{pH} < 7$ , а  $\text{pOH} > 7$ . Если же **реакция среды в растворе щелочная**, то  $\text{pH} > 7$ , а  $\text{pOH} < 7$ .

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Рассчитайте значения рН водных растворов:  
а) азотной кислоты с молярной концентрацией  $2 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>; б) гидроксида натрия с молярной концентрацией  $2,5 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>.

#### ***Решение:***

Для характеристики кислотности растворов применяют величину рН, водородный показатель:

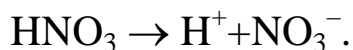
$$\text{pH} = -\lg [\text{H}^+].$$

По аналогии определяют и рОН:

$$\text{pOH} = -\lg [\text{OH}^-],$$

где  $[\text{H}^+]$  и  $[\text{OH}^-]$  – равновесные молярные концентрации ионов водорода и гидроксид-ионов;

а)  $\text{HNO}_3$  – сильный электролит. В растворе полностью диссоциирует на ионы:



Из 1 моль  $\text{HNO}_3$  образуется 1 моль  $\text{H}^+$ . Следовательно, молярная концентрация ионов  $\text{H}^+$  численно равна молярной концентрации  $\text{HNO}_3$  в растворе ( $2 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>). Тогда:

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg 2 \cdot 10^{-5} = -(\lg 2 + \lg 10^{-5}) = 4,7;$$

б) в растворе сильный электролит  $\text{NaOH}$  диссоциирован нацело:



1 моль  $\text{NaOH}$  дает 1 моль  $\text{OH}^-$ , следовательно, молярная концентрация ионов  $\text{OH}^-$  численно равна молярной концентрации  $\text{NaOH}$  в растворе ( $2,5 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>).

Находится величина  $\text{pOH}$ :

$$\text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-] = -\lg 2,5 \cdot 10^{-5} = -(\lg 2,5 + \lg 10^{-5}) = 4,6.$$

Затем рассчитывается значение  $\text{pH}$ :

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14;$$

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 - 4,6 = 9,4.$$

**Пример 2.** Вычислите  $\text{pH}$  водных растворов: а) уксусной кислоты с молярной концентрацией 0,02 моль/дм<sup>3</sup>; б) гидроксида аммония с молярной концентрацией 0,01 моль/дм<sup>3</sup>.

**Решение:**

Для расчета используем формулы:

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] \quad \text{и} \quad \text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-];$$

а)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  – слабый электролит. В растворе частично диссоциирует на ионы:



Определяется степень диссоциации ( $\alpha$ ) уксусной кислоты в указанном растворе:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_d(\text{CH}_3\text{COOH})}{C(\text{CH}_3\text{COOH})}}.$$

При подставлении значения  $K_d(\text{CH}_3\text{COOH}) = 1,8 \cdot 10^{-5}$  и  $C(\text{CH}_3\text{COOH}) = 0,02$  моль/дм<sup>3</sup>, получается:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^{-5}}{0,02}} = 3 \cdot 10^{-2}.$$





Далее находится равновесная молярная концентрация катионов водорода  $[H^+]$  и значение pH:

$$[H^+] = \alpha \cdot C(CH_3COOH) = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,02 \text{ моль/дм}^3 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3;$$

$$pH = -\lg[H^+] = -\lg 6 \cdot 10^{-4} = -(\lg 6 + \lg 10^{-4}) = 3,22;$$

б)  $NH_4OH$  – слабый электролит. Записывается уравнение его электролитической диссоциации:



Вычисляется степень диссоциации  $NH_4OH$  при использовании значений  $K_d(NH_4OH) = 1,8 \cdot 10^{-5}$  и  $C(NH_4OH) = 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>,

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_d(NH_4OH)}{C(NH_4OH)}} = \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^{-5}}{0,01}} = 4,24 \cdot 10^{-2}.$$

Тогда равновесная молярная концентрация гидроксид-ионов равна:

$$[OH^-] = \alpha \cdot C(NH_4OH) = 4,24 \cdot 10^{-2} \cdot 0,01 \text{ моль/дм}^3 = 4,24 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3.$$

Рассчитываются значения pOH и pH:

$$pOH = -\lg[OH^-] = -\lg 4,24 \cdot 10^{-4} = -(\lg 4,24 + \lg 10^{-4}) = 3,37;$$

$$pH = 14 - pOH = 14 - 3,37 = 10,63.$$

## ***В. Индивидуальные задания***

**10.1.** Рассчитайте pH водного раствора с известной равновесной молярной концентрацией гидроксид-ионов.

|           | $[OH^-], \text{ моль/дм}^3$ |           | $[OH^-], \text{ моль/дм}^3$ |
|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| <b>01</b> | $2,6 \cdot 10^{-3}$         | <b>13</b> | $8,2 \cdot 10^{-4}$         |
| <b>02</b> | $1,8 \cdot 10^{-7}$         | <b>14</b> | $9,4 \cdot 10^{-8}$         |
| <b>03</b> | $4,9 \cdot 10^{-10}$        | <b>15</b> | $1,4 \cdot 10^{-5}$         |
| <b>04</b> | $1,5 \cdot 10^{-4}$         | <b>16</b> | $2,8 \cdot 10^{-9}$         |
| <b>05</b> | $3,2 \cdot 10^{-11}$        | <b>17</b> | $7,3 \cdot 10^{-6}$         |
| <b>06</b> | $8,1 \cdot 10^{-7}$         | <b>18</b> | $4,6 \cdot 10^{-10}$        |
| <b>07</b> | $6,3 \cdot 10^{-8}$         | <b>19</b> | $1,8 \cdot 10^{-4}$         |



|           | $[\text{OH}^-]$ , моль/дм <sup>3</sup> |           | $[\text{OH}^-]$ , моль/дм <sup>3</sup> |
|-----------|--|-----------|--|
| <b>08</b> | $2,4 \cdot 10^{-5}$                    | <b>20</b> | $3,5 \cdot 10^{-7}$                    |
| <b>09</b> | $7,5 \cdot 10^{-3}$                    | <b>21</b> | $6,4 \cdot 10^{-11}$                   |
| <b>10</b> | $4,2 \cdot 10^{-12}$                   | <b>22</b> | $2,5 \cdot 10^{-5}$                    |
| <b>11</b> | $1,3 \cdot 10^{-9}$                    | <b>23</b> | $8,7 \cdot 10^{-12}$                   |
| <b>12</b> | $5,6 \cdot 10^{-2}$                    | <b>24</b> | $4,5 \cdot 10^{-8}$                    |

**10.2.** Вычислите рН и рОН водного раствора с заданной концентрацией растворенного вещества X.

|           | <i>Растворенное<br/>вещество (X)</i> | <i>Концентрация,<br/>моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|--------------------------------------|--|
| <b>01</b> | гидроксид бария                      | $C(X) = 0,005$                               |
| <b>02</b> | гидроксид калия                      | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,004$                  |
| <b>03</b> | азотная кислота                      | $C(X) = 0,006$                               |
| <b>04</b> | серная кислота                       | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,001$                  |
| <b>05</b> | хлороводород                         | $C(X) = 0,002$                               |
| <b>06</b> | серная кислота                       | $C(X) = 0,005$                               |
| <b>07</b> | азотная кислота                      | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,0002$                 |
| <b>08</b> | хлорная кислота                      | $C(X) = 0,002$                               |
| <b>09</b> | гидроксид цезия                      | $C(X) = 0,005$                               |
| <b>10</b> | иодоводород                          | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,006$                  |
| <b>11</b> | гидроксид натрия                     | $C(X) = 0,001$                               |
| <b>12</b> | гидроксид стронция                   | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,002$                  |
| <b>13</b> | азотная кислота                      | $C(X) = 0,003$                               |
| <b>14</b> | серная кислота                       | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,002$                  |
| <b>15</b> | гидроксид бария                      | $C(X) = 0,025$                               |
| <b>16</b> | азотная кислота                      | $C(X) = 0,015$                               |
| <b>17</b> | гидроксид бария                      | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,004$                  |
| <b>18</b> | гидроксид натрия                     | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,002$                  |
| <b>19</b> | гидроксид стронция                   | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,006$                  |
| <b>20</b> | гидроксид натрия                     | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,001$                  |
| <b>21</b> | серная кислота                       | $C(X) = 0,025$                               |
| <b>22</b> | гидроксид калия                      | $C(X) = 0,025$                               |
| <b>23</b> | хлороводород                         | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,003$                  |
| <b>24</b> | азотная кислота                      | $C_{\text{ЭКВ}}(X) = 0,005$                  |



**10.3.** Степень диссоциации электролита X в водном растворе с концентрацией  $C(X)$  равна  $\alpha_d$ . Рассчитайте pH этого раствора.

|    | <i>Электролит (X)</i>   | <i><math>C(X)</math>,<br/>моль/дм<sup>3</sup></i> | <i><math>\alpha_d</math>,<br/>%</i> |
|----|-------------------------|---|-------------------------------------|
| 01 | фтороводородная кислота | 0,1   | 8,12                                |
| 02 | азотистая кислота       | 0,2   | 4,47                                |
| 03 | бромноватистая кислота  | 0,5   | 0,006                               |
| 04 | хлорноватистая кислота  | 0,02  | 0,16                                |
| 05 | циановодородная кислота | 0,001   | 0,089                               |
| 06 | муравьиная кислота      | 0,1   | 4,24                                |
| 07 | уксусная кислота        | 0,25  | 0,85                                |
| 08 | гидроксид аммония       | 0,03  | 2,45                                |
| 09 | фтороводородная кислота | 0,2   | 5,74                                |
| 10 | азотистая кислота       | 0,1   | 6,32                                |
| 11 | бромноватистая кислота  | 0,3   | 0,008                               |
| 12 | хлорноватистая кислота  | 0,05  | 0,1                                 |
| 13 | циановодородная кислота | 0,002   | 0,063                               |
| 14 | муравьиная кислота      | 0,25  | 2,68                                |
| 15 | уксусная кислота        | 0,05  | 1,9                                 |
| 16 | гидроксид аммония       | 0,15  | 1,1                                 |
| 17 | фтороводородная кислота | 0,01  | 25,7                                |
| 18 | азотистая кислота       | 0,4   | 3,16                                |
| 19 | бромноватистая кислота  | 0,2   | 0,032                               |
| 20 | хлорноватистая кислота  | 0,001   | 0,71                                |
| 21 | циановодородная кислота | 0,0005  | 0,13                                |
| 22 | муравьиная кислота      | 0,4   | 2,12                                |
| 23 | уксусная кислота        | 0,2   | 0,95                                |
| 24 | гидроксид аммония       | 0,08  | 1,5                                 |

**10.4.** Вычислите pH водного раствора электролита X, если массовая доля электролита равна  $\omega(X)$ , а плотность раствора  $\rho$ .



|    | <i>Электролит (X)</i>   | $\omega(X), \%$ | $\rho, \text{г/см}^3$ |
|----|-------------------------|-----------------|-----------------------|
| 01 | гидроксид аммония       | 5               | 0,977                 |
| 02 | уксусная кислота        | 7               | 1,008                 |
| 03 | фтороводородная кислота | 2               | 1,005                 |
| 04 | циановодородная кислота | 84              | 0,745                 |
| 05 | муравьиная кислота      | 14              | 1,035                 |
| 06 | фтороводородная кислота | 6               | 1,021                 |
| 07 | гидроксид аммония       | 7               | 0,969                 |
| 08 | циановодородная кислота | 90              | 0,724                 |
| 09 | уксусная кислота        | 12              | 1,015                 |
| 10 | муравьиная кислота      | 6               | 1,014                 |
| 11 | гидроксид аммония       | 12              | 0,950                 |
| 12 | фтороводородная кислота | 4               | 1,012                 |
| 13 | уксусная кислота        | 8               | 1,010                 |
| 14 | циановодородная кислота | 80              | 0,759                 |
| 15 | гидроксид аммония       | 3               | 0,985                 |
| 16 | фтороводородная кислота | 6               | 1,021                 |
| 17 | уксусная кислота        | 9               | 1,011                 |
| 18 | фтороводородная кислота | 8               | 1,028                 |
| 19 | муравьиная кислота      | 10              | 1,025                 |
| 20 | гидроксид аммония       | 8               | 0,965                 |
| 21 | уксусная кислота        | 10              | 1,013                 |
| 22 | фтороводородная кислота | 10              | 1,036                 |
| 23 | гидроксид аммония       | 6               | 0,973                 |
| 24 | муравьиная кислота      | 12              | 1,030                 |

**10.5.** Водный раствор вещества X имеет указанное значение pH. Рассчитайте молярную концентрацию вещества X в растворе.

|    | <i>Вещество (X)</i> | <i>pH</i> |
|----|---------------------|-----------|
| 01 | хлорная кислота     | 4,1       |
| 02 | гидроксид бария     | 10,3      |
| 03 | серная кислота      | 3,1       |
| 04 | гидроксид калия     | 9,9       |



|           | <i><b>Вещество (X)</b></i> | <i><b>pH</b></i> |
|-----------|----------------------------|------------------|
| <b>05</b> | хлороводородная кислота    | 3,7              |
| <b>06</b> | азотная кислота            | 4,2              |
| <b>07</b> | гидроксид натрия           | 10,9             |
| <b>08</b> | гидроксид бария            | 5,1              |
| <b>09</b> | хлорная кислота            | 3,9              |
| <b>10</b> | гидроксид бария            | 10,7             |
| <b>11</b> | серная кислота             | 2,9              |
| <b>12</b> | гидроксид калия            | 10,2             |
| <b>3</b>  | хлороводородная кислота    | 2,7              |
| <b>14</b> | азотная кислота            | 3,4              |
| <b>15</b> | гидроксид натрия           | 11,2             |
| <b>16</b> | бромоводородная кислота    | 4,5              |
| <b>17</b> | хлорная кислота            | 2,8              |
| <b>18</b> | гидроксид бария            | 11,0             |
| <b>19</b> | серная кислота             | 4,3              |
| <b>20</b> | гидроксид калия            | 10,6             |
| <b>21</b> | хлороводородная кислота    | 3,6              |
| <b>22</b> | азотная кислота            | 2,5              |
| <b>23</b> | гидроксид натрия           | 9,9              |
| <b>24</b> | бромоводородная кислота    | 3,3              |



## 11. ГИДРОЛИЗ СОЛЕЙ

### *А. Теоретическая часть*

**Гидролиз** – это реакция ионного обмена между ионами соли и молекулами воды, сопровождающаяся образованием труднорастворимых и газообразных веществ (необратимый гидролиз) или малодиссоциированных частиц слабых электролитов (обратимый гидролиз) и, как правило, изменением pH [2, 4]. Характер процесса гидролиза зависит от природы кислоты и основания, от которых образована соль.

Целесообразно в первую очередь выделить **соли, образованные сильным основанием и сильной кислотой** ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaClO}_4$ ,  $\text{BaCl}_2$  и др.), которые **в водных растворах гидролизу не подвергаются**. Реакция среды раствора нейтральная,  $\text{pH} = 7$ .

Следует рассмотреть возможные случаи обратимого гидролиза.

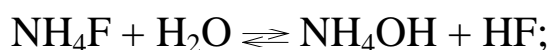
I. Соли, образованные **слабой кислотой и сильным основанием, гидролизуются по аниону** (An), в продуктах гидролиза – слабая одноосновная кислота или кислая соль слабой многоосновной кислоты, реакция среды щелочная,  $\text{pH} > 7$ .

II. Соли, образованные **слабым основанием и сильной кислотой, гидролизуются по катиону** (Kt), в продуктах гидролиза – слабое однокислотное основание или основная соль слабого многокислотного основания, реакция среды кислая,  $\text{pH} < 7$ .

III. Соли, образованные **слабым основанием и слабой кислотой, гидролизуются и по аниону, и по катиону**.

В качестве примера следует рассмотреть гидролиз в водном растворе фторида аммония. Эта соль образована слабым однокислотным основанием  $\text{NH}_4\text{OH}$  и слабой одноосновной кислотой HF.

Гидролизу  $\text{NH}_4\text{F}$  соответствуют следующие молекулярное и ионно-молекулярное уравнения:





Этот случай отличается тем, что **в правой части уравнения** находятся **два слабых электролита**. Поэтому, чтобы определить реакцию среды, необходимо сравнить константы диссоциации кислоты и основания:

$$K_{\text{д}}(\text{HF}) = 6,7 \cdot 10^{-4} > K_{\text{д}}(\text{NH}_4\text{OH}) = 1,8 \cdot 10^{-5}.$$

Отсюда следует, что реакция среды водного раствора  $\text{NH}_4\text{F}$  является **слабокислой**.

Количественно процесс обратимого гидролиза характеризуется константой гидролиза ( $K_{\text{г}}$ ) и степенью гидролиза ( $\alpha_{\text{г}}$ ). Например,

$$K_{\text{г}} = \frac{[\text{HF}] \cdot K_{\text{H}_2\text{O}}}{[\text{F}^-][\text{H}^+]} = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}}}{K_{\text{д}}(\text{HF})};$$

$$K_{\text{г}} = \frac{[\text{NH}_4\text{OH}] \cdot K_{\text{H}_2\text{O}}}{[\text{NH}_4^+][\text{OH}^-]} = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}}}{K_{\text{д}}(\text{NH}_4\text{OH})}.$$

Константа гидролиза соли сильного основания и слабой одноосновной кислоты равна отношению ионного произведения воды  $K_{\text{H}_2\text{O}}$  к константе диссоциации слабой кислоты, а константа гидролиза соли сильной кислоты и слабого одно-кислотного основания – отношению  $K_{\text{H}_2\text{O}}$  к константе диссоциации слабого основания.

Константа гидролиза фторида аммония имеет вид:

$$K_{\text{г}} = \frac{[\text{HF}][\text{NH}_4\text{OH}]}{[\text{F}^-][\text{NH}_4^+]} = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}}}{K_{\text{д}}(\text{HF}) \cdot K_{\text{д}}(\text{NH}_4\text{OH})},$$

т. е. константа гидролиза соли слабого однокислотного основания и слабой одноосновной кислоты равна отношению ионного произведения воды к произведению их констант диссоциации.

В случае I ступени гидролиза солей, образованных сильным основанием и слабой многоосновной кислотой ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) или сильной кислотой и слабым многокислотным основанием ( $\text{CuSO}_4$ ), соответствующие константы гидролиза определяются значением последней  $K_{\text{д}}$  слабой многоосновной кис-





лоты или слабого многокислотного основания. Для карбоната натрия и сульфата меди (II) имеем:

$$K_r = \frac{K_{H_2O}}{K_{D_2}(H_2CO_3)}; \quad K_r = \frac{K_{H_2O}}{K_{D_2}(Cu(OH)_2)}.$$

Следовательно, чем слабее кислота (основание), соль которой (которого) подвергается гидролизу, тем полнее он протекает. Константа гидролиза соли является величиной постоянной при данной температуре.

**Степень гидролиза соли ( $\alpha_r$ )** характеризует глубину протекания процесса гидролиза. Она равна отношению количества вещества соли, подвергшейся гидролизу, к общему количеству растворенной соли.

Константа гидролиза ( $K_r$ ) и степень гидролиза ( $\alpha_r$ ) связаны между собой выражением, аналогичным закону разбавления Оствальда:

$$K_r = \frac{\alpha_r^2}{1 - \alpha_r} \cdot C(\text{соли}).$$

При малых значениях степени гидролиза, когда  $\alpha_r \ll 1$  и  $(1 - \alpha_r) \approx 1$ , формула принимает вид:

$$K_r = \alpha_r^2 \cdot C(\text{соли}) \quad \text{или} \quad \alpha_r = \sqrt{K_r / C(\text{соли})}.$$

Из этих уравнений следует, что **степень гидролиза соли зависит от концентрации раствора:**

- $\alpha_r$  уменьшается с повышением концентрации соли;
- $\alpha_r$  увеличивается при разбавлении раствора (уменьшении концентрации) и в пределе стремится к единице.

**С увеличением температуры раствора и константа гидролиза, и степень гидролиза возрастают, поскольку гидролиз – процесс эндотермический.**

Из вышесказанного следует, что усилению гидролиза способствует разбавление раствора соли, увеличение температуры, а также введение в раствор сильных кислот (гидролиз по An) или сильных оснований (гидролиз по Kt).



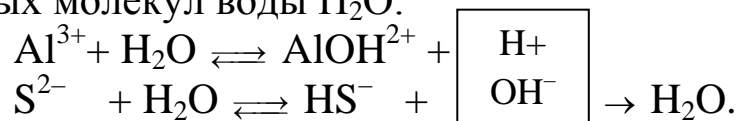
## Б. Примеры решения типовых задач

**Пример 1.** Объясните, почему при сливании водных растворов хлорида алюминия и сульфида натрия в осадок выпадает гидроксид алюминия. Напишите молекулярное и ионно-молекулярное уравнения протекающей реакции.

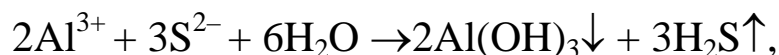
**Решение:**

В водных растворах  $\text{AlCl}_3$  и  $\text{Na}_2\text{S}$ , взятых порознь, процесс гидролиза практически останавливается на первой ступени.

Если смешать растворы этих солей, то ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  взаимодействуют между собой с образованием малодиссоциированных молекул воды  $\text{H}_2\text{O}$ .



Это, в соответствии с принципом Ле Шателье, приводит к взаимному усилению гидролиза, смещает оба равновесия гидролиза солей вправо и приводит к образованию осадка амфотерного гидроксида алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$ :



молекулярное уравнение реакции:



**Пример 2.** Вычислите pH водных растворов:

- а) хлорида аммония с молярной концентрацией  $0,01 \text{ моль/дм}^3$ ;
- б) ацетата натрия с молярной концентрацией  $0,05 \text{ моль/дм}^3$ .

**Решение:**

а) хлорид аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – соль, образованная **слабым основанием** и сильной кислотой, в водном растворе обратимо гидролизует **по катиону**. При этом в растворе устанавливается равновесие:  $\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}^+$ ,



из которого следует, что в нем накапливаются ионы водорода  $H^+$ .

При определении pH раствора гидролизующейся соли используется степень гидролиза ( $\alpha_r$ ) и константа гидролиза ( $K_r$ ).

Степень гидролиза (доля молекул соли, подвергшихся гидролизу) связана с константой гидролиза соотношением:

$$K_r = \frac{\alpha_r^2}{1 - \alpha_r} \cdot C(\text{соли}),$$

где  $C(\text{соли})$  – молярная концентрация соли в растворе.

Если  $\alpha_r \ll 1$  и  $(1 - \alpha_r) \approx 1$ , то

$$K_r = C(\text{соли}) \cdot \alpha_r^2 \quad \text{или} \quad \alpha_r = \sqrt{K_r / C(X)}.$$

Для вычисления водородного показателя (pH) раствора  $NH_4Cl$  определяется равновесная молярная концентрация ионов водорода  $[H^+]$ , учитывая, что в результате гидролиза 1 моль  $NH_4^+$  образуется 1 моль  $H^+$ . Следовательно, если исходная молярная концентрация ионов аммония:

$$C(NH_4^+) = C(NH_4Cl) = 0,01 \text{ моль/дм}^3,$$

то концентрация прогидролизовавшихся  $NH_4^+$  и образовавшихся ионов водорода –  $\alpha_r \cdot 0,01$ , т. е.

$$[H^+] = \alpha_r \cdot C(NH_4Cl).$$

Чтобы найти  $\alpha_r$ , вычисляется константа гидролиза  $NH_4Cl$

по формуле:

$$K_r = \frac{K_{H_2O}}{K_d(NH_4OH)} = \frac{10^{-14}}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 5,55 \cdot 10^{-10}, \text{ где}$$

$K_d(NH_4OH) = 1,8 \cdot 10^{-5}$ , а  $K_{H_2O}$  – ионное произведение воды, равное  $10^{-14}$ .

Тогда

$$\alpha_r = \sqrt{\frac{K_r}{C(NH_4Cl)}} = \sqrt{\frac{5,55 \cdot 10^{-10}}{0,01}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ и}$$

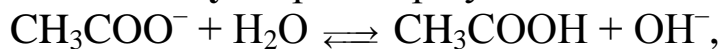
$$[H^+] = \alpha_r \cdot C(NH_4Cl) = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,01 \text{ моль/дм}^3 = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3.$$

Находится значение pH:

$$pH = -\lg[H^+] = -\lg 2,4 \cdot 10^{-6} = 5,62;$$



б) ацетат натрия  $\text{CH}_3\text{COONa}$  – соль сильного основания и **слабой кислоты**. Такая соль в водном растворе обратимо гидролизуеться **по аниону**. В растворе устанавливается равновесие:



из которого следует, что в нем накапливаются гидроксид-ионы.

При определении pH этого раствора необходимо действовать поэтапно, как в предыдущем примере. Из ионно-молекулярного уравнения реакции гидролиза следует, что

$$[\text{OH}^-] = \alpha_r \cdot C(\text{CH}_3\text{COONa}).$$

Чтобы найти  $\alpha_r$ , рассчитывается константа гидролиза  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , с использованием значения  $K_d(\text{CH}_3\text{COOH}) = 1,8 \cdot 10^{-5}$ :

$$K_r = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}}}{K_d(\text{CH}_3\text{COOH})} = \frac{10^{-14}}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 5,55 \cdot 10^{-10}.$$

Тогда 
$$\alpha_r = \sqrt{\frac{K_r}{C(\text{CH}_3\text{COONa})}}.$$

Подставляется выражение  $\alpha_r$ , получается:

$$\begin{aligned} [\text{OH}^-] &= \alpha_r \cdot C(\text{CH}_3\text{COONa}) = \sqrt{\frac{K_r}{C(\text{CH}_3\text{COONa})}} \cdot C(\text{CH}_3\text{COONa}) = \\ &= \sqrt{K_r \cdot C(\text{CH}_3\text{COONa})} = 5,27 \cdot 10^{-6} \left[ \text{моль/дм}^3 \right]. \end{aligned}$$

Далее находятся значения pOH и pH:

$$\text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-] = -\lg 5,27 \cdot 10^{-6} = 5,28.$$

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH}; \quad \text{pH} = 14 - 5,28 = 8,72.$$

### ***В. Индивидуальные задания***

**11.1.** А. Укажите, какие из приведенных солей подвергаются гидролизу. Б. Для каждой из гидролизующихся солей напишите уравнение гидролиза в молекулярной и ионно-молекулярной формах. В. Укажите реакцию среды водного раствора соли (кислая, щелочная, нейтральная).



|    |   |
|----|---|
| 01 | NaCN, KClO <sub>4</sub> , CuCl <sub>2</sub>   |
| 02 | NaNO <sub>2</sub> , KNO <sub>3</sub> , AlCl <sub>3</sub>  |
| 03 | KClO, Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , KMnO <sub>4</sub>   |
| 04 | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , KCl, CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub>                               |
| 05 | CuBr <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                    |
| 06 | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CuSO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> S                                 |
| 07 | Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub>   |
| 08 | Be(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , FeBr <sub>3</sub> , LiCl  |
| 09 | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , KI                                |
| 10 | K <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , NaI                  |
| 11 | NaBr, NiSO <sub>4</sub> , KCN   |
| 12 | KBr, Na <sub>2</sub> S, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                                 |
| 13 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub>                  |
| 14 | K <sub>2</sub> Se, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CuSO <sub>4</sub> ,                                |
| 15 | ZnCl <sub>2</sub> , NaClO, LiNO <sub>3</sub>  |
| 16 | LiCl, Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , NaF   |
| 17 | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> F |
| 18 | Na <sub>2</sub> S, NiCl <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                   |
| 19 | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , BaCl <sub>2</sub>                  |
| 20 | KNO <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> , FeCl <sub>3</sub>                               |
| 21 | SnCl <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>                   |
| 22 | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , MgCl <sub>2</sub> , NaNO <sub>2</sub>                                  |
| 23 | Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>                  |
| 24 | K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , FeSO <sub>4</sub> , NaBrO                               |

**11.2.** Напишите молекулярное и ионно-молекулярное уравнения реакции, протекающей при сливании водных растворов солей 1 и 2.

|    | <i>Соль<sub>1</sub></i> | <i>Соль<sub>2</sub></i> |
|----|-------------------------|-------------------------|
| 01 | нитрат железа(III)      | карбонат калия          |
| 02 | сульфид натрия          | сульфат алюминия        |
| 03 | бромид хрома(III)       | карбонат натрия         |
| 04 | сульфид аммония         | хлорид алюминия         |
| 05 | сульфат железа(III)     | карбонат калия          |
| 06 | сульфид калия           | нитрат хрома(III)       |



|           |                    |                    |
|-----------|--------------------|--------------------|
| <b>07</b> | бромид алюминия    | карбонат натрия    |
| <b>08</b> | карбонат натрия    | сульфат меди(II)   |
| <b>09</b> | нитрат алюминия    | сульфид аммония    |
| <b>10</b> | карбонат калия     | хлорид хрома(III)  |
| <b>11</b> | сульфид натрия     | бромид алюминия    |
| <b>12</b> | хлорид железа(III) | карбонат натрия    |
| <b>13</b> | нитрат алюминия    | сульфид натрия     |
| <b>14</b> | сульфат хрома(III) | карбонат калия     |
| <b>15</b> | сульфид аммония    | бромид алюминия    |
| <b>16</b> | нитрат хрома(III)  | карбонат натрия    |
| <b>17</b> | карбонат калия     | бромид железа(III) |
| <b>18</b> | хлорид алюминия    | сульфид натрия     |
| <b>19</b> | сульфид калия      | сульфат хрома(III) |
| <b>20</b> | нитрат алюминия    | карбонат калия     |
| <b>21</b> | хлорид хрома(III)  | сульфид натрия     |
| <b>22</b> | сульфат алюминия   | сульфид аммония    |
| <b>23</b> | карбонат натрия    | хлорид алюминия    |
| <b>24</b> | хлорид меди(II)    | карбонат калия     |

**11.3.** Используя справочные данные, рассчитайте степень гидролиза соли X и pH ее водного раствора заданной молярной концентрации  $C(X)$  (учесть только первую ступень гидролиза).

|           | <i>Соль (X)</i>    | <i><math>C(X)</math>,<br/>моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|--------------------|---|
| <b>01</b> | хлорид алюминия    | 0,2   |
| <b>02</b> | ортофосфат натрия  | 0,5   |
| <b>03</b> | нитрат меди(II)    | 0,1   |
| <b>04</b> | хлорид железа(II)  | 0,05  |
| <b>05</b> | карбонат калия     | 0,3   |
| <b>06</b> | нитрат свинца(II)  | 0,05  |
| <b>07</b> | сульфит натрия     | 0,01  |
| <b>08</b> | хлорид хрома(III)  | 0,5   |
| <b>09</b> | метасиликат натрия | 0,2   |
| <b>10</b> | нитрат цинка       | 0,1   |



|           | <i>Соль (X)</i>     | <i>C(X),<br/>моль/дм<sup>3</sup></i> |
|-----------|---------------------|--------------------------------------|
| <b>11</b> | хлорид железа(III)  | 0,5                                  |
| <b>12</b> | ортофосфат калия    | 0,8                                  |
| <b>13</b> | нитрат аммония      | 0,01                                 |
| <b>14</b> | ацетат калия        | 0,02                                 |
| <b>15</b> | бромид марганца(II) | 0,001                                |
| <b>16</b> | фторид калия        | 0,001                                |
| <b>17</b> | сульфат цинка       | 0,1                                  |
| <b>18</b> | нитрит натрия       | 0,001                                |
| <b>19</b> | сульфат аммония     | 0,005                                |
| <b>20</b> | бромид никеля(II)   | 0,001                                |
| <b>21</b> | сульфит калия       | 0,02                                 |
| <b>22</b> | гипохлорит натрия   | 0,01                                 |
| <b>23</b> | сульфат алюминия    | 0,3                                  |
| <b>24</b> | цианид натрия       | 0,2                                  |

**11.4.** А. Напишите уравнения гидролиза солей  $X_1$  и  $X_2$ . Б. Используя справочные данные, определите, в водном растворе какой соли (при одинаковых температуре и концентрации) степень гидролиза больше. В. Укажите, значение pH раствора какой соли будет меньше? Г. Как изменится степень гидролиза соли: 1) при нагревании раствора; 2) при разбавлении раствора. Дайте обоснованный ответ.

|           | <i>Соль (<math>X_1</math>)</i> | <i>Соль (<math>X_2</math>)</i> |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>01</b> | хлорид железа(II)              | хлорид железа(III)             |
| <b>02</b> | карбонат натрия                | силикат натрия                 |
| <b>03</b> | нитрат бериллия                | нитрат магния                  |
| <b>04</b> | сульфид натрия                 | селенид натрия                 |
| <b>05</b> | хлорид алюминия                | хлорид хрома(III)              |
| <b>06</b> | карбонат натрия                | карбонат натрия                |
| <b>07</b> | сульфит калия                  | селенит калия                  |
| <b>08</b> | хлорид цинка                   | хлорид железа(II)              |
| <b>09</b> | сульфит натрия                 | карбонат натрия                |
| <b>10</b> | сульфат меди(II)               | сульфат никеля(II)             |





|           | <i>Соль (X<sub>1</sub>)</i> | <i>Соль (X<sub>2</sub>)</i> |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>11</b> | фторид калия                | цианид калия                |
| <b>12</b> | фосфат натрия               | арсенат натрия              |
| <b>13</b> | нитрит калия                | гипохлорит калия            |
| <b>14</b> | нитрат железа(II)           | нитрат меди(II)             |
| <b>15</b> | бромид железа(III)          | бромид алюминия             |
| <b>16</b> | метасиликат калия           | карбонат калия              |
| <b>17</b> | ацетат натрия               | гипохлорит натрия           |
| <b>18</b> | сульфат железа(III)         | сульфат железа(II)          |
| <b>19</b> | хлорид цинка                | хлорид кадмия               |
| <b>20</b> | нитрат магния               | нитрат железа(II)           |
| <b>21</b> | теллурид натрия             | сульфид натрия              |
| <b>22</b> | сульфат хрома(III)          | сульфат алюминия            |
| <b>23</b> | цианид натрия               | нитрит натрия               |
| <b>24</b> | нитрат кобальта(II)         | нитрат никеля(II)           |



## 12. КОЛЛОИДНО-ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ

### *А. Теоретическая часть*

Коллоидно-дисперсная система – это система, в которой хотя бы одно вещество находится в коллоидном состоянии, т. е. раздроблено до очень маленьких частиц ( $10^{-9} - 10^{-7}$  м), невидимых в оптический микроскоп, но являющихся самостоятельной термодинамической фазой [8]. Для коллоидно-дисперсных систем характерны два общих признака: **гетерогенность** и **дисперсность**.

**Гетерогенность** (или **многофазность**) означает, что система состоит как минимум из двух фаз. Гетерогенность является признаком, указывающим на наличие межфазной поверхности – границы раздела двух фаз.

**Дисперсность** (или **раздробленность**) означает, что одна из фаз является раздробленной, ее называют **дисперсной фазой**. Сплошную фазу, в которой распределена дисперсная фаза, называют **дисперсионной средой**. Мерой дисперсности является величина **удельной поверхности**  $S_{уд}$  и величина **дисперсности**  $D$ .

**Дисперсность** ( $D, м^{-1}$ ) – это величина, обратная минимальному размеру частиц дисперсной фазы. Если частицы имеют сферическую форму, то дисперсность обратно пропорциональна их диаметру ( $d, м$ ).

$$D = \frac{1}{d}.$$

**Удельная поверхность** ( $S_{уд}, м^2/кг$ ) – рассчитывается как отношение общей поверхности раздробленного вещества к его массе:

$$S_{уд.} = \frac{S_{1,2} \cdot n}{m \cdot n},$$

где  $S_{1,2}$  – площадь поверхности одной частицы,  $м^2$ ;  $n$  – число частиц в системе;  $m$  – масса одной частицы, кг ( $m = \rho \cdot V$ );  $\rho$  – плотность частицы,  $кг/м^3$ ;  $V$  – объем одной частицы,  $м^3$ .



Для сферической частицы радиуса  $r$  объем определяется, как  $V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$ , а площадь поверхности  $S_{1,2} = 4\pi \cdot r^2$ . Отсюда:

$$S_{\text{уд.}} = \frac{4\pi r^2 \cdot n}{\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot n \cdot \rho} = \frac{3}{r \cdot \rho} = \frac{6}{d \cdot \rho}.$$

### Строение мицеллы лиофобного коллоидного раствора (золя)

Леофобные коллоидные растворы – *золи* – это высокодисперсные системы с жидкой дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой. Леофобные золи требуют присутствия стабилизатора, например, электролита, ионы которого, адсорбируясь на частицах дисперсной фазы, образуют двойной электрический слой, препятствующий слипанию частиц фазы.

Структурной единицей леофобного золя является мицелла. *Мицеллой* называют гетерогенную микросистему, состоящую из микрокристалла дисперсной фазы, окруженного сольватированными ионами электролита-стабилизатора.

### Коагуляция леофобных зоей электролитами.

#### Выбор иона-коагулянта

**Коагуляция** – это процесс разрушения коллоидно-дисперсных систем, сопровождающийся слипанием частиц дисперсной фазы и образованием крупных агрегатов с их последующим осаждением [7, 8].

Коагуляцию золя можно вызвать с помощью добавления в систему электролитов.

#### **Правила коагуляции электролитами:**

1. Все сильные электролиты, добавленные в достаточном количестве, вызывают коагуляцию золя.



2. **Правило знака:** ионом-коагулянтом является тот ион электролита, заряд которого противоположен знаку заряда коллоидной частицы.

3. Минимальная концентрация электролита, при которой начинается коагуляция золя, называется *порогом коагуляции* ( $c_k$ ).

4. Чем больше заряд иона-коагулянта ( $z$ ), тем больше его коагулирующая способность, меньше его порог коагуляции ( $c_k$ ):

$$c_k = \frac{const}{z^6}.$$

Правило Шульце-Гарди:

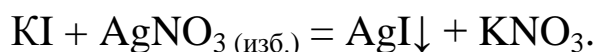
$$c_k^I : c_k^{II} : c_k^{III} = 1 : \frac{1}{2^6} : \frac{1}{3^6} = 1 : \frac{1}{64} : \frac{1}{729}$$

где  $const$  – постоянная для данного золя величина, независимая от природы иона-коагулянта;  $c_k^I$ ,  $c_k^{II}$ ,  $c_k^{III}$  – соответственно пороги коагуляции одно-, двух и трехзарядными ионами-коагулянтами.

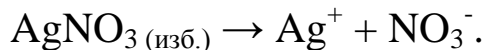
### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Составьте формулу мицеллы гидрофобного золя иодида серебра, полученного при взаимодействии иодида калия с избытком нитрата серебра, укажите знак заряда коллоидной частицы. К какому электроду будут двигаться коллоидные частицы золя при электрофорезе?

Необходимо рассмотреть образование мицеллы золя иодид серебра при избытке нитрата серебра:



По заданию нитрат серебра взят в избытке, следовательно,  $\text{AgNO}_3$  будет электролитом-стабилизатором, ионы которого образуют двойной электрический слой (ДЭС):



Определяется, какие из ионов  $\text{Ag}^+$  или  $\text{NO}_3^-$  будут адсорбироваться на поверхности микрокристалла  $\text{AgI}$ , т. е. являться **потенциалопределяющими**. В соответствии с правилом Панета-Фаянса ионы  $\text{Ag}^+$  являются потенциалопределяющими (они входят в состав осадка  $\text{AgI}$ ), тогда ионы  $\text{NO}_3^-$  являются противоионами.

Приводится формула мицеллы золя иодида серебра:



Микрокристалл вместе с потенциалопределяющими ионами и противоионами адсорбционного слоя образует коллоидную частицу (гранулу), и при написании ее выделяют фигурными скобками.

Заряд коллоидной частицы равен по величине суммарному заряду противоионов диффузного слоя, но противоположен по знаку.

Так как коллоидная частица в данном примере заряжена положительно ( $x+$ ), то при электрофорезе гранула будет двигаться к отрицательно заряженному электроду – катоду.

**Пример 2.** Порог коагуляции ( $c_k$ ) гидрозоля золота с отрицательно заряженными коллоидными частицами под



действием KCl равен  $2,30 \cdot 10^{-2}$  кмоль/м<sup>3</sup>. С помощью правила Шульце-Гарди рассчитайте для данного золя пороги коагуляции электролитами AlCl<sub>3</sub> и ZnSO<sub>4</sub>.

В первую очередь для заданных электролитов необходимо установить ионы, которые обладают коагулирующим действием. Так как коллоидная частица гидрозоль золота имеет отрицательный заряд, то коагуляцию будут вызывать катионы и тем быстрее, чем больше заряд катиона. Так, для соли KCl – это однозарядный катион K<sup>+</sup>, для соли ZnSO<sub>4</sub> – двухзарядный катион Zn<sup>2+</sup>, для соли AlCl<sub>3</sub> – трехзарядный катион Al<sup>3+</sup>.

Следовательно, порог коагуляции ZnSO<sub>4</sub> ( $c_k^{\text{II}}$ ) в 64 раза меньше порога коагуляции KCl ( $c_k^{\text{I}}$ ):

$$c_{k, \text{ZnSO}_4}^{\text{II}} = \frac{c_{k, \text{KCl}}^{\text{I}}}{64} = \frac{2,3 \cdot 10^{-2}}{64} = 3,59 \cdot 10^{-4} \text{ кмоль/м}^3,$$

а порог коагуляции AlCl<sub>3</sub> ( $c_k^{\text{III}}$ ) в 729 раз меньше порога коагуляции KCl:

$$c_{k, \text{AlCl}_3}^{\text{III}} = \frac{c_{k, \text{KCl}}^{\text{I}}}{729} = \frac{2,3 \cdot 10^{-2}}{729} = 3,15 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/м}^3$$

Ответ:  $c_k(\text{AlCl}_3) = 3,15 \cdot 10^{-5}$  кмоль/м<sup>3</sup>;  $c_k(\text{ZnSO}_4) = 3,59 \cdot 10^{-4}$  кмоль/м<sup>3</sup>.

### ***В. Индивидуальные задания***

**12.1.** Для вариантов 1–12. Вычислите величину дисперсности и удельную поверхность (в м<sup>2</sup>/кг) в дисперсной системе, для которой известны средний диаметр сферических частиц – **d** и плотность частиц дисперсной фазы – **ρ**.



|           | <i>Система</i>                | $d, 10^{-7},$<br><i>м</i> | $\rho, 10^3,$<br><i>кг/м<sup>3</sup></i> |
|-----------|-------------------------------|---------------------------|--|
| <b>1</b>  | Гидрозоль золота              | 0,1                       | 19,0                                     |
| <b>2</b>  | Гидрозоль оксида титана(IV)   | 0,27                      | 3,8                                      |
| <b>3</b>  | Гидрозоль серебра             | 0,7                       | 10,5                                     |
| <b>4</b>  | Аэрозоль хлорида аммония      | 4,5                       | 1,5                                      |
| <b>5</b>  | Суспензия кварца              | 3,4                       | 2,4                                      |
| <b>6</b>  | Гидрозоль сульфида мышьяка(V) | 0,11                      | 3,43                                     |
| <b>7</b>  | Суспензия каолина             | 5,0                       | 2,5                                      |
| <b>8</b>  | Суспензия силикагеля          | 4,1                       | 2,2                                      |
| <b>9</b>  | Суспензия непористой сажи     | 4,4                       | 1,7                                      |
| <b>10</b> | Пылевидное топливо            | 7,5                       | 1,8                                      |
| <b>11</b> | Эмульсия бензола              | 5,0                       | 0,86                                     |
| <b>12</b> | Водяной туман                 | 0,2                       | 1,0                                      |

Для вариантов 13–24. Вычислите средний диаметр дисперсных частиц и дисперсность системы, если удельная поверхность равна  $S_{уд}$ , плотность частиц дисперсной фазы –  $\rho$ .

|           | <i>Система</i>                   | $S_{уд}, 10^3,$<br><i>м<sup>2</sup>/кг</i> | $\rho, 10^3,$<br><i>кг/м<sup>3</sup></i> |
|-----------|----------------------------------|--|--|
| <b>13</b> | Суспензия железного сурика       | 20,0                                       | 3,9                                      |
| <b>14</b> | Суспензия цеолита                | 42,0                                       | 2,1                                      |
| <b>15</b> | Суспензия цеолита                | 2,86                                       | 2,1                                      |
| <b>16</b> | Водяной туман                    | 3,10                                       | 1,0                                      |
| <b>17</b> | Гидрозоль золота                 | 31,50                                      | 19,0                                     |
| <b>18</b> | Аэрозоль хлорида аммония         | 21,10                                      | 1,5                                      |
| <b>19</b> | Суспензия кварца                 | 1,25                                       | 2,4                                      |
| <b>20</b> | Золь берлинской лазури           | 152,0                                      | 1,90                                     |
| <b>21</b> | Суспензия железного сурика       | 0,75                                       | 3,9                                      |
| <b>22</b> | Золь гидроксида железа(III)      | 125,0                                      | 2,4                                      |
| <b>23</b> | Суспензия гидроксида железа(III) | 1,45                                       | 2,4                                      |
| <b>24</b> | Гидрозоль кремнезема             | 11,10                                      | 2,7                                      |





**12.2.** Составьте формулу мицеллы гидрофобного золя вещества **С**, полученного при взаимодействии избытка вещества **А** с веществом **В**. Укажите знак заряда коллоидной частицы, к какому электроду будут двигаться коллоидные частицы указанного золя при электрофорезе?

Изобразите график падения потенциала в двойном электрическом слое  $\varphi = f(r)$ , покажите на графике величину электрокинетического потенциала. Назовите электролит, который может вызвать нейтрализационную коагуляцию данного золя.

|           | <i>Вещество А<br/>(стабилизатор)</i>  | <i>Вещество В</i>   | <i>Золь С</i>                                       |
|-----------|---------------------------------------|---|---|
| <b>1</b>  | FeCl <sub>3</sub>                     | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]                             | Fe <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub> |
| <b>2</b>  | FeCl <sub>3</sub>                     | KOH   | Fe(OH) <sub>3</sub>                                 |
| <b>3</b>  | KBr                                   | AgNO <sub>3</sub>   | AgBr  |
| <b>4</b>  | AgNO <sub>3</sub>                     | KBr   | AgBr  |
| <b>5</b>  | NaCl                                  | AgNO <sub>3</sub>   | AgCl  |
| <b>6</b>  | AgNO <sub>3</sub>                     | KCl   | AgCl  |
| <b>7</b>  | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] | FeCl <sub>3</sub>   | Fe <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub> |
| <b>8</b>  | Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>     | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                    | BaSO <sub>4</sub>                                   |
| <b>9</b>  | FeCl <sub>3</sub>                     | H <sub>2</sub> O, (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Fe(OH) <sub>3</sub>                                 |
| <b>10</b> | AlCl <sub>3</sub>                     | H <sub>2</sub> O, (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Al(OH) <sub>3</sub>                                 |
| <b>11</b> | CuCl <sub>2</sub>                     | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]                             | Cu <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              |
| <b>12</b> | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] | CuCl <sub>2</sub>   | Cu <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              |
| <b>13</b> | FeCl <sub>3</sub>                     | Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                                  | FePO <sub>4</sub>                                   |
| <b>14</b> | AlCl <sub>3</sub>                     | Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                                  | AlPO <sub>4</sub>                                   |
| <b>15</b> | AgNO <sub>3</sub>                     | Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                                  | Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                     |
| <b>16</b> | CrCl <sub>3</sub>                     | H <sub>2</sub> O, (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Cr(OH) <sub>3</sub>                                 |
| <b>17</b> | Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>     | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]                             | Co <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              |
| <b>18</b> | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] | Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                 | Co <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              |
| <b>19</b> | Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>     | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]                             | Cd <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              |
| <b>20</b> | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] | Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                 | Cd <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              |
| <b>21</b> | ZnSO <sub>4</sub>                     | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S                                 | ZnS   |
| <b>22</b> | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S     | ZnSO <sub>4</sub>   | ZnS   |
| <b>23</b> | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>        | MnCl <sub>2</sub>   | MnCO <sub>3</sub>                                   |
| <b>24</b> | KOH                                   | FeCl <sub>3</sub>   | Fe(OH) <sub>3</sub>                                 |



**12.3.** Порог коагуляции гидрофобного золя вещества **A** под действием электролита **B** равен  $S_K$ . Пользуясь правилом Шульце-Гарди, рассчитайте пороги коагуляции для данного золя электролитами **C**, **D**, **E**. Выберите из предложенных солей наиболее эффективный электролит-коагулянт.

|    | Золь <i>A</i>                                       | Заряд<br>гранулы | Электролиты-коагуляторы |                               |                                       |                                   |                                   |
|----|---|------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|    |   |                  | <i>B</i>                | $S_K$<br>моль/дм <sup>3</sup> | <i>C</i>                              | <i>D</i>                          | <i>E</i>                          |
| 1  | AgCl  | –                | KNO <sub>3</sub>        | 0,043                         | CaCl <sub>2</sub>                     | NaCl                              | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   |
| 2  | AgI   | +                | KCl                     | 0,028                         | ZnSO <sub>4</sub>                     | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>    | AlCl <sub>3</sub>                 |
| 3  | Fe(OH) <sub>3</sub>                                 | +                | KCl                     | 0,093                         | CuSO <sub>4</sub>                     | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   | NaNO <sub>3</sub>                 |
| 4  | AgI   | –                | NaCl                    | 0,142                         | CuSO <sub>4</sub>                     | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> | Th(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> |
| 5  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | +                | NaCl                    | 0,012                         | KNO <sub>3</sub>                      | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>    |
| 6  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | +                | NaCl                    | 0,052                         | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | NaNO <sub>3</sub>                 |
| 7  | As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | –                | KCl                     | 0,049                         | CuCl <sub>2</sub>                     | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   |
| 8  | Fe <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub> | +                | NaCl                    | 0,151                         | KNO <sub>3</sub>                      | CuSO <sub>4</sub>                 | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   |
| 9  | Fe <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub> | –                | KCl                     | 0,111                         | KNO <sub>3</sub>                      | CaCl <sub>2</sub>                 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> |
| 10 | Ag  | +                | KCl                     | 0,092                         | CuSO <sub>4</sub>                     | NaNO <sub>3</sub>                 | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>    |
| 11 | MnO <sub>2</sub>                                    | –                | NaCl                    | 0,103                         | NaBr                                  | Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | AlCl <sub>3</sub>                 |
| 12 | AgCl  | +                | NaCl                    | 0,140                         | CuSO <sub>4</sub>                     | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   | NaNO <sub>3</sub>                 |
| 13 | Cu <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              | +                | NaCl                    | 0,161                         | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>       | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>    | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> |
| 14 | Cu <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              | –                | KCl                     | 0,171                         | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>       | CaCl <sub>2</sub>                 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> |
| 15 | FePO <sub>4</sub>                                   | +                | NaCl                    | 0,143                         | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>       | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | CaCl <sub>2</sub>                 |
| 16 | FePO <sub>4</sub>                                   | –                | KCl                     | 0,123                         | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>        | Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | AlCl <sub>3</sub>                 |
| 17 | Co <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              | +                | NaCl                    | 0,151                         | KBr                                   | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   |
| 18 | Co <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]              | –                | KCl                     | 0,163                         | NaCl                                  | CuSO <sub>4</sub>                 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> |
| 19 | AlPO <sub>4</sub>                                   | –                | KCl                     | 0,124                         | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>        | AlCl <sub>3</sub>                 | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> |
| 20 | AlPO <sub>4</sub>                                   | +                | NaCl                    | 0,084                         | K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] | CuSO <sub>4</sub>                 | NaNO <sub>3</sub>                 |
| 21 | BaSO <sub>4</sub>                                   | +                | NaCl                    | 0,106                         | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>        | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   |
| 22 | BaSO <sub>4</sub>                                   | –                | KCl                     | 0,125                         | NaCl                                  | CuSO <sub>4</sub>                 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> |
| 23 | Au  | –                | NaCl                    | 0,167                         | KCl                                   | CuSO <sub>4</sub>                 | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> |
| 24 | AgBr  | +                | KCl                     | 0,156                         | Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>     | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>    |



## 13. ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ

### *А. Теоретическая часть*

**Фазой** называется совокупность всех гомогенных частей системы, одинаковых во всех точках по составу и по всем физическим и химическим свойствам (не зависящим от количества вещества) и ограниченных от других частей системы некоторой поверхностью (поверхностью раздела) [9].

**Составляющими веществами** называются все вещества, которые могут быть выделены из равновесной системы и существовать вне ее.

**Независимыми компонентами** системы называются те составляющие вещества, которых достаточно, чтобы построить систему.

**Степенью свободы** системы называется каждый из параметров состояния системы, значение которого можно изменять произвольно при условии, что фазы, образующие систему, не исчезают, и новые фазы не образуются.

**Правило фаз Гиббса:**

$$C = K - \Phi + n,$$

где  $C$  – число степеней свободы системы;  $K$  – число независимых компонентов;  $\Phi$  – число фаз системы;  $n$  – число внешних факторов, влияющих на систему.

Обычно на систему влияют два внешних фактора: давление и температура, тогда  $n = 2$ . Если систему рассматривают в условиях, когда один из внешних параметров не меняется ( $P = const$  или  $T = const$ ), то  $n = 1$ .

### **Диаграммы кипения летучих смесей**

Пусть жидкий раствор состоит из двух летучих компонентов и находится в равновесии со своим паром. В такой системе насыщенный пар содержит оба компонента, причем состав пара отличается от состава жидкого раствора, из которого он получен.



Как известно, жидкости кипят, если давление пара над ними становится равным внешнему давлению. Отсюда следует, что чем выше давление пара над жидкостью, тем ниже ее температура кипения при данном внешнем давлении.

При испарении летучей смеси ее состав меняется, так как более летучий компонент интенсивнее переходит в парообразную фазу, поэтому летучие смеси кипят не при постоянной температуре, как чистые жидкости, а в некотором интервале температур.

При изучении равновесия жидкий «раствор–пар» используют диаграммы «Температура кипения – состав» (при  $P = \text{const}$ ), называемые **диаграммами кипения** [9].

Чтобы уметь пользоваться диаграммой кипения, нужно четко представлять, что означает каждая линия и область на диаграмме.

На рис. 1а и рис. 1б изображены диаграммы кипения для некоторых бинарных систем, с неограниченной взаимной растворимостью.

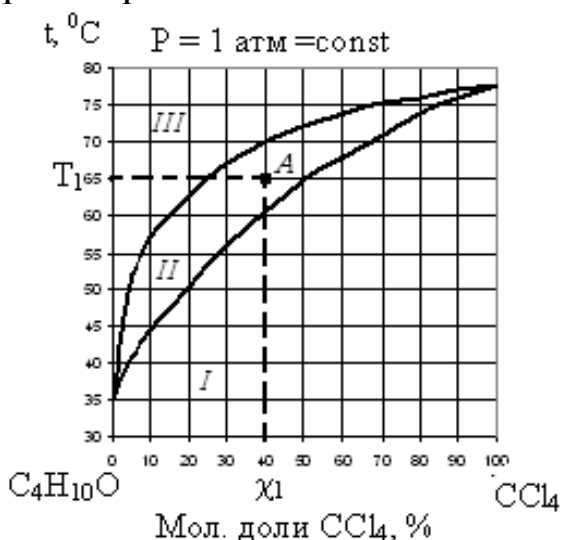


Рис. 1а. Диаграмма кипения системы  $\text{CCl}_4 - \text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$

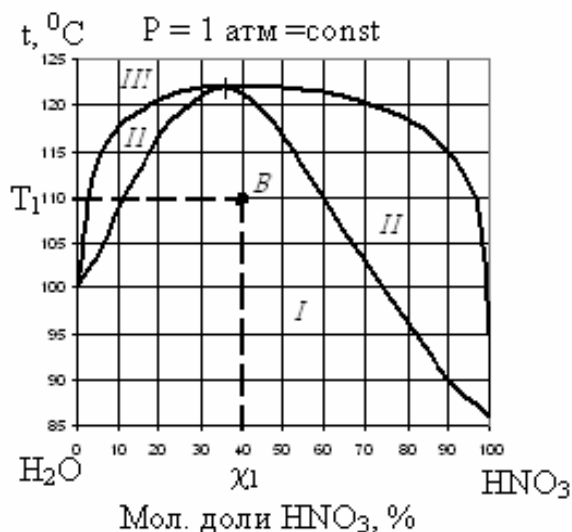


Рис. 1б. Диаграмма кипения системы  $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$

**Нижняя линия** на диаграммах кипения описывает зависимость температуры начала кипения (температуры, при которой появляется первый пузырек пара) от состава

жидкости, выраженного в массовых или мольных долях одного из компонентов.

**Верхняя линия** описывает зависимости температуры конца кипения от состава исходной жидкой смеси.

Каждой смеси заданного состава ( $x_1$ ), находящейся при заданной температуре  $T_1$ , соответствует на диаграмме определенная точка, называемая «фигуративной» точкой.

На рисунке 1а это точка А; на рисунке 1б – точка В.

Верхняя и нижняя линии делят диаграмму кипения на три области I, II, III.

Каждая точка области I соответствует системам, состоящим из одной жидкой фазы ( $\Phi=1$ ); каждая точка области II описывает системы, состоящие из двух фаз: жидкого раствора и равновесного с ним пара ( $\Phi=2$ ); каждая точка области III соответствует системам, состоящим из одной газообразной фазы ( $\Phi=1$ ).

По диаграмме кипения можно определить фазовый состав системы в любых заданных условиях.

*По диаграмме кипения можно определить:*

1) температуру начала кипения ( $T_{\text{нач. кип}}$ ) и состав первого пузырька пара для любой смеси, находящейся при данном давлении;

2) температуру конца кипения ( $T_{\text{конц. кип}}$ ) и состав последней капли жидкости любой смеси при данном  $P$ ;

3) фазовый состав системы (число, состав и количественное соотношение равновесных фаз), если известен состав смеси при заданной температуре.

## **Б. Примеры решения типовых задач**

**Пример 1.** Определить число фаз, число независимых компонентов и число степеней свободы для системы, представляющей собой насыщенный раствор нитрата калия в воде, находящийся в равновесии с кристаллами соли и льда. Внешнее давление постоянно.



В системе два независимых компонента соль  $\text{KNO}_3$  и вода. Для данной системы число составляющих веществ и число независимых компонентов совпадает, т. к. в системе нет химического взаимодействия.

В системе присутствуют 3 фазы ( $\Phi = 3$ ): две твердых – кристаллы нитрата калия и кристаллы воды, и одна жидкая – сам раствор. Если из внешних факторов на систему влияет только температура ( $n = 1$ ), то согласно правила фаз система обладает одной степенью свободы:

$$C = K - \Phi + n = 2 - 3 + 1 = 0.$$

Полученная система является безвариантной.

**Пример 2.** Пусть смесь состоит из 60 % (мол.)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 40 % (мол.)  $\text{H}_2\text{O}$ . Определите температуру начала кипения смеси и состав первого пузырька пара.

Отмечается на горизонтальной оси точка, отвечающая заданному составу смеси. На рисунке 2 ей соответствует точка 1. Определяется  $T_{\text{нач. кип}}$  (т. е. температура, при которой появляется первый пузырек пара) *по нижней кривой*, как показано на рис. 2.

Так как пузырек пара и жидкость находятся при одинаковой температуре, равной  $T_{\text{нач. кип}}$ , можно провести изотерму (горизонтальную прямую) и определить *по верхней кривой состав пара*, равновесного с данной кипящей жидкостью.

Согласно диаграмме (рис. 2)  $T_{\text{нач. кип}} = 106\text{ }^\circ\text{C}$ ; первый пузырек пара содержит 50 % (мол)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 50 % (мол)  $\text{H}_2\text{O}$ .



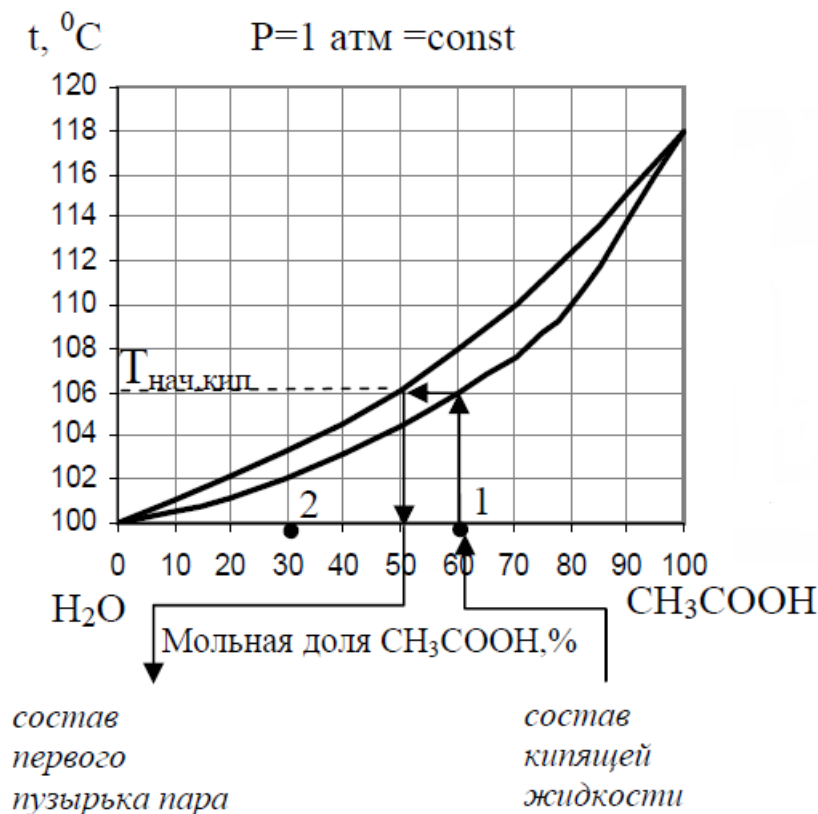


Рис. 2. Диаграмма кипения системы  $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_3\text{COOH}$

**Пример 3.** Пусть смесь состоит из 60 % (мол.)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 40 % (мол.)  $\text{H}_2\text{O}$ . Определите температуру конца кипения смеси и состав последней капли жидкости.

Найти на оси абсцисс точку, соответствующую заданному составу смеси. На диаграмме кипения системы  $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_3\text{COOH}$  (рис. 3) такой смеси соответствует точка 1. Определяется температура конца кипения заданной смеси по *верхней кривой*, как показано на рисунке 3. Температура  $T_{\text{конца. кип. смеси}}$ , содержащей 60 % (мол.)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 40 % (мол.)  $\text{H}_2\text{O}$ , согласно диаграмме соответствует точке 2 и составляет  $108^\circ\text{C}$ .

Проводится через точку 2 изотерма (горизонтальная прямая) и определяется *состав последней капли жидкости по нижней кривой*. Так, если исходная смесь содержала 60 % (мол.)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (точка 1), то состав последней капли жидкости соответствует точке 3. Согласно диаграмме (рис. 3) последняя капля жидкости содержит 72 % (мол.)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 28 % (мол.)  $\text{H}_2\text{O}$ .

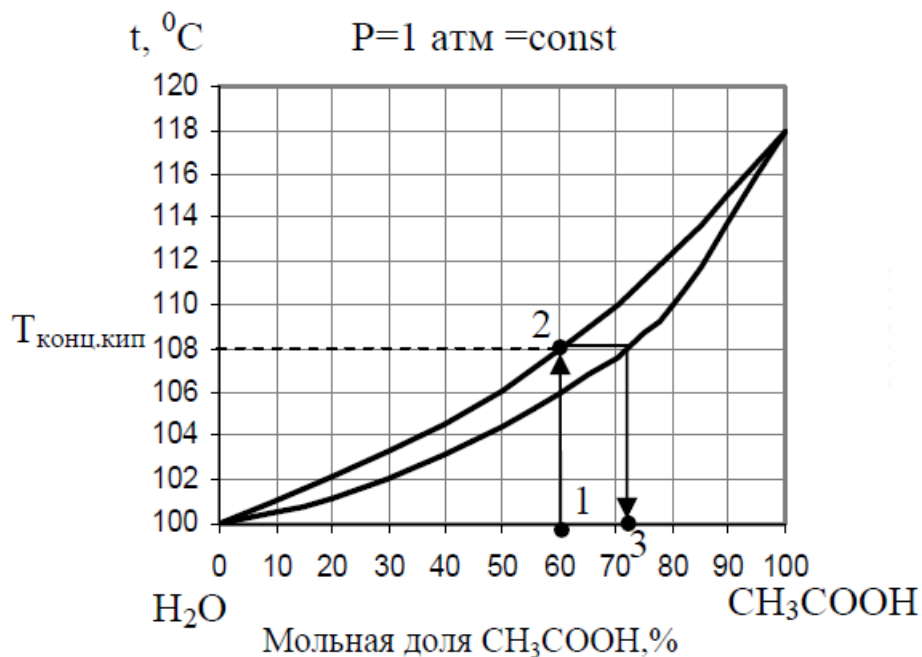


Рис. 3. Диаграмма кипения системы  $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_3\text{COOH}$

**Пример 4.** Пусть смесь, приготовленная из 180 г  $\text{H}_2\text{O}$  и 600 г  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , находится при температуре  $105^\circ\text{C}$ . Определите число и состав равновесных фаз.

Диаграмма кипения системы  $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_3\text{COOH}$  представлена на рис. 4.

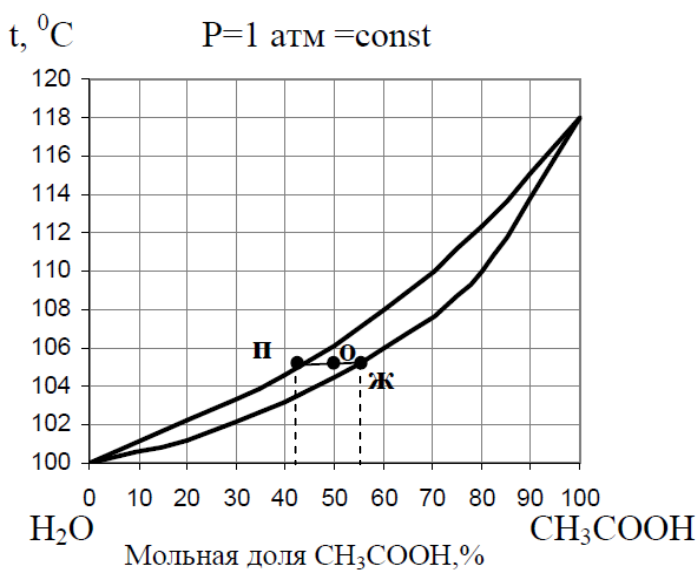


Рис. 4. Диаграмма кипения системы  $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_3\text{COOH}$

Чтобы найти на диаграмме фигуративную точку, характеризующую заданную смесь, следует выразить ее состав тем же способом, что и на диаграмме, т. е. в мольных долях  $\text{CH}_3\text{COOH}$ .



Вычисляется мольная доля уксусной кислоты  $\chi(\text{CH}_3\text{COOH})$  в заданной смеси по формуле:

$$\chi(\text{CH}_3\text{COOH}) = \frac{n(\text{CH}_3\text{COOH})}{n(\text{H}_2\text{O})} \cdot 100\% ,$$

где количество каждого вещества ( $n$ ) рассчитывается, поделением массы на молярную массу.

В заданной смеси мольная доля  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (%) составляет 50 %. Отметим на диаграмме фигуративную точку, отвечающую содержанию кислоты 50 % и  $t=105^\circ\text{C}$  (точка «о» на рис. 4).

Фигуративная точка «о» находится в двухфазной области, следовательно система представляет собой кипящую жидкость, находящуюся в равновесии с парообразной фазой ( $\Phi=2$ ). Система состоит из двух фаз, чтобы определить состав каждой из них, проводится через фигуративную точку «о» горизонтальная прямая: точка «ж» соответствует составу жидкой фазы; точка «п» – составу равновесного пара. Следовательно кипящая жидкость содержит 55 %  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 45 %  $\text{H}_2\text{O}$ , а равновесный с данной жидкостью пар состоит из 41 %  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 59 %  $\text{H}_2\text{O}$  (согласно рис. 4).

## **В. Индивидуальные задания**

**13.1.** При различных видах внешних воздействий определите число степеней свободы в водных системах.

|          | <b>Виды воздействий</b> | <b>Компоненты систем</b>   |
|----------|-------------------------|--|
| <b>1</b> | Р, Т                    | Раствор $\text{NaCl}$ , $\text{KCl}$<br>с кристаллами этих солей |
| <b>2</b> | Р, Т                    | Раствор трех солей<br>с примесями опилок                         |
| <b>3</b> | Р, Т                    | Раствор этилового спирта<br>и воды                               |
| <b>4</b> | Р                       | Раствор кислоты,<br>песок  |
| <b>5</b> | Т,<br>магнитное поле    | Раствор $\text{KCl}$ , лед,<br>древесные опилки                  |



|           | <b>Виды воздействий</b> | <b>Компоненты систем</b>                     |
|-----------|-------------------------|--|
| <b>6</b>  | Р, Т, микроволны        | Раствор соды с примесью ее кристаллов        |
| <b>7</b>  | Р, Т,<br>ультразвук     | Раствор NaCl с примесью кристаллов соли      |
| <b>8</b>  | Р, Т,<br>УФ-облучение   | Раствор спирта и воды                        |
| <b>9</b>  | Р, Т,<br>ИК-облучение   | Раствор красителя, песок                     |
| <b>10</b> | Р, Т,<br>магнитное поле | Раствор сахара с примесью его кристаллов     |
| <b>11</b> | Р, ультразвук           | Раствор KCl с примесью кристаллов KCl        |
| <b>12</b> | Т, микроволны           | Раствор воды с добавлением спирта            |
| <b>13</b> | Р, Т,<br>УФ-облучение   | Раствор NaCl, KCl с кристаллами этих солей   |
| <b>14</b> | Р, Т, микроволны        | Раствор KCl, NaCl                            |
| <b>15</b> | Р, Т,<br>радиация       | Раствор глюкозы и сахарозы                   |
| <b>16</b> | Р, Т,<br>ИК-облучение   | Раствор CaCl <sub>2</sub> и древесные опилки |
| <b>17</b> | Р, Т, перемешивание     | Раствор KCl, опилки металла                  |
| <b>18</b> | Р, Т,<br>ультразвук     | Раствор MgCl <sub>2</sub> , древесные опилки |
| <b>19</b> | Р, Т,<br>ИК-облучение   | Раствор AlCl <sub>3</sub> и песок            |
| <b>20</b> | Р, Т,<br>УФ-облучение   | Раствор KCl, глина                           |
| <b>21</b> | Р, Т                    | Раствор NaCl, KCl с кристаллами этих солей   |
| <b>22</b> | Р, Т                    | Раствор трех солей с примесями опилок        |
| <b>23</b> | Р, Т                    | Раствор этилового спирта и воды              |
| <b>24</b> | Р                       | Раствор кислоты, песок                       |



**13.2.** На диаграмме состояния воды (рис. 5) укажите: однофазные, двухфазные и трехфазную области с одновременным определением в них числа степеней свободы. Укажите линии, описывающие процессы испарения, конденсации, плавления, кристаллизации и возгонки воды. Сформулируйте условия закипания и кристаллизации жидкостей.

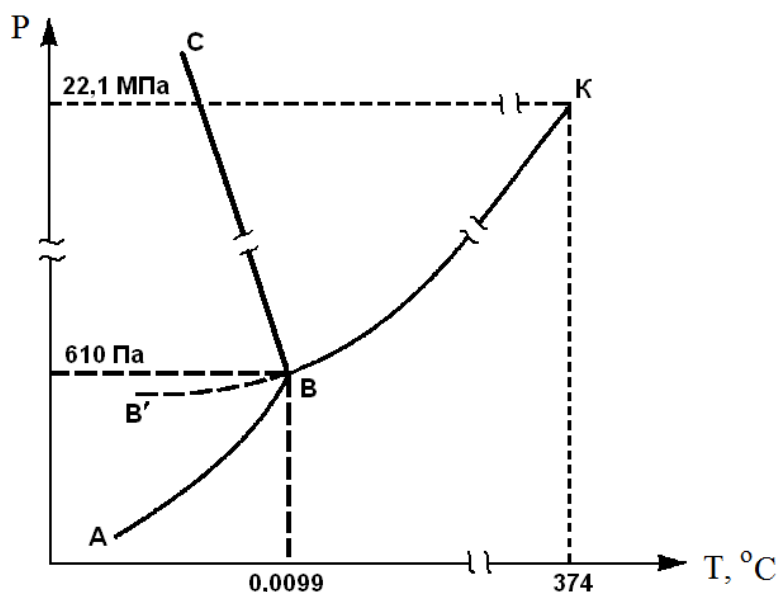


Рис. 5. Диаграмма состояния воды

**13.3.** Используя диаграммы кипения (рис. 6–9), определите температуры кипения чистых компонентов и возможность образования азеотропных смесей ( $P = \text{const}$ ).

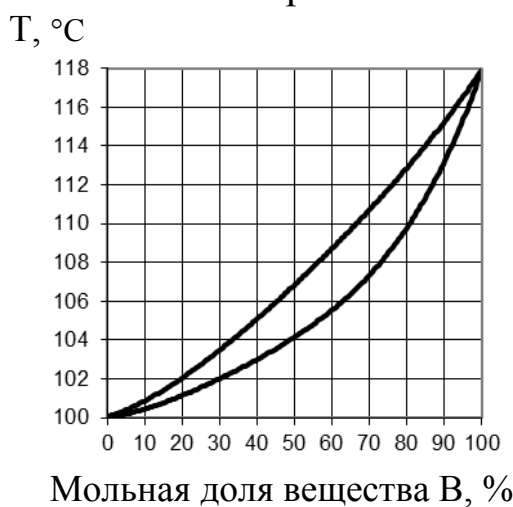


Рис. 6.  $\text{CH}_3\text{COOH(B)}-\text{H}_2\text{O(A)}$

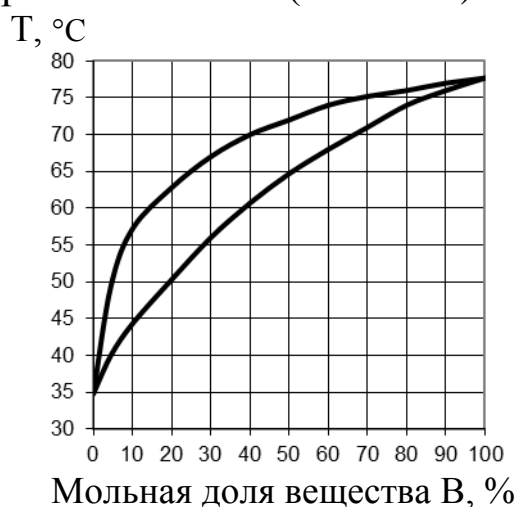


Рис. 7.  $\text{CCl}_4(\text{B})-\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5(\text{A})$

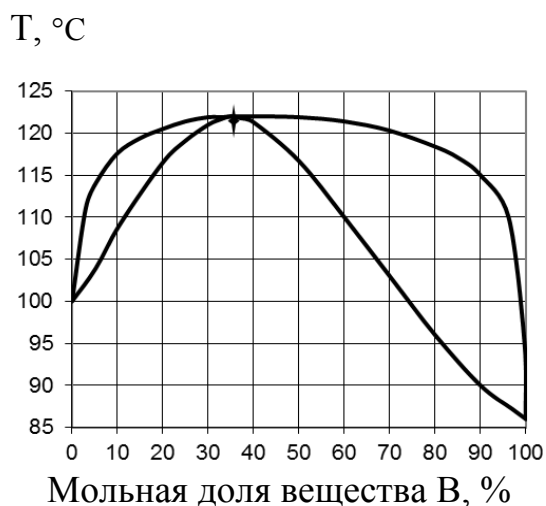


Рис. 8.  $\text{cis-C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2(\text{B})\text{--CH}_3\text{OH}(\text{A})$

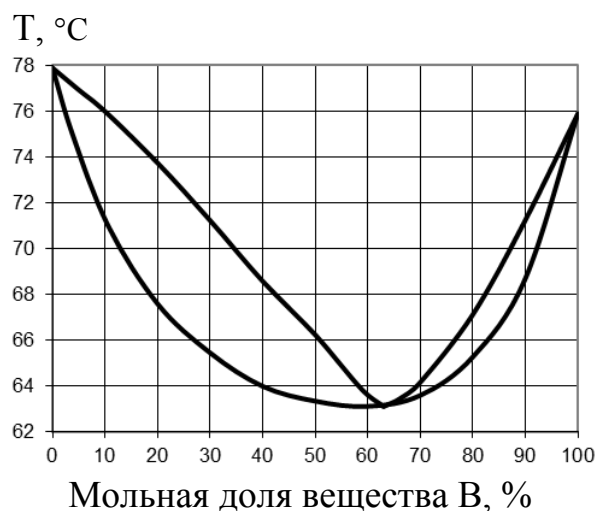


Рис. 9.  $\text{CCl}_4(\text{B})\text{--C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{A})$

**13.4.** Раствор состоит из двух компонентов А и В, массы компонентов равны  $m(\text{A})$  и  $m(\text{B})$ , соответственно.

Используя диаграммы кипения двухкомпонентных систем (рис. 6–9) определите:

- 1) температуру начала кипения раствора заданного состава и состав первого пузырька пара;
- 2) температуру конца кипения раствора заданного состава и состав последней капли жидкости в конце кипения выбранного раствора;
- 3) укажите компоненты, на которые можно разделить раствор заданного состава с помощью перегонки;
- 4) рассчитайте состав азеотропного раствора;
- 5) укажите однофазные и двухфазные области на диаграмме.

|          | Вещество А                      | Вещество В                            | $m(\text{A})$ , г | $m(\text{B})$ , г |
|----------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>1</b> | $\text{H}_2\text{O}$            | $\text{CH}_3\text{COOH}$              | 18                | 30                |
| <b>2</b> | $\text{H}_2\text{O}$            | $\text{CH}_3\text{COOH}$              | 18                | 40                |
| <b>3</b> | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | $\text{CCl}_4$                        | 54                | 50                |
| <b>4</b> | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | $\text{CCl}_4$                        | 30                | 70                |
| <b>5</b> | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | $\text{CCl}_4$                        | 50                | 80                |
| <b>6</b> | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | $\text{CCl}_4$                        | 70                | 90                |
| <b>7</b> | $\text{CH}_3\text{OH}$          | $\text{cis-C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$ | 20                | 50                |

|    | Вещество А   | Вещество В  | $m(A)$ , г | $m(B)$ , г |
|----|--|---|------------|------------|
| 8  | CH <sub>3</sub> OH   | цис-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 30         | 60         |
| 9  | CH <sub>3</sub> OH   | цис-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 40         | 70         |
| 10 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -O-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | CCl <sub>4</sub>                                  | 81         | 80         |
| 11 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -O-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | CCl <sub>4</sub>                                  | 18         | 90         |
| 12 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -O-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | CCl <sub>4</sub>                                  | 19         | 100        |
| 13 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -O-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | CCl <sub>4</sub>                                  | 20         | 40         |
| 14 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 30         | 50         |
| 15 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 35         | 60         |
| 16 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 40         | 30         |
| 17 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 50         | 40         |
| 18 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH                               | CCl <sub>4</sub>                                  | 54         | 50         |
| 19 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH                               | CCl <sub>4</sub>                                  | 30         | 70         |
| 20 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH                               | CCl <sub>4</sub>                                  | 50         | 80         |
| 21 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH                               | CCl <sub>4</sub>                                  | 70         | 90         |
| 22 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 60         | 50         |
| 23 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 18         | 80         |
| 24 | H <sub>2</sub> O   | CH <sub>3</sub> COOH                              | 18         | 70         |

**13.5.** Система состоит из двух компонентов А и В, массы компонентов равны  $m(A)$  и  $m(B)$ , соответственно. Используя соответствующие диаграммы плавления (рис. 10–12), определите:

- 1) температуры начала и конца кристаллизации;
- 2) количество, состав и массы равновесных фаз исходной системы при произвольно выбранной температуре в двухфазной области диаграммы;
- 3) постройте кривые охлаждения для системы заданного состава.

|   | Вещество А | Вещество В | $m(A)$ , г | $m(B)$ , г |
|---|------------|------------|------------|------------|
| 1 | Sb         | Pb         | 10         | 90         |
| 2 | Sb         | Pb         | 15         | 100        |
| 3 | Sb         | Pb         | 20         | 110        |
| 4 | Sb         | Pb         | 25         | 120        |

|    | Вещество А                       | Вещество В       | $m(A)$ , г | $m(B)$ , г |
|----|----------------------------------|------------------|------------|------------|
| 5  | Al                               | Si               | 10         | 60         |
| 6  | Al                               | Si               | 20         | 70         |
| 7  | Al                               | Si               | 30         | 80         |
| 8  | Al                               | Si               | 40         | 90         |
| 9  | Al                               | Mg               | 10         | 70         |
| 10 | Al                               | Mg               | 15         | 60         |
| 11 | Al                               | Mg               | 20         | 50         |
| 12 | Al                               | Mg               | 25         | 40         |
| 13 | Al                               | Pb               | 30         | 100        |
| 14 | Al                               | Pb               | 40         | 120        |
| 15 | Al                               | Pb               | 50         | 140        |
| 16 | Al                               | Pb               | 20         | 150        |
| 17 | Sb                               | Pb               | 18         | 10         |
| 18 | Sb                               | Pb               | 27         | 20         |
| 19 | Sb                               | Pb               | 36         | 30         |
| 20 | Sb                               | Pb               | 18         | 40         |
| 21 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | CCl <sub>4</sub> | 54         | 50         |
| 22 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | CCl <sub>4</sub> | 30         | 70         |
| 23 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | CCl <sub>4</sub> | 50         | 80         |
| 24 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | CCl <sub>4</sub> | 70         | 90         |

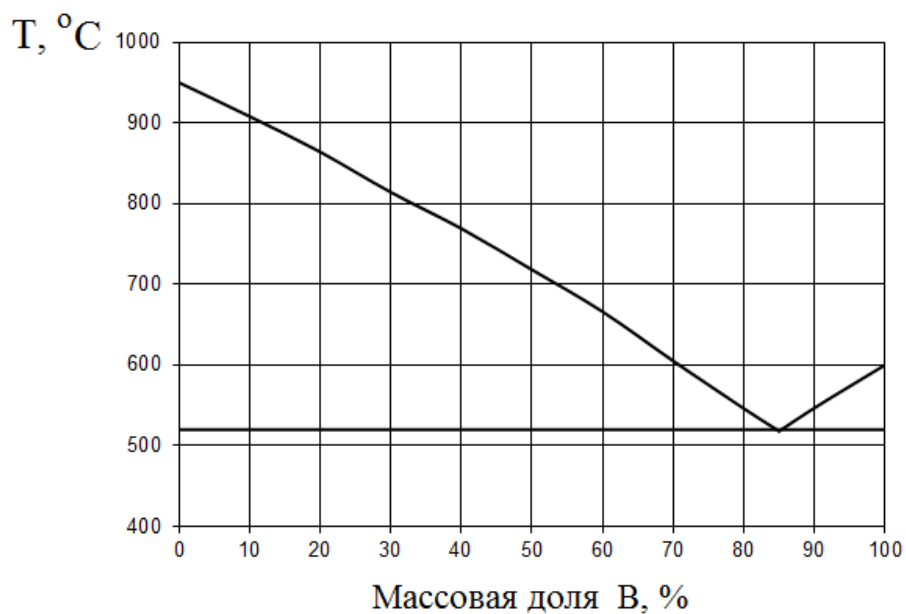


Рис. 10. Sb(A)–Pb(B)

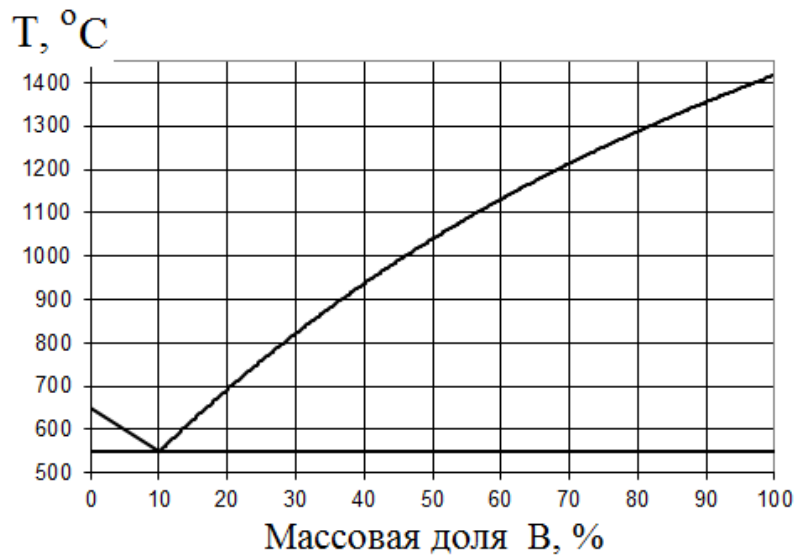


Рис. 11. Al(A)–Si(B)

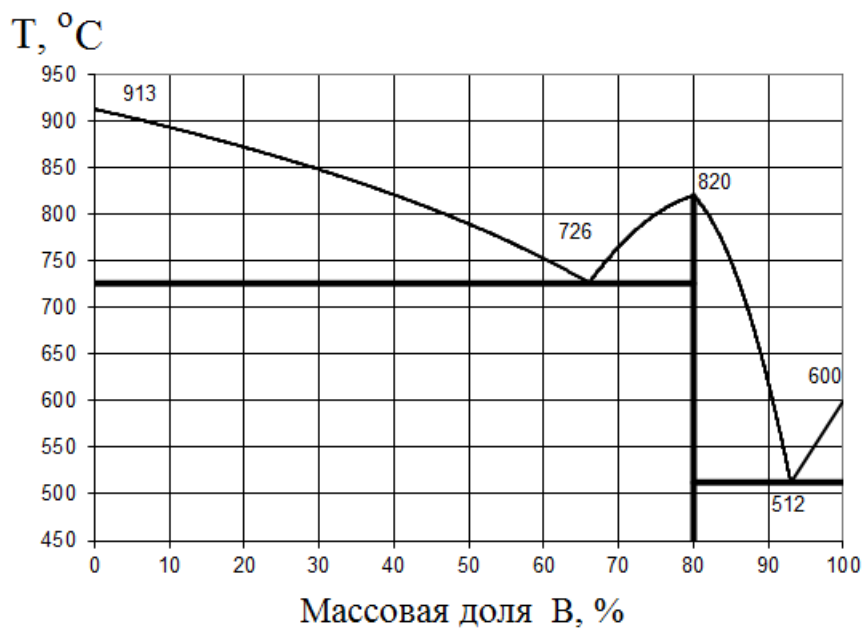


Рис. 12. Al(A)–Mg(B)

**13.6.** Укажите, для каких целей используют: а) фракционную перегонку жидких систем; б) перегонку с водяным паром; в) перегонку под вакуумом. Что такое ректификация?

**13.7.** Изобразите варианты диаграмм плавкости двухкомпонентных систем: а) с простой эвтектикой; б) с образованием промежуточных химических соединений; в) с образованием твердых растворов.

**13.8.** Опишите сущность метода термического анализа двухкомпонентной смеси? Укажите его практическую значимость. Постройте диаграмму плавкости системы Sb-Pb с использованием кривых охлаждения, представленных на рисунке 13?

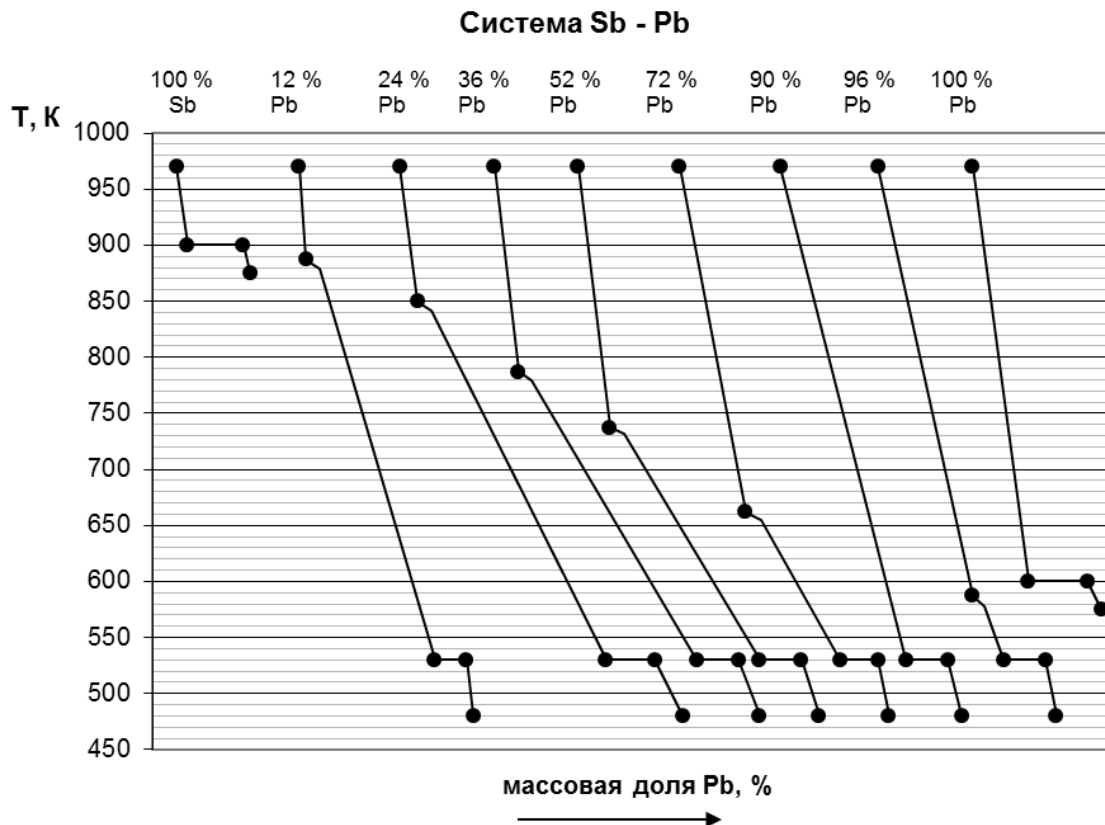


Рис. 13. Кривые охлаждения

**13.9.** Для каких практических целей используют диаграмму «железо-углерод»? Расшифруйте обозначения на диаграмме (рис. 14).



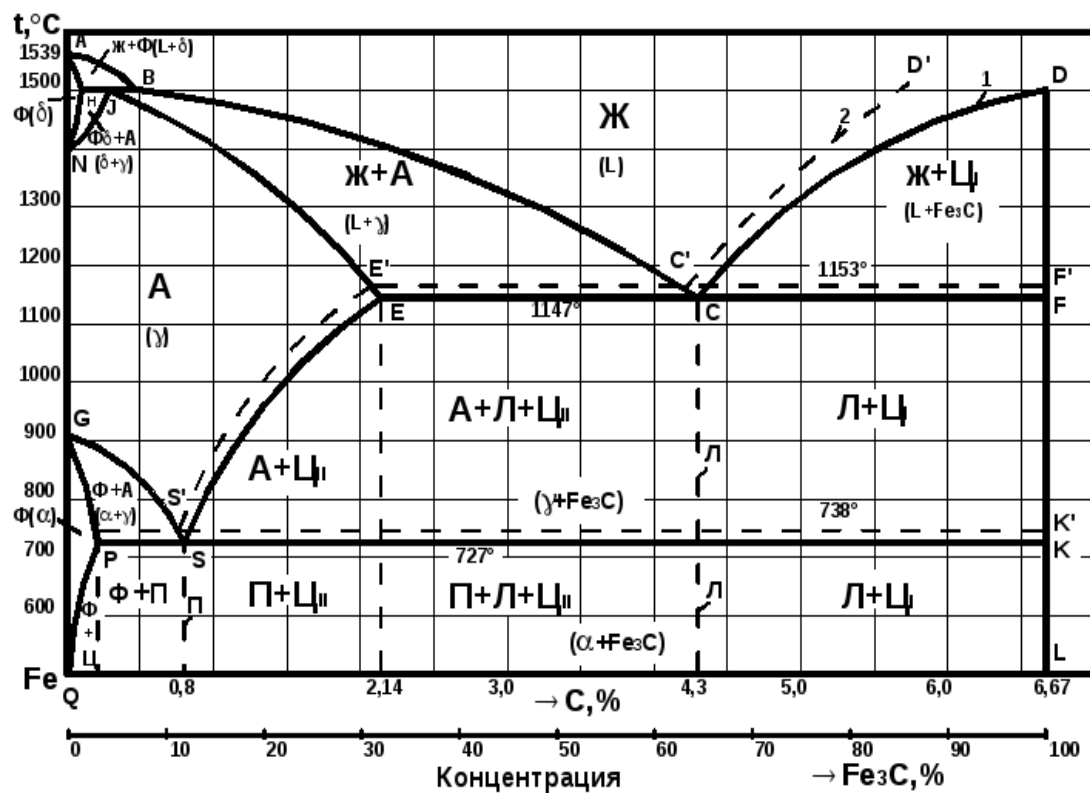


Рис. 14. Фазовая диаграмма железо-углерод

## 14. КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

### А. Теоретическая часть

Экспериментально доказано, что молекулы многих веществ, способных к самостоятельному существованию, могут взаимодействовать и образовывать более сложные молекулы новых веществ, названных **комплексными** («complex» – сложный) [2, 3]. Например, сульфат меди (II) и аммиак могут существовать раздельно. Однако при пропускании через водный раствор сульфата меди (II) газообразного аммиака они взаимодействуют и образуют новое комплексное соединение  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ :  $\text{CuSO}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ .

Согласно **координационной теории** А. Вернера, центральное место в комплексном соединении занимает **комплексообразователь** (заряженный или нейтральный центральный атом). Типичными комплексообразователями являются ионы d- и f-элементов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Au}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ...).

С комплексообразователем химически связаны (координированы) **лиганды** – атомы, молекулы или ионы противоположного знака. В качестве лигандов могут выступать одноатомные анионы ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$ ), многоатомные анионы ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ), неорганические ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ) и органические молекулы.

Число химических связей, устанавливаемых комплексообразователем с лигандами, называется **координационным числом** (к. ч.) комплексообразователя. Оно может принимать различные значения.

Приведем наиболее часто встречающиеся значения координационных чисел для некоторых комплексообразователей:

|           |  |
|-----------|--|
| к. ч. = 6 | $\text{Co}^{3+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Rh}^{3+}$ , $\text{Ir}^{3+}$ , $\text{Pt}^{4+}$ ; |
| к. ч. = 4 | $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Hg}^{2+}$ , $\text{Pt}^{2+}$ , $\text{Pd}^{2+}$ ;                                       |
| к. ч. = 2 | $\text{Ag}^+$ , $\text{Au}^+$ .  |

По числу химических связей, образуемых каждым лигандом, определяется его **координационная емкость**, или **дентатность**. Монодентатные лиганды ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_3$ )



имеют координационную емкость, равную единице, а бидентатные ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4^{2-}$ , этилендиамин и др.) – двум. Известны лиганды с координационной емкостью (дентатностью), равной трем, четырем и более единицам.

Комплексообразователь и лиганды вместе образуют **внутреннюю сферу** комплексного соединения, которую при написании формул этих соединений заключают в квадратные скобки.

В зависимости от зарядов комплексообразователя и лигандов внутренняя сфера может иметь положительный, отрицательный заряд или не иметь заряда. С учетом этого различают катионные, анионные и нейтральные комплексы, например:

|  |   |   |
|--|---|---|
| $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ; | $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$ ; | $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$ . |
| анионный                               | катионный                                 | нейтральный                               |
| комплекс                               | комплекс                                  | комплекс                                  |

Если внутренняя сфера заряжена, то комплекс имеет еще и **внешнюю сферу**. Ее образуют притягивающиеся к внутренней сфере противоположно заряженные ионы.

Общепринятая сегодня номенклатура комплексных соединений основана на рекомендациях Международного союза по теоретической и прикладной химии (ИЮПАК).

Первым, независимо от заряда внутренней сферы, в именительном падеже называют анион, а затем в родительном падеже – катион.

В названии комплексного катиона перечисляются все его составные части справа налево, при этом:

- сначала указывают числа (используя греческие числительные ди, три, тетра, пента, гекса и т. д.) и названия отрицательно заряженных лигандов с окончанием «о» ( $\text{Cl}^-$  – хлоро,  $\text{CN}^-$  – циано,  $\text{OH}^-$  – гидроксо,  $\text{SO}_4^{2-}$  – сульфато и т. д.);
- затем указывают числа и названия нейтральных лигандов – молекул, учитывая исключения:  $\text{H}_2\text{O}$  – аква,  $\text{NH}_3$  – аммин;



– последним называют по-русски комплексообразователь в родительном падеже с указанием его степени окисления.

Например:

$[\text{Pt}(\text{NH}_3)_3\text{Cl}]\text{Cl}$  – хлорид хлоротриамминплатины(II);  
 $[\text{Pd}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_2\text{OH}]\text{NO}_3$  – нитрат гидроксодиаминаквапалладия(II).

Названия комплексного аниона составляют аналогично названию катиона, только комплексообразователь называют по-латински, заменяя последние буквы на суффикс «ат».

Например:

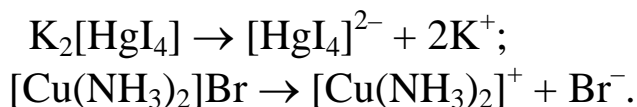
$\text{Na}[\text{Cr}(\text{NH}_3)_2(\text{CN})_4]$  – тетрацианодиаминхромат(III) натрия;  
 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  – гексацианоферрат(III) калия.

Нейтральные комплексы называют одним словом, комплексообразователь указывают по-русски в именительном падеже без степени окисления.

Например:

$[\text{Pt}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$  – дихлородиаминплатина.

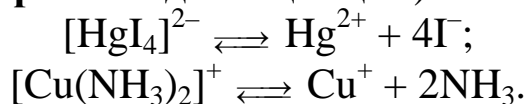
Катионные и анионные комплексные соединения при растворении в воде ведут себя как **сильные электролиты**, диссоциируя на комплексный ион и ионы внешней сферы, например:



Такая диссоциация называется **первичной**.

В случае **нейтральных комплексов** первичная диссоциация отсутствует, поэтому они называются **неэлектролитами**.

Далее комплексные ионы диссоциируют по типу слабого электролита (**вторичная диссоциация**):



Количественно приведенные равновесия могут быть охарактеризованы константами равновесия, которые называются общими **константами нестойкости** (справочные данные). Например, для комплексного иона  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$ :



$$K_{\text{нест}} = \frac{[\text{Cu}^+][\text{NH}_3]^2}{[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+} = 1,3 \cdot 10^{-11}.$$

Величина, обратная общей константе нестойкости, называется **константой устойчивости** ( $K_{\text{уст}}$ ).

Вторичная диссоциация комплексного иона происходит ступенчато, каждой ступени соответствует своя константа нестойкости. Индекс константы нестойкости соответствует числу лигандов, находящихся во внутренней сфере исходного комплексного иона.

При перемножении всех констант ступенчатой диссоциации получаем общую константу нестойкости.

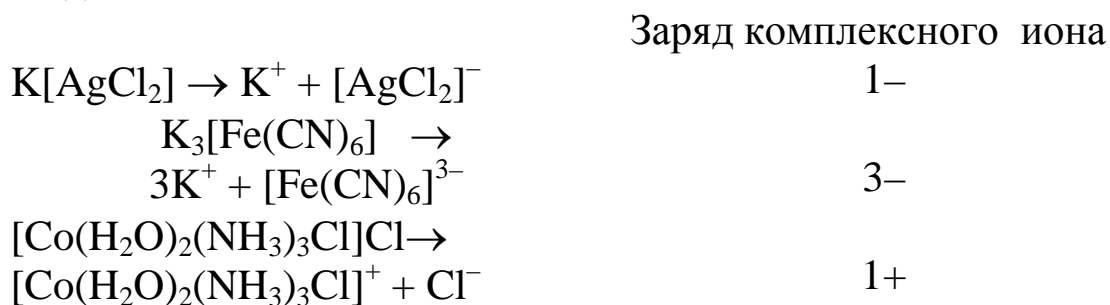
Чем меньше значение константы нестойкости, тем более прочным является комплексный ион, т. е. труднее он распадается на составляющие его частицы.

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Определите заряд комплексного иона, координационное число и заряд иона-комплексобразователя в соединениях:  $\text{K}[\text{AgCl}_2]$ ,  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ,  $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_3\text{Cl}]\text{Cl}$ . Назовите их.

#### ***Решение:***

Для определения заряда комплексного иона (внутренней сферы) записывается первичная диссоциация комплексных соединений:



Вычисляется заряд иона-комплексобразователя (х), учитывая, что алгебраическая сумма зарядов частиц, входящих в состав комплексного иона, равна его заряду:



|   |   |          |
|---|---|----------|
| $[\text{AgCl}_2]^-$   | $x + (-1) \cdot 2 = -1$                 | $x = +1$ |
| $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$                               | $x + (-1) \cdot 6 = -3$                 | $x = +3$ |
| $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_3\text{Cl}]^+$ | $x + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 3 + (-1) = +1$ | $x = +2$ |

Координационное число (к.ч.) комплексообразователя определяется по числу  $\sigma$ -связей, образуемых им с лигандами:

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| $[\text{AgCl}_2]^-$   | к.ч. ( $\text{Ag}^+$ ) = 2;    |
| $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$                               | к.ч. ( $\text{Fe}^{3+}$ ) = 6; |
| $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_3\text{Cl}]^+$ | к.ч. ( $\text{Co}^{2+}$ ) = 6. |

При назывании комплексных электролитов учитывается, что:

– первым, независимо от заряда внутренней сферы, в именительном падеже называется анион, а затем в родительном падеже – катион;

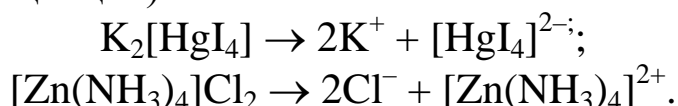
– в названии внутренней сферы перечисляются все ее составные части справа налево:

|  |  |
|--|--|
| $\text{K}[\text{AgCl}_2]$  | дихлороаргентат(I) калия;                    |
| $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$                                 | гексацианоферрат(III) калия;                 |
| $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_3\text{Cl}]\text{Cl}$ | хлорид хлоротриамминдиаква<br>кобальта (II). |

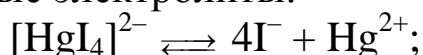
**Пример 2.** Напишите уравнения диссоциации комплексных соединений  $\text{K}_2[\text{HgI}_4]$  и  $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$  и выражения общих констант нестойкости комплексных ионов  $[\text{HgI}_4]^{2-}$  и  $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ . Укажите, какой из этих ионов является более прочным.

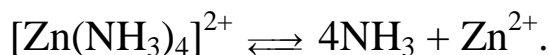
**Решение:**

Комплексные соединения, имеющие внешнюю среду, при растворении ведут себя как сильные электролиты, диссоциируя на комплексный ион и внешнесферные ионы (первичная диссоциация):



Далее комплексные ионы диссоциируют (вторичная диссоциация) как слабые электролиты:





Эти процессы количественно характеризуются константами равновесия, которые называют общими константами нестойкости (справочные данные).

$$K_{\text{нест}} = \frac{[\text{Hg}^{2+}] \cdot [\text{I}^-]^4}{[[\text{HgI}_4]^{2-}]} = 1,5 \cdot 10^{-30}.$$

$$K_{\text{нест}} = \frac{[\text{Zn}^{2+}] \cdot [\text{NH}_3]^4}{[[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}]} = 2 \cdot 10^{-9}.$$

Чем меньше общая константа нестойкости, тем труднее распадается комплексный ион на составляющие его частицы.

$K_{\text{нест}}[\text{HgI}_4]^{2-} \ll K_{\text{нест}}[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ , следовательно, ион  $[\text{HgI}_4]^{2-}$  прочнее.

### ***В. Индивидуальные задания***

**14.1.** Определите заряд комплексного иона, степень окисления и координационное число комплексообразователя в соединениях:

|           | <i>а)</i>  | <i>б)</i>                             | <i>в)</i>  |
|-----------|--|---------------------------------------|--|
| <b>01</b> | $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$            | $\text{K}[\text{Ag}(\text{CN})_2]$    | $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_4\text{Br}]\text{SO}_4$     |
| <b>02</b> | $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{NO}_3)_3$ | $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  | $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$            |
| <b>03</b> | $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{Br}$              | $\text{Na}_2[\text{PbBr}_4]$          | $\text{K}[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)(\text{CN})_4]$      |
| <b>04</b> | $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$     | $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$           | $[\text{Pd}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_2\text{Cl}]\text{Cl}$       |
| <b>05</b> | $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_4$            | $\text{H}[\text{AuCl}_4]$             | $\text{Na}_3[\text{Fe}(\text{NH}_3)(\text{CN})_5]$                       |
| <b>06</b> | $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$     | $\text{K}_2[\text{BeF}_4]$            | $[\text{Pt}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_3\text{Br}_2]\text{Br}_2$   |
| <b>07</b> | $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$            | $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  | $[\text{Pd}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_2\text{I}]\text{I}$         |
| <b>08</b> | $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{NO}_3)_2$ | $\text{Na}_4[\text{CdCl}_6]$          | $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_3\text{Br}(\text{NO}_2)_2]\text{Br}$            |
| <b>09</b> | $[\text{Pd}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$            | $\text{K}_3[\text{BiCl}_6]$           | $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_4(\text{CN})]\text{Br}_2$   |
| <b>10</b> | $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Br}_2$     | $\text{Na}_2[\text{Sn}(\text{OH})_6]$ | $[\text{Pt}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_2\text{Br}_2]\text{SO}_4$ |
| <b>11</b> | $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_4$            | $\text{K}_3[\text{Cu}(\text{CN})_4]$  | $\text{K}[\text{Co}(\text{NH}_3)_2(\text{NO}_2)_4]$                      |



|           | <i>a)</i>                                      | <i>б)</i>                            | <i>в)</i>  |
|-----------|--|--------------------------------------|--|
| <b>12</b> | $[\text{Hg}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$        | $\text{K}_4[\text{PbCl}_6]$          | $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{NH}_3)\text{Cl}_2]\text{Cl}$ |
| <b>13</b> | $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$        | $\text{K}_2[\text{PbI}_4]$           | $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4 \text{I} (\text{OH})](\text{NO}_3)_2$     |
| <b>14</b> | $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$ | $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$  | $\text{K}_2[\text{Pt Br Cl}(\text{NO}_2)_4]$                         |
| <b>15</b> | $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$        | $\text{K}_2[\text{HgI}_4]$           | $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_5\text{NO}_2](\text{NO}_3)_3$               |
| <b>16</b> | $[\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$ | $\text{Na}_3[\text{FeF}_6]$          | $\text{K}_2[\text{Pt Br}_2 \text{Cl}_2 (\text{NO}_2)_2]$             |
| <b>17</b> | $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{ClO}_4$       | $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{OH})_6]$ | $[\text{Rh}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_5]\text{Br}_3$          |
| <b>18</b> | $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$ | $\text{Na}_2[\text{SnCl}_6]$         | $\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Br}_2]$                        |
| <b>19</b> | $[\text{Pd}(\text{NH}_3)_4](\text{NO}_3)_2$    | $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{OH})_6]$ | $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{NH}_3)_3]\text{Cl}_3$        |
| <b>20</b> | $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Br}_2$ | $\text{Na}_3[\text{BiI}_6]$          | $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_4(\text{OH})_2]$                        |
| <b>21</b> | $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$        | $\text{K}_2[\text{Zn}(\text{CN})_4]$ | $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_5]\text{SO}_4$          |
| <b>22</b> | $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$ | $\text{Na}[\text{Ag}(\text{OH})_2]$  | $\text{K}_2[\text{PdCl}_2(\text{NO}_2)_2]$                           |
| <b>23</b> | $[\text{Mn}(\text{NH}_3)_6]\text{SO}_4$        | $\text{K}_2[\text{HgBr}_4]$          | $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_4\text{Cl}]\text{Cl}$   |
| <b>24</b> | $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_2$ | $\text{K}_4[\text{Co}(\text{CN})_6]$ | $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})(\text{NH}_3)_3\text{Br}_2]\text{Br}$ |

**14.2.** Назовите комплексные соединения, указанные в задании 14.1. По знаку электрического заряда внутренней сферы определите тип комплексных соединений.

**14.3.** Составьте уравнения диссоциации соединений, указанных в задании 14.1, в водных растворах.

**14.4.** Напишите формулы следующих комплексных соединений:

- 01** хлорид гексааквахрома(III);
- 02** хлорид тетраамминцинка(II);
- 03** нитрат гексаакваникеля(II);
- 04** гексахлороплатинат(IV) калия;





- 05** сульфат бромопентаамминкобальта(III);
- 06** тетрацианоаурат(III) калия;
- 07** сульфат гексааквамарганца(II);
- 08** гексацианоферрат(III) калия;
- 09** нитрат гексаакважелеза(III);
- 10** бромид пентаамминаквакобальта(III);
- 11** тетрахлоропалладат(II) калия;
- 12** гексафтороалюминат(III) натрия;
- 13** гексахлороплатинат(IV) калия;
- 14** хлорид хлоротриамминплатины(II);
- 15** хлорид пентаамминаквахрома(III);
- 16** гексагидроксоплюмбат(IV) натрия;
- 17** хлорид дихлоротетраамминплатины(IV);
- 18** нитрат диамминсеребра(I);
- 19** тетраиодомеркурат(II) калия;
- 20** гексагидроксохромат(III) калия;
- 21** тетрацианоплатинат(II) калия;
- 22** тетрахлорокупрат(II) натрия;
- 23** хлорид дибромотетраамминплатины(IV);
- 24** гексаиодоплатинат(IV) калия.

**14.5.** Используя метод валентных связей, определите для комплексных ионов: а) тип гибридизации орбиталей комплексообразователя; б) пространственное строение. Охарактеризуйте магнитные свойства ионов.



|           |                                     |                                     |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>01</b> | $[\text{FeF}_6]^{3-}$ ,             | $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ; |
| <b>02</b> | $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ , | $[\text{AgBr}_2]^-$ ;               |
| <b>03</b> | $[\text{TlBr}_6]^{3-}$ ,            | $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ; |
| <b>04</b> | $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ ,   | $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ ; |
| <b>05</b> | $[\text{CdI}_4]^{2-}$ ,             | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ ;   |
| <b>06</b> | $[\text{Ga}(\text{OH})_6]^{3-}$ ,   | $[\text{PbI}_4]^{2-}$ ;             |
| <b>07</b> | $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ ,      | $[\text{PdCl}_6]^{4-}$ ;            |
| <b>08</b> | $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ ,    | $[\text{Cd I}_6]^{4-}$ ;            |
| <b>09</b> | $[\text{SnF}_6]^{2-}$ ,             | $[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$ ;   |
| <b>10</b> | $[\text{Hg}(\text{CN})_4]^{2-}$ ,   | $[\text{SnCl}_6]^{2-}$ ;            |
| <b>11</b> | $[\text{Ag}(\text{OH})_2]^-$ ,      | $[\text{Tl I}_4]^-$ ,               |
| <b>12</b> | $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$ ,   | $[\text{CuI}_2]^-$ ;                |
| <b>13</b> | $[\text{Cd}(\text{OH})_4]^{2-}$ ,   | $[\text{BeF}_4]^{2-}$ ;             |
| <b>14</b> | $[\text{CdBr}_4]^{2-}$ ,            | $[\text{BiBr}_6]^{3-}$ ;            |
| <b>15</b> | $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ , | $[\text{HgI}_4]^{2-}$ ;             |
| <b>16</b> | $[\text{InF}_4]^-$ ,                | $[\text{Cr}(\text{OH})_6]^{3-}$ ;   |
| <b>17</b> | $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ ,      | $[\text{In}(\text{OH})_4]^-$ ;      |
| <b>18</b> | $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ,      | $[\text{CdCl}_6]^{4-}$ ;            |
| <b>19</b> | $[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$ ,   | $[\text{AgI}_2]^-$ ;                |
| <b>20</b> | $[\text{Hg}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ , | $[\text{AlF}_6]^{3-}$ ;             |
| <b>21</b> | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ ,   | $[\text{HgBr}_4]^{2-}$ ;            |
| <b>22</b> | $[\text{Sn}(\text{OH})_6]^{2-}$ ,   | $[\text{HgCl}_4]^{2-}$ ;            |
| <b>23</b> | $[\text{TlBr}_4]^-$ ,               | $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$ ;   |
| <b>24</b> | $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{4-}$ ,   | $[\text{AgCl}_2]^-$ .               |



**14.6.** Составьте выражения общих констант нестойкости комплексных ионов, указанных в задании 14.5, и приведите их значения. Какой из этих ионов является наиболее устойчивым?

**14.7.** Вычислите  $\Delta G^0_{298}$  процесса диссоциации комплексных ионов, приведенных в задании 14.5.

---

Необходимые для выполнения заданий 14.6 и 14.7 значения  $K_{\text{нест.}}$  представлены в Приложении 1.



## 15. ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ

### *А. Теоретическая часть*

**Окислительно-восстановительными** называют реакции, протекающие с изменением степеней окисления атомов некоторых химических элементов, входящих в состав реагирующих веществ и продуктов реакции [2, 4].

**Степень окисления** соответствует условному заряду атома элемента в соединении, исходя из предположения, что любая молекула состоит из **простых ионов**. Расчет степеней окисления атомов химических элементов, входящих в состав молекул или ионов сложных веществ, выполняется на основе того, что:

- водород проявляет степень окисления +1, кроме гидридов ( $\text{NaH}$ ,  $\text{CaH}_2$ ...);
- кислород обладает степенью окисления –2, кроме пероксидов, надпероксидов, озонидов и фторида кислорода(II);
- степени окисления элементов IA, IIA, IIIA подгрупп постоянны: +1, +2, +3 соответственно;
- степень окисления атомов элементов в простых веществах равна нулю ( $\overset{0}{\text{Li}}$ ,  $\overset{0}{\text{Al}}$ ,  $\overset{0}{\text{Fe}}$ ,  $\overset{0}{\text{H}_2}$ ,  $\overset{0}{\text{Cl}_2}$ ,  $\overset{0}{\text{O}_2}$ );
- алгебраическая сумма степеней окисления атомов всех элементов в молекуле равна нулю, а в ионе – заряду иона.

Многие химические элементы имеют несколько значений степени окисления. Так, степени окисления хлора принимают следующие значения:

–1 ( $\text{HCl}$ ); +1 ( $\text{HClO}$ ); +3 ( $\text{HClO}_2$ ); +5 ( $\text{HClO}_3$ ); +7 ( $\text{HClO}_4$ ).

Высшая степень окисления (наибольшее положительное значение) для большинства элементов равна номеру группы периодической системы, в которой он находится.

В ходе окислительно-восстановительных реакций одни атомы, входящие в состав реагирующих веществ, понижают свою степень окисления, другие – повышают. Первые вещества называют **окислителями**, вторые – **восстановителями**. При



этом окислители восстанавливаются, а восстановители окисляются.

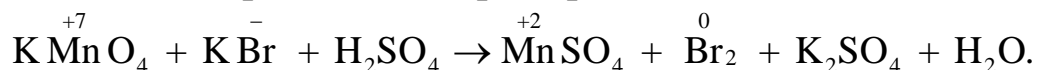
Для составления уравнения окислительно-восстановительной реакции необходимо:

- 1) правильно определить продукты реакции;
- 2) расставить стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции.

Известны два метода составления уравнений окислительно-восстановительных реакций: **метод электронного баланса** и **ионно-электронных уравнений** (метод полуреакций).

Первый метод подбора стехиометрических коэффициентов, основанный на сравнении степеней окисления атомов химических элементов, входящих в состав исходных веществ и продуктов реакции, обычно **применяют для сухих высокотемпературных окислительно-восстановительных реакций** (сплавление, обжиг, термическое разложение и др.). Составление уравнений при этом осуществляется в несколько стадий.

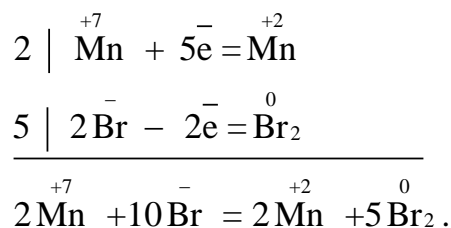
1. Записывается схема реакции с указанием степеней окисления атомов химических элементов, которые их изменяют в ходе реакции, например:



В исходных веществах изменяют степень окисления атомы марганца и брома. Следовательно, перманганат калия  $\text{KMnO}_4$  – окислитель (атомы марганца понижают степень окисления), а бромид калия  $\text{KBr}$  – восстановитель (атомы брома повышают степень окисления).

2. Составляются электронные уравнения процессов окисления и восстановления, уравнивая в левой и правой частях уравнений число атомов каждого элемента и электрические заряды по величине и знаку. Определяются из наименьшего общего кратного для числа электронов этих процессов коэффициенты при восстановителе, окислителе и продуктах их превращения:





3. Полученные коэффициенты проставляются в схеме реакции:



4. Подбираются недостающие стехиометрические коэффициенты в последовательности: сульфат калия, серная кислота, вода.

5. Проверяется правильность подобранных стехиометрических коэффициентов, используя закон сохранения массы веществ: число атомов каждого химического элемента в исходных веществах и продуктах реакции должно быть одинаковым.

**Метод ионно-электронных уравнений применяют для реакций, протекающих в водных растворах электролитов.** Он основан на составлении вспомогательных ионно-электронных уравнений процессов восстановления и окисления (полуреакций) с последующим их суммированием с учетом:

- общих правил составления ионно-молекулярных уравнений (см. реакции ионного обмена);
- характера (рН) среды (кислая, нейтральная, щелочная), в которой протекает данная окислительно-восстановительная реакция.

Рассматривается три случая подведения материального баланса в ионно-электронных уравнениях по кислороду и водороду в различных средах:

1) **в кислой среде** ( $\text{pH} < 7$ ) используются **молекулы воды** ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и **катионы водорода** ( $\text{H}^+$ ), при этом на каждый недостающий атом кислорода слева или справа уравнения полуреакции прибавляется одна молекула воды, а в противоположной части получаются два катиона водорода ( $2\text{H}^+$ );

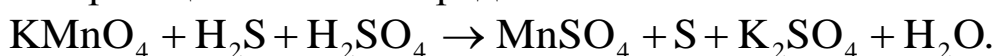


2) в щелочной среде ( $\text{pH} > 7$ ) используются молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и гидроксид-ионы ( $\text{OH}^-$ ), при этом на каждый избыточный атом кислорода слева или справа уравнения полуреакции прибавляется одна молекула воды, а в противоположной части получаются два гидроксид-иона ( $2\text{OH}^-$ );

3) в нейтральной среде ( $\text{pH} = 7$ ) при подведении материального баланса по кислороду и водороду молекулы воды прибавляются только в левую часть уравнения полуреакции, при недостатке атомов кислорода слева уравнивается по кислороду в кислой среде, а при избытке – по щелочной, с последующим подведением баланса по  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

### ***Б. Примеры решения типовых задач***

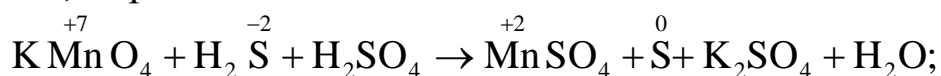
**Пример 1.** Используя метод полуреакций, расставьте коэффициенты в уравнении окислительно-восстановительной реакции в кислой среде:



#### ***Решение:***

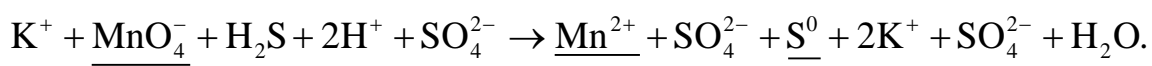
Для определения стехиометрических коэффициентов в уравнениях реакций, протекающих в водных растворах электролитов, следует действовать в несколько стадий.

1. Составляется схема реакции и указывается степень окисления атомов тех химических элементов, которые их изменили, определяется окислитель и восстановитель:



$\text{KMnO}_4$  – окислитель,  $\text{H}_2\text{S}$  – восстановитель.

2. Записывается ионно-молекулярная схема реакции по общим правилам составления ионно-молекулярных уравнений:



Составляются схемы процессов восстановления и окисления. Уравнивается число атомов каждого элемента в левой и правой частях полуреакций. При подведении материально-

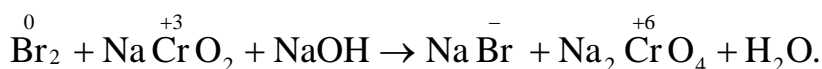




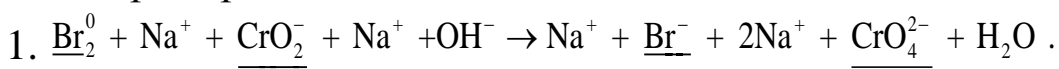


NaCrO<sub>2</sub>. Он содержит атом хрома в степени окисления +3, который окисляется до С.О. +6, – Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>. Кроме того, образуются молекулы воды.

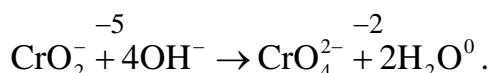
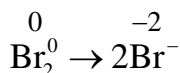
Следовательно, схема реакции имеет вид:



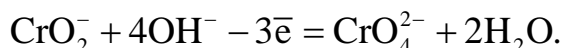
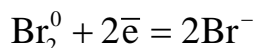
Далее нужно действовать в той же последовательности, что и в примере 1.



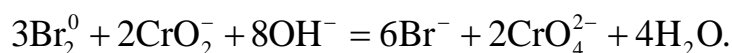
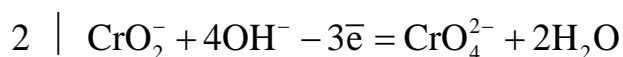
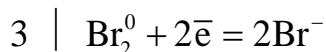
2. При составлении схемы процесса окисления учитывается, что реакция протекает в щелочной среде. При подведении материального баланса используются только гидроксид-ионы OH<sup>–</sup> и молекулы воды H<sub>2</sub>O:



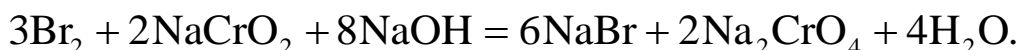
3. Уравниваются суммарные заряды левых и правых частей полуреакций:



4. Определяются основные коэффициенты, уравнивая число электронов в полуреакциях восстановления и окисления, суммируются они:



5. На основании суммарного ионно-молекулярного уравнения расставляются коэффициенты в уравнении реакции:



## ***В. Индивидуальные задания***

**15.1.** Назовите указанные вещества и определите, какие свойства в окислительно-восстановительных реакциях они могут проявлять:

- только окислительные;
- только восстановительные;
- как окислительные, так и восстановительные.

Ответ подтвердите электронными уравнениями.

| <b>а)</b>                                     | <b>б)</b>                 | <b>в)</b>                  | <b>г)</b>                  |
|---|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>01</b> $\text{H}_2\text{SO}_4$             | $\text{KI}$ ,             | $\text{P}_2\text{O}_3$ ,   | $\text{NH}_3$ ;            |
| <b>02</b> $\text{HNO}_3$                      | $\text{C}$ ,              | $\text{SiH}_4$ ,           | $\text{H}_3\text{PO}_3$ ;  |
| <b>03</b> $\text{KMnO}_4$ ,                   | $\text{KNO}_2$ ,          | $\text{FeCl}_2$ ,          | $\text{Ca}$ ;              |
| <b>04</b> $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , | $\text{FeSO}_4$ ,         | $\text{KBrO}$ ,            | $\text{Ag}$ ;              |
| <b>05</b> $\text{FeCl}_3$ ,                   | $\text{Zn}$ ,             | $\text{Cl}_2$ ,            | $\text{H}_2\text{SeO}_4$   |
| <b>06</b> $\text{PbO}_2$ ,                    | $\text{Na}_2\text{O}_2$ , | $\text{H}_2\text{SeO}_3$ , | $\text{Mg}$ ;              |
| <b>07</b> $\text{S}$ ,                        | $\text{CuCl}$ ,           | $\text{HClO}_4$ ,          | $\text{CaH}_2$ ;           |
| <b>08</b> $\text{H}_2\text{S}$ ,              | $\text{MnO}_2$ ,          | $\text{H}_3\text{AsO}_4$ , | $\text{SeO}_2$ ;           |
| <b>09</b> $\text{H}_2$ ,                      | $\text{NaClO}$ ,          | $\text{SbH}_3$ ,           | $\text{SnCl}_4$ ;          |
| <b>10</b> $\text{KClO}_3$ ,                   | $\text{HI}$ ,             | $\text{O}_2$ ,             | $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ; |
| <b>11</b> $\text{HNO}_3$ (р)                  | $\text{PH}_3$ ,           | $\text{K}_2\text{SO}_3$ ,  | $\text{Se}$ ;              |
| <b>12</b> $\text{HClO}$ ,                     | $\text{H}_2\text{Se}$ ,   | $\text{Al}$ ,              | $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ; |
| <b>13</b> $\text{K}_2\text{MnO}_4$ ,          | $\text{HBr}$ ,            | $\text{MnSO}_4$ ,          | $\text{O}_3$ ;             |
| <b>14</b> $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,           | $\text{Pb}$ ,             | $\text{NO}_2$ ,            | $\text{V}_2\text{O}_5$ ;   |
| <b>15</b> $\text{Mn(OH)}_2$ ,                 | $\text{Br}_2$ ,           | $\text{HNO}_3$ ,           | $\text{Na}$ ;              |
| <b>16</b> $\text{N}_2\text{O}_5$ ,            | $\text{CrCl}_3$ ,         | $\text{Ba}$ ,              | $\text{NaIO}$ ;            |
| <b>17</b> $\text{H}_2\text{O}_2$ ,            | $\text{AsH}_3$ ,          | $\text{KBrO}_3$ ,          | $\text{Sb}_2\text{O}_5$ ;  |

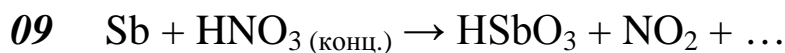
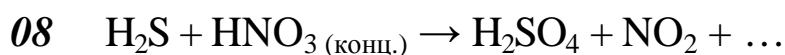
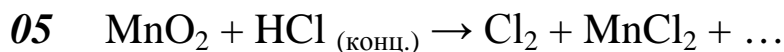
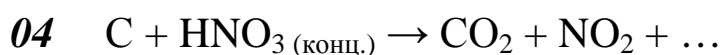
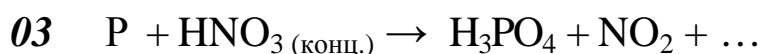
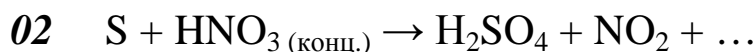


|           |                                  |   |                                    |                                  |
|-----------|----------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|
| <b>18</b> | KBr,                             | SO <sub>2</sub> ,                                 | CuCl <sub>2</sub> ,                | Be;                              |
| <b>19</b> | Cu,                              | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , | KBiO <sub>3</sub> ,                | Te;                              |
| <b>20</b> | BaO <sub>2</sub> ,               | Al,   | HNO <sub>2</sub> ,                 | Mn <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ; |
| <b>21</b> | F <sub>2</sub> ,                 | KBrO <sub>3</sub> ,                               | HgCl <sub>2</sub> ,                | Fe;                              |
| <b>22</b> | SnCl <sub>2</sub> ,              | HBrO,   | OF <sub>2</sub> ,                  | P;                               |
| <b>23</b> | HCl,                             | H <sub>2</sub> Te,                                | Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> , | I <sub>2</sub> ;                 |
| <b>24</b> | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , | LiH,  | Fe(OH) <sub>3</sub> ,              | Na <sub>2</sub> S.               |

**15.2.** Закончите уравнения окислительно-восстановительных реакций, протекающих в водных растворах, и определите их тип.

Расставьте коэффициенты, используя метод ионно-электронных уравнений:

а) реакции в кислой среде:



- 12**  $\text{HCl}_{(\text{конц.})} + \text{KMnO}_4 \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{MnCl}_2 + \dots$
- 13**  $\text{Co} + \text{HNO}_3_{(\text{разб.})} \rightarrow \text{Co}(\text{NO}_3)_2 + \text{N}_2 + \dots$
- 14**  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{K}_2\text{S} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MnSO}_4 + \text{S} + \dots$
- 15**  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{KI} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{I}_2 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 16**  $\text{Hg} + \text{HNO}_3_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{Hg}(\text{NO}_3)_2 + \text{NO}_2 + \dots$
- 17**  $\text{Ag} + \text{HNO}_3_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{AgNO}_3 + \text{NO}_2 + \dots$
- 18**  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 19**  $\text{Au} + \text{HNO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{H}[\text{AuCl}_4] + \text{NO} + \dots$
- 20**  $\text{MnO}_2 + \text{KI} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{I}_2 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 21**  $\text{Sn} + \text{HNO}_3_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{H}_2\text{SnO}_3 + \text{NO}_2 + \dots$
- 22**  $\text{HBr} + \text{H}_2\text{SO}_4_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{Br}_2 + \text{SO}_2 + \dots$
- 23**  $\text{Cu} + \text{H}_2\text{SO}_4_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{SO}_2 + \dots$
- 24**  $\text{MnO}_2 + \text{KBr} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Br}_2 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 25**  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 26**  $\text{FeSO}_4 + \text{KClO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{KCl} + \dots$
- 27**  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{NaNO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{NaNO}_3 + \dots$
- 28**  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{KI} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{I}_2 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 29**  $\text{HIO}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{HI} + \dots$
- 30**  $\text{HClO}_3 + \text{HCl}_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{Cl}_2 + \dots$
- 31**  $\text{Na}_2\text{CrO}_4 + \text{NaBr} + \text{HCl} \rightarrow \text{CrCl}_3 + \text{Br}_2 + \dots$
- 32**  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_3\text{PO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 33**  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 34**  $\text{H}_2\text{S} + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{S} + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 35**  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{HCl}_{(\text{конц.})} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{CrCl}_3 + \dots$



- 36  $\text{Mg} + \text{HNO}_3 (\text{разб.}) \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \dots$
- 37  $\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{FeCl}_2 + \dots$
- 38  $\text{MnO}_2 + \text{KI} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{I}_2 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 39  $\text{Zn} + \text{HNO}_3 (\text{разб.}) \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 + \dots$
- 40  $\text{Zn} + \text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{AsH}_3 + \text{ZnCl}_2 + \dots$
- 41  $\text{Zn} + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 42  $\text{KI} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NO} + \text{I}_2 + \dots$
- 43  $\text{Ag} + \text{H}_2\text{SO}_4 (\text{конц.}) \rightarrow \text{Ag}_2\text{SO}_4 + \text{SO}_2 + \dots$
- 44  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 45  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MnSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 46  $\text{KNO}_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KNO}_3 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 47  $\text{Si} + \text{HNO}_3 + \text{HF} \rightarrow \text{H}_2[\text{SiF}_6] + \text{NO} + \dots$
- 48  $\text{CuCl} + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{HCl} \rightarrow \text{CuCl}_2 + \text{CrCl}_3 + \dots$
- 49  $\text{FeCl}_2 + \text{KMnO}_4 + \text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_3 + \text{MnCl}_2 + \dots$
- 50  $\text{FeSO}_4 + \text{HBrO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Br}_2 + \dots$
- 51  $\text{FeSO}_4 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 52  $\text{KClO}_3 + \text{KI} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KCl} + \text{I}_2 + \dots$
- 53  $\text{KIO}_3 + \text{KI} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{I}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 54  $\text{KNO}_2 + \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NO} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$
- 55  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{KNO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MnSO}_4 + \text{KNO}_3 + \dots$
- 56  $\text{NaI} + \text{NaNO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NO} + \text{I}_2 + \dots$
- 57  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{O}_2 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 58  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{K}_2\text{S} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 59  $\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$



- 60  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{PbO}_2 + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{HMnO}_4 + \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + \dots$
- 61  $\text{HIO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{I}_2 + \text{O}_2 + \dots$
- 62  $\text{AsH}_3 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_3\text{AsO}_4 + \text{MnSO}_4 + \dots$
- 63  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HClO} \rightarrow \text{HCl} + \text{O}_2 + \dots$
- 64  $\text{HI} + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{I}_2 + \dots$
- 65  $\text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{NO} + \dots$
- 66  $\text{H}_2\text{SO}_4 (\text{конц.}) + \text{KI} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{I}_2 + \dots$
- 67  $\text{Zn} + \text{HNO}_3 (\text{оч. разб.}) \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 + \dots$
- 68  $\text{Pt} + \text{HNO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{H}_2[\text{PtCl}_6] + \text{NO} + \dots$
- 69  $\text{NaBr} + \text{NaBrO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Br}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 70  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{SnCl}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{SnCl}_4 + \text{CrCl}_3 + \dots$
- 71  $\text{NaNO}_2 + \text{FeCl}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{NO} + \text{FeCl}_3 + \dots$
- 72  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{O}_2 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \dots$

**б) реакции в нейтральной среде:**

- 01  $\text{KMnO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MnO}_2 + \dots$
- 02  $\text{KMnO}_4 + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{KNO}_3 + \dots$
- 03  $\text{KMnO}_4 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MnO}_2 + \dots$
- 04  $\text{SO}_2 + \text{Br}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 05  $\text{S} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 06  $\text{H}_2\text{S} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 07  $\text{SO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 + \dots$
- 08  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{Br}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HBr} + \dots$
- 09  $\text{NaH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \dots$



- 10**  $\text{Se} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SeO}_4 + \dots$
- 11**  $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{O}_2 + \dots$
- 12**  $\text{KMnO}_4 + \text{MnCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{HCl} + \dots$
- 13**  $\text{KMnO}_4 + \text{MnSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 14**  $\text{KI} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HIO}_3 + \dots$
- 15**  $\text{Na}_2\text{S} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{S} + \dots$
- 16**  $\text{SO}_2 + \text{NaIO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 17**  $\text{SO}_2 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl} + \dots$
- 18**  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 19**  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + \text{KI} \rightarrow \text{CuI} + \text{I}_2 + \dots$
- 20**  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{Br}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HBr} + \dots$
- 21**  $\text{Se} + \text{AuCl}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Au} + \text{H}_2\text{SeO}_3 + \dots$
- 22**  $\text{ReO}_2 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HReO}_4 + \dots$
- 23**  $\text{AgNO}_3 + \text{AsH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ag} + \text{H}_3\text{AsO}_4 + \dots$
- 24**  $\text{CaH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \dots$
- 25**  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KMnO}_4 + \text{MnO}_2 + \dots$
- 26**  $\text{Ca}(\text{ClO})\text{Cl} + \text{NaBr} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{Br}_2 + \dots$
- 27**  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl} + \dots$
- 28**  $\text{SO}_2 + \text{SeO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Se} + \dots$
- 29**  $\text{Na}_3\text{AsO}_3 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_3\text{AsO}_4 + \dots$
- 30**  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{KMnO}_4 \rightarrow \text{O}_2 + \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 31**  $\text{K}_2\text{S} + \text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{S} + \text{MnO}_2 + \dots$
- 32**  $\text{P} + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{K}_2\text{HPO}_4 + \text{MnO}_2 + \dots$
- 33**  $\text{Cl}_2 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HIO}_3 + \dots$



- 34  $\text{SiH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3 + \dots$
- 35  $\text{Br}_2 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HBrO}_3 + \dots$
- 36  $\text{H}_2\text{S} + \text{Br}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 37  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{S} + \dots$
- 38  $\text{PdCl}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Pd} + \text{CO}_2 + \dots$
- 39  $\text{KI} + \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{I}_2 + \dots$
- 40  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{KI} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{I}_2 + \dots$
- 41  $\text{KI} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{KNO}_2 + \dots$
- 42  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \text{KI} \rightarrow \text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \dots$
- 43  $\text{Au} + \text{NaCN} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2] + \dots$
- 44  $\text{Cu} + \text{KCN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}[\text{Cu}(\text{CN})_2] + \text{H}_2 + \dots$
- 45  $\text{KClO} + \text{K}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{KCl} + \dots$
- 46  $\text{SO}_2 + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \dots$
- 47  $\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \dots$
- 48  $\text{As} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{AsO}_4 + \dots$
- 49  $\text{As} + \text{NaClO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{AsO}_4 + \dots$
- 50  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \dots$
- 51  $\text{NO}_2 + \text{NaMnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{HNO}_3 + \dots$
- 52  $\text{I}_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HI} + \dots$
- 53  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 54  $\text{K}_2\text{ReO}_4 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KReO}_4 + \dots$
- 55  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 56  $\text{KMnO}_4 + \text{MnSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 57  $\text{Na}_2\text{SeO}_3 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SeO}_4 + \dots$





- 58  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{KMnO}_4 + \dots$
- 59  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaClO} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 60  $\text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{K}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cr}(\text{OH})_3 + \text{S} + \dots$
- 61  $\text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{KBr} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{Br}_2 + \dots$
- 62  $\text{KMnO}_4 + \text{KI} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{I}_2 + \text{MnO}_2 + \dots$
- 63  $\text{KI} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{I}_2 + \dots$
- 64  $\text{K}_2\text{SO}_3 + \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 65  $\text{NaNO}_2 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaNO}_3 + \dots$
- 66  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{K}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 67  $\text{NaNO}_2 + \text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{NaNO}_3 + \dots$
- 68  $\text{FeCl}_3 + \text{KI} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{I}_2 + \dots$
- 69  $\text{SeO}_2 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SeO}_4 + \dots$
- 70  $\text{Na}_2\text{S} + \text{F}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 71  $\text{KMnO}_4 + \text{K}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{S} + \text{MnO}_2 + \dots$
- 72  $\text{K}_3\text{AsO}_3 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_3\text{AsO}_4 + \dots$

**в) Реакции в щелочной среде:**

- 01  $\text{CrCl}_3 + \text{NaClO} + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CrO}_4 + \text{NaCl} + \dots$
- 02  $\text{FeSO}_4 + \text{NaClO} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{NaCl} + \dots$
- 03  $\text{MnCl}_2 + \text{KBrO} + \text{KOH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{KBr} + \dots$
- 04  $\text{Be} + \text{KClO} + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2[\text{Be}(\text{OH})_4] + \dots$
- 05  $\text{Al} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_3[\text{Al}(\text{OH})_6] + \dots$
- 06  $\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_3 + \dots$
- 07  $\text{NO}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaNO}_3 + \text{NaNO}_2 + \dots$



- 08**  $\text{K}_2[\text{Sn}(\text{OH})_4] + \text{Bi}(\text{NO}_3)_3 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2[\text{Sn}(\text{OH})_6] + \text{Bi} + \dots$
- 09**  $\text{NaNO}_2 + \text{Cl}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{NaNO}_3 + \dots$
- 10**  $\text{Co}(\text{OH})_2 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_3 + \dots$
- 11**  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Br}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{BrO}_3)_2 + \text{CaBr}_2 + \dots$
- 12**  $\text{S} + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_3 + \text{K}_2\text{S} + \dots$
- 13**  $\text{P} + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KH}_2\text{PO}_2 + \text{PH}_3$
- 14**  $\text{ClO}_2 + \text{Ba}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ba}(\text{ClO}_2)_2 + \text{Ba}(\text{ClO}_3)_2 + \dots$
- 15**  $\text{CsOH}_{(\text{KOHII.})} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CsBr} + \text{CsBrO}_3 + \dots$
- 16**  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \text{O}_2 + \dots$
- 17**  $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{OH})_6] + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{KBr} + \dots$
- 18**  $\text{Br}_2 + \text{KOH}_{(\text{KOHII.})} \rightarrow \text{KBrO}_3 + \text{KBr} + \dots$
- 19**  $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{OH})_6] + \text{KClO}_3 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{KCl} + \dots$
- 20**  $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{Cl}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \dots$
- 21**  $\text{Na}_2[\text{Sn}(\text{OH})_4] + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2[\text{Sn}(\text{OH})_6] + \dots$
- 22**  $\text{Be} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2[\text{Be}(\text{OH})_4] + \dots$
- 23**  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{KBr} + \dots$
- 24**  $\text{Cl}_2 + \text{NaOH}_{(\text{пaзб.})} \rightarrow \text{NaClO} + \text{NaCl} + \dots$
- 25**  $\text{AuCl}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{Au} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 26**  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 27**  $\text{S} + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \dots$
- 28**  $\text{KMnO}_4 + \text{NaNO}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{NaNO}_3 + \dots$
- 29**  $\text{CoBr}_2 + \text{O}_2 + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_3 + \text{KBr}$
- 30**  $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{Cl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{FeO}_4 + \text{KCl} + \dots$
- 31**  $\text{ClO}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{KClO}_3 + \text{KClO}_2 + \dots$



- 32  $\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \dots$
- 33  $\text{MnSO}_4 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{MnO}_4 + \text{NaBr} + \dots$
- 34  $\text{CrCl}_3 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CrO}_4 + \text{NaBr} + \dots$
- 35  $\text{MnSO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 36  $\text{I}_2 + \text{NaOH}_{(\text{KOHII.})} \rightarrow \text{NaIO}_3 + \text{NaI} + \dots$
- 37  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{AgNO}_3 + \text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{Ag} + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \dots$
- 38  $\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{Cl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{KBiO}_3 + \text{KCl} + \dots$
- 39  $\text{Si} + \text{H}_2\text{O} + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{SiO}_3 + \dots$
- 40  $\text{Na}_2\text{SeO}_3 + \text{Cl}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SeO}_4 + \text{NaCl} + \dots$
- 41  $\text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{KSbO}_3 + \text{KBr} + \dots$
- 42  $\text{CrBr}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CrO}_4 + \text{NaBr} + \dots$
- 43  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{KMnO}_4 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{MnO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \dots$
- 44  $\text{MnCl}_2 + \text{KClO} + \text{KOH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{KCl} + \dots$
- 45  $\text{MnBr}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 46  $\text{Sn} + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2[\text{Sn}(\text{OH})_4] + \dots$
- 47  $\text{SiH}_4 + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{SiO}_3 + \dots$
- 48  $\text{Ga} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_3[\text{Ga}(\text{OH})_6] + \dots$
- 49  $\text{Pb} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2[\text{Pb}(\text{OH})_4] + \dots$
- 50  $\text{NaBrO}_3 + \text{F}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaBrO}_4 + \text{NaF} + \dots$
- 51  $\text{Mn}(\text{OH})_2 + \text{Cl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{KCl} + \dots$
- 52  $\text{KIO}_3 + \text{Cl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_5\text{IO}_6 + \text{KCl} + \dots$
- 53  $\text{BiCl}_3 + \text{SnCl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{Bi} + \text{K}_2[\text{Sn}(\text{OH})_6] + \dots$
- 54  $\text{Bi}(\text{OH})_3 + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{KBiO}_3 + \text{KBr} + \dots$
- 55  $\text{Se} + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{SeO}_3 + \text{K}_2\text{Se} + \dots$



- 56  $\text{Zn} + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4] + \dots$
- 57  $\text{PbO} + \text{ClO}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{PbO}_2 + \text{NaClO}_2 + \dots$
- 58  $\text{Cl}_2 + \text{FeCl}_3 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{FeO}_4 + \dots$
- 59  $\text{NO}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{KNO}_2 + \text{KNO}_3 + \dots$
- 60  $\text{AsH}_3 + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_3\text{AsO}_4 + \text{KBr} + \dots$
- 61  $\text{BiCl}_3 + \text{Cl}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaBiO}_3 + \text{NaCl} + \dots$
- 62  $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 + \text{Cl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{PbO}_2 + \text{KCl} + \dots$
- 63  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 + \text{Na}_2[\text{Sn}(\text{OH})_4] + \text{NaOH} \rightarrow \text{Bi} + \text{Na}_2[\text{Sn}(\text{OH})_6] + \dots$
- 64  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + \text{NaClO} + \text{NaOH} \rightarrow \text{PbO}_2 + \text{NaCl} + \dots$
- 65  $\text{Te} + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{TeO}_3 + \text{K}_2\text{Te} + \dots$
- 66  $\text{Sb} + \text{Br}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}[\text{Sb}(\text{OH})_6] + \dots$
- 67  $\text{KClO} + \text{Zn} + \text{KOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4] + \dots$
- 68  $\text{NaAsO}_2 + \text{I}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_3\text{AsO}_4 + \text{NaI} + \dots$
- 69  $\text{Cl}_2 + \text{KI} + \text{KOH} \rightarrow \text{KIO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \dots$
- 70  $\text{Br}_2 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{KBr} + \dots$
- 71  $\text{ClO}_2 + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaClO}_2 + \text{NaClO}_3 + \dots$
- 72  $\text{KBrO} + \text{MnCl}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{KBr} + \dots$

**15.3.** Используя значения стандартных электродных потенциалов, определите, между какими окислительно-восстановительными системами возможны реакции. Составьте ионно-молекулярные и молекулярные уравнения этих реакций.



|          |  | $E^0_{298}, \text{ B}$ |
|----------|--|------------------------|
| <b>1</b> | $\text{I}_{2(\text{кр.})} + 2\bar{e} = 2\text{I}^-$  | +0,54                  |
|          | $\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$       | +0,17                  |
|          | $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$                 | +1,23                  |
| <b>2</b> | $\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = \text{NO}_2^- + 2\text{OH}^-$                 | +0,01                  |
|          | $\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3\bar{e} = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$                | +0,60                  |
|          | $\text{S} + 2\bar{e} = \text{S}^{2-}$  | -0,48                  |
| <b>3</b> | $\text{Co}(\text{OH})_3 + \bar{e} = \text{Co}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$                      | +0,17                  |
|          | $\text{BrO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = \text{Br}^- + 2\text{OH}^-$                    | +0,76                  |
|          | $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = \text{O}_2 + 2\text{OH}^-$                       | +1,24                  |
| <b>4</b> | $\text{Fe}^{3+} + \bar{e} = \text{Fe}^{2+}$  | +0,77                  |
|          | $\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\bar{e} = \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$               | +1,51                  |
|          | $\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{HAsO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$        | +0,56                  |
| <b>5</b> | $\text{H}_3\text{PO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{H}_3\text{PO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  | -0,28                  |
|          | $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\bar{e} = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ | +1,33                  |
|          | $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\bar{e} = \text{Pb} + 2\text{H}_2\text{O}$                      | +0,66                  |
| <b>6</b> | $2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2\bar{e} = \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$                    | +1,63                  |
|          | $\text{H}_2\text{SO}_3 + 4\text{H}^+ + 4\bar{e} = \text{S} + 3\text{H}_2\text{O}$              | +0,45                  |
|          | $\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \bar{e} = \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$                     | +0,80                  |
| <b>7</b> | $2\text{NO} + 4\text{H}^+ + 4\bar{e} = \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$                       | +1,68                  |
|          | $\text{Br}_{2(\text{ж.})} + 2\bar{e} = 2\text{Br}^-$   | +1,07                  |
|          | $\text{H}_2\text{SeO}_3 + 6\text{H}^+ + 6\bar{e} = \text{H}_2\text{Se} + 3\text{H}_2\text{O}$  | +0,36                  |
| <b>8</b> | $\text{MnO}_4^- + \bar{e} = \text{MnO}_4^{2-}$   | +0,56                  |
|          | $\text{ClO}_3^- + 6\text{H}^+ + 6\bar{e} = \text{Cl}^- + 3\text{H}_2\text{O}$                  | +1,45                  |



|           |  |        |
|-----------|--|--------|
|           | $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$                       | - 0,12 |
| <b>9</b>  | $\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\bar{\text{e}} = \text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$             | +0,15  |
|           | $\text{Cl}_2 + 2\bar{\text{e}} = 2\text{Cl}^-$   | +1,36  |
|           | $\text{HIO} + \text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{I}^- + \text{H}_2\text{O}$                        | +0,99  |
| <b>10</b> | $2\text{IO}_3^- + 6\text{H}_2\text{O} + 10\bar{\text{e}} = \text{I}_2 + 12\text{OH}^-$               | +0,21  |
|           | $\text{SeO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{SeO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$        | +0,05  |
|           | $\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3\bar{\text{e}} = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$               | +0,60  |
| <b>11</b> | $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-} + 2\bar{\text{e}} = \text{Zn} + 4\text{OH}^-$                         | - 1,22 |
|           | $2\text{ClO}^- + 2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{Cl}_2 + 4\text{OH}^-$                 | +0,49  |
|           | $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{O}_2 + 2\text{OH}^-$                      | +1,24  |
| <b>12</b> | $2\text{HNO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\bar{\text{e}} = \text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$                   | +1,44  |
|           | $\text{H}_3\text{PO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{H}_3\text{PO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | - 0,28 |
|           | $\text{H}_2\text{SO}_3 + 4\text{H}^+ + 4\bar{\text{e}} = \text{S} + 3\text{H}_2\text{O}$             | +0,45  |
| <b>13</b> | $2\text{BrO}_3^- + 6\text{H}_2\text{O} + 10\bar{\text{e}} = \text{Br}_{2(\text{ж})} + 12\text{OH}^-$ | +0,50  |
|           | $\text{AsO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{AsO}_2^- + 4\text{OH}^-$          | - 0,71 |
|           | $2\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O} + 4\bar{\text{e}} = \text{N}_2 + 4\text{OH}^-$                     | +0,85  |
| <b>14</b> | $\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 8\bar{\text{e}} = \text{S}^{2-} + 8\text{OH}^-$            | - 0,68 |
|           | $\text{IO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\bar{\text{e}} = \text{IO}^- + 4\text{OH}^-$                 | +0,56  |
|           | $\text{BrO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\bar{\text{e}} = \text{BrO}^- + 4\text{OH}^-$               | +0,54  |
| <b>15</b> | $\text{Sn}^{4+} + 2\bar{\text{e}} = \text{Sn}^{2+}$  | +0,15  |
|           | $2\text{IO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\bar{\text{e}} = \text{I}_{2(\text{кр.})} + 6\text{H}_2\text{O}$  | +1,20  |
|           | $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{H}_2\text{O}_2$                                  | +0,68  |
| <b>16</b> | $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$                | +1,46  |
|           | $\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$      | +0,17  |

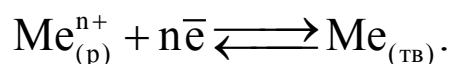
|           |   |        |
|-----------|---|--------|
|           | $2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$                    | +1,63  |
| <b>17</b> | $\text{AsO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{AsO}_2^- + 4\text{OH}^-$           | - 0,71 |
|           | $\text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{N}_2 + 2\text{OH}^-$               | +0,94  |
|           | $\text{ClO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O} + 6\bar{\text{e}} = \text{Cl}^- + 6\text{OH}^-$                 | +0,63  |
| <b>18</b> | $\text{CrO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 3\bar{\text{e}} = \text{Cr}(\text{OH})_3 + 5\text{OH}^-$   | - 0,13 |
|           | $\text{Pb}^{4+} + 2\bar{\text{e}} = \text{Pb}^{2+}$   | +1,69  |
|           | $\text{MnO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{\text{e}} = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$             | +0,60  |
| <b>19</b> | $2\text{HNO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\bar{\text{e}} = \text{N}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$            | +1,30  |
|           | $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{H}_2\text{O}_2$                                   | +0,68  |
|           | $2\text{HBrO} + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{Br}_{2(\text{ж.})} + 2\text{H}_2\text{O}$       | +1,60  |
| <b>20</b> | $2\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O} + 4\bar{\text{e}} = \text{N}_2 + 4\text{OH}^-$                      | +0,85  |
|           | $\text{IO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O} + 6\bar{\text{e}} = \text{I}^- + 6\text{OH}^-$                   | +0,26  |
|           | $\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3\bar{\text{e}} = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$                | +0,60  |
| <b>21</b> | $\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+ + 8\bar{\text{e}} = \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$                  | +1,38  |
|           | $\text{TeO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{TeO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$          | +0,90  |
|           | $\text{SO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ + 6\bar{\text{e}} = \text{S}^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$              | +0,23  |
| <b>22</b> | $\text{I}_{2(\text{кр.})} + 2\bar{\text{e}} = 2\text{I}^-$  | +0,54  |
|           | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\bar{\text{e}} = 2\text{H}_2\text{O}$                                    | +1,23  |
|           | $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\bar{\text{e}} = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ | +1,33  |
| <b>23</b> | $\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\bar{\text{e}} = \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$               | +1,51  |
|           | $\text{Fe}^{3+} + \bar{\text{e}} = \text{Fe}^{2+}$  | +0,77  |
|           | $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{H}_2\text{O}_2$                                   | +0,68  |
| <b>24</b> | $\text{H}_3\text{BO}_3 + 3\text{H}^+ + 3\bar{\text{e}} = \text{B} + 3\text{H}_2\text{O}$              | - 0,87 |
|           | $\text{NO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$                        | +1,03  |
|           | $\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\bar{\text{e}} = \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$       | +0,17  |



## 16. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

### *А. Теоретическая часть*

При погружении металлической пластины в водный раствор, содержащий его ионы, между металлом и раствором устанавливается состояние равновесия:



А на поверхности раздела фаз образуется двойной электрический слой, возникает определенный скачок потенциала, который принято называть **электродным потенциалом,  $E$**  [2, 4].

Знак и величина потенциала зависят от положения равновесия между металлом и раствором. Электродный потенциал зависит от следующих основных факторов:

- от природы металла;
- от концентрации ионов металла в растворе;
- от температуры.

Зависимость величины потенциала ( $E_{\text{Me}^{n+}, \text{Me}}$ ) от указанных факторов выражается **уравнением Нернста**:

$$E_{\text{Me}^{n+}, \text{Me}} = E_{\text{Me}^{n+}, \text{Me}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_{\text{Me}^{n+}},$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/К·моль;  $T$  – температура по шкале Кельвина, К;  $n$  – число электронов, участвующих в электродном процессе;  $F$  – постоянная Фарадея, 96 500 Кл/моль;  $C$  – концентрация ионов металла в растворе, моль/дм<sup>3</sup>.

$E_{\text{Me}^{n+}, \text{Me}}^0$  – стандартный электродный потенциал рассматриваемой системы в **вольтах**. Это потенциал электрода при **стандартных условиях**:  $C_{\text{Me}^{n+}} = 1$  моль/дм<sup>3</sup>;  $T = 298$  К.

Измерить абсолютную величину электродного потенциала невозможно. Существуют методы измерения **только разности потенциалов между двумя электродами**.





Значения потенциалов различных электродов обычно измеряют относительно стандартного водородного электрода, стандартный потенциал которого условно принят равным нулю (при  $T = 298 \text{ K}$ ,  $P(\text{H}_2) = 101325 \text{ Па}$ ,  $c_{\text{H}^+} = 1 \text{ моль/дм}^3$ ):  $E_{\text{H}^+/\text{H}_2}^0 = 0$ .

Если измерить стандартные электродные потенциалы металлов ( $E^0$ , В) относительно стандартного водородного электрода и расположить их в порядке увеличения, получается **ряд напряжений металлов**.

В этом ряду слева направо происходит уменьшение химической активности металлов. Положение металлов в ряду напряжений позволяет предсказать возможность самопроизвольного протекания реакций замещения:

**самопроизвольно ( $\Delta G < 0$ ) могут протекать те реакции, в которых восстановитель имеет более отрицательный потенциал, чем окислитель ( $E_{\text{восст.}} < E_{\text{ок.}}$ ).** То есть

– каждый предшествующий металл (кроме щелочных и щелочноземельных) будет вытеснять все последующие металлы (стоящие правее в ряду напряжений) из водных растворов их солей;

– металлы, стоящие в ряду напряжений до водорода, вытесняют водород из водных растворов хлороводородной и разбавленной серной кислот с образованием растворимых солей.

По значениям стандартных электродных (окислительно-восстановительных) потенциалов можно судить о направлении и более сложных окислительно-восстановительных процессов, иными словами, чем меньше величина стандартного окислительно-восстановительного потенциала  $E_{\text{ox,red}}^0$ , тем активнее система как восстановитель, или чем больше величина  $E_{\text{ox,red}}^0$ , тем активнее система как окислитель.

Если окислительно-восстановительную реакцию осуществить так, чтобы процессы окисления и восстановления были пространственно разделены, и создать



возможность перехода электронов от восстановителя к окислителю по проводнику (внешней цепи), то во внешней цепи возникнет направленное перемещение электронов – электрический ток. **При этом энергия самопроизвольной окислительно-восстановительной реакции ( $\Delta G < 0$ ) превращается в электрическую энергию.** Устройства, в которых происходит такое превращение, называются **химическими источниками электрической энергии, или гальваническими элементами.**

Всякий гальванический элемент состоит из двух электродов. Последние сообщаются друг с другом с помощью солевого мостика (стеклянная трубка, заполненная водным раствором хлорида калия). **Электрод, на котором в ходе реакции происходит процесс окисления, называется анодом. Электрод, на котором осуществляется восстановление, – катодом,** при этом  $E_A < E_K$ .

**Электродвижущей силой (э.д.с.)  $\Delta E$  называется разностью электродных потенциалов в разомкнутом гальваническом элементе.** Э.д.с. всегда является величиной положительной.

Чтобы рассчитать величину э.д.с., необходимо по уравнению Нернста вычислить потенциалы обоих электродов и вычесть из потенциала положительного электрода (катада) величину потенциала отрицательного электрода (анода).

**Электролизом** называют совокупность окислительно-восстановительных процессов, протекающих на электродах при пропускании постоянного электрического тока через расплав или раствор электролитов.

Аппарат, в котором осуществляется электролиз, называют электролизером. Он обычно состоит из ванны, заполненной электролитом, в который введены электроды. Отрицательный электрод называют **катодом**, а положительный электрод – **анодом**. На катоде происходит восстановление катионов (катодный процесс), а на аноде – окисление анионов (анодный процесс). Восстановительное и



окислительное действие электрического тока сильнее действия химических восстановителей и окислителей.

Рассматривается электролиз **расплава NaCl**. При температуре более 801 °C соль плавится и находится в виде катионов  $\text{Na}^+$  и анионов  $\text{Cl}^-$ :  $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ .

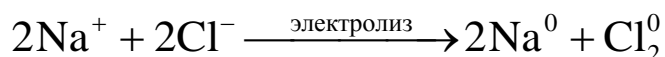
На отрицательно заряженном катоде идет процесс восстановления ионов  $\text{Na}^+$ :

(–) К:  $\text{Na}^+ + \bar{e} = \text{Na}^0$  (катодный процесс).

А на положительно заряженном аноде окисляются ионы  $\text{Cl}^-$ , образуя молекулы  $\text{Cl}_2$ :

(+) А:  $2\text{Cl}^- - 2\bar{e} = \text{Cl}_2^0$  (анодный процесс).

Уравнивая число электронов и суммируя катодный и анодный процессы, получается окислительно-восстановительная реакция, протекающая в процессе электролиза:



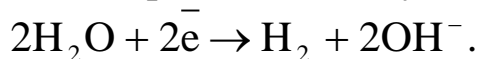
или в молекулярной форме:  $2\text{NaCl} \xrightarrow{\text{электролиз}} 2\text{Na} + \text{Cl}_2$ .

При электролизе **водных растворов**, кроме катионов и анионов соли, присутствуют молекулы воды. В связи с этим на катоде возможно протекание нескольких процессов восстановления, а на аноде – нескольких процессов окисления. Рассмотрим отдельно катодные и анодные процессы.

### ***Катодные процессы***

При электролизе водного раствора соли в катодном пространстве находятся катионы металла  $\text{Me}^{z+}$  и молекулы воды. Следовательно, на катоде могут протекать два вида процессов:

- восстановление катионов металла  $\text{Me}^{z+} + z\bar{e} \rightarrow \text{Me}$ ;
- восстановление водорода из молекул воды



При этом **на катоде** наиболее вероятным процессом восстановления будет процесс с **максимальным** электродным потенциалом.

При электролизе водных растворов солей



– металлов ряда напряжений от Li по Al включительно на катоде **восстанавливается водород из воды**:

– металлов, имеющих значения стандартных электродных потенциалов, больше  $E_{H^+, H_2} = -0,413V$  (Ni, Sn, Pb, а также от Cu до Au), на катоде практически полностью восстанавливается **металл**;

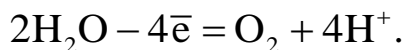
– металлов, стоящих в ряду напряжений между Al и Ni, на катоде, как правило, **одновременно восстанавливаются и металл, и водород из воды**.

### ***Анодные процессы***

**На аноде** наиболее вероятным процессом будет такая реакция окисления, которой отвечает **минимальный электродный потенциал**, т. е.

– при электролизе водных растворов солей галогенводородных кислот на аноде происходит окисление галогенид-ионов, например:  $2Cl^- - 2\bar{e} = Cl_2^0$ ;

– при электролизе водных растворов солей кислородсодержащих кислот (сульфатов, нитратов, ортофосфатов и т. д.) на аноде окисляются молекулы воды:



Количественная сторона электролиза была исследована М. Фарадеем и описывается законом, носящим его имя. Согласно этому закону, **масса электролита, подвергшаяся превращению при электролизе, а также массы образующихся на электродах веществ прямо пропорциональны количеству электричества, прошедшего через раствор или расплав электролита, и молярным массам эквивалентов соответствующих веществ**:

$$m(X) = \frac{M_{\text{экв}}(X) \cdot I \cdot \tau}{F},$$

где  $m(X)$  – масса электролита, подвергшаяся электролизу, или масса веществ – продуктов электролиза, г;  
 $M_{\text{экв}}(X)$  – молярная масса эквивалентов соответствующего вещества, г/моль;  $I$  – сила тока, А;



$\tau$  – время электролиза, с;  $F$  – постоянная Фарадея, 96 500 Кл/моль.

### ***Б. Индивидуальные задания***

**16.1.** Используя значения стандартных электродных потенциалов (приложение 2), определите возможность протекания реакции между металлом и водным раствором электролита. Закончите уравнения возможных реакций и расставьте коэффициенты в них с помощью метода электронных уравнений.

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| <b>01</b> | $\text{Fe} + \text{HCl}_{(\text{разб.})};$           | $\text{Au} + \text{AgNO}_3;$                         |
| <b>02</b> | $\text{Ag} + \text{Cu}(\text{NO}_3)_2;$              | $\text{Be} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ |
| <b>03</b> | $\text{Cu} + \text{HCl}_{(\text{разб.})};$           | $\text{Mn} + \text{FeSO}_4;$                         |
| <b>04</b> | $\text{Zn} + \text{MgSO}_4;$                         | $\text{Fe} + \text{HNO}_{3(\text{разб.})};$          |
| <b>05</b> | $\text{Mg} + \text{NiCl}_2;$                         | $\text{Bi} + \text{HCl}_{(\text{конц.})};$           |
| <b>06</b> | $\text{Ni} + \text{NaCl};$                           | $\text{Co} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{конц.})};$ |
| <b>07</b> | $\text{Pb} + \text{Zn}(\text{NO}_3)_2;$              | $\text{Zn} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ |
| <b>08</b> | $\text{Mg} + \text{CuSO}_4;$                         | $\text{Hg} + \text{HCl}_{(\text{конц.})};$           |
| <b>09</b> | $\text{Cu} + \text{AgNO}_3;$                         | $\text{Ni} + \text{HCl}_{(\text{разб.})};$           |
| <b>10</b> | $\text{Zn} + \text{FeSO}_4;$                         | $\text{Ag} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ |
| <b>11</b> | $\text{Ag} + \text{Pb}(\text{NO}_3)_2;$              | $\text{Cu} + \text{HNO}_{3(\text{разб.})};$          |
| <b>12</b> | $\text{Ni} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ | $\text{Bi} + \text{FeCl}_3;$                         |
| <b>13</b> | $\text{Cu} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ | $\text{Zn} + \text{NiSO}_4;$                         |
| <b>14</b> | $\text{Al} + \text{MgCl}_2;$                         | $\text{Mg} + \text{HCl}_{(\text{конц.})};$           |
| <b>15</b> | $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ | $\text{Sn} + \text{CoCl}_2;$                         |
| <b>16</b> | $\text{Zn} + \text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2;$    | $\text{Sn} + \text{H}_2\text{SO}_{4(\text{разб.})};$ |



|    |  |  |
|----|--|--|
| 17 | $\text{Fe} + \text{ZnCl}_2;$                         | $\text{Hg} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (конц.)};$ |
| 18 | $\text{Zn} + \text{CuSO}_4;$                         | $\text{Ag} + \text{HCl} \text{ (разб.)};$            |
| 19 | $\text{Pt} + \text{HCl} \text{ (разб.)};$            | $\text{Cd} + \text{Cu}(\text{NO}_3)_2;$              |
| 20 | $\text{Cr} + \text{AgNO}_3;$                         | $\text{Cu} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (разб.)};$ |
| 21 | $\text{Ag} + \text{Cr}(\text{NO}_3)_3;$              | $\text{Cr} + \text{HCl} \text{ (разб.)};$            |
| 22 | $\text{Al} + \text{NiSO}_4;$                         | $\text{Au} + \text{HNO}_3 \text{ (конц.)};$          |
| 23 | $\text{Co} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (разб.)};$ | $\text{Hg} + \text{SnSO}_4;$                         |
| 24 | $\text{Cu} + \text{AuCl}_3;$                         | $\text{Pt} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (конц.)}.$ |

**16.2.** Составьте схемы двух гальванических элементов, в одном из которых указанный металл является катодом, а в другом – анодом. Укажите для каждого элемента электродные процессы и рассчитайте ЭДС в стандартных условиях.

|    |          |    |          |
|----|----------|----|----------|
| 01 | Цинк     | 13 | Палладий |
| 02 | Никель   | 14 | Магний   |
| 03 | Медь     | 15 | Висмут   |
| 04 | Железо   | 16 | Бериллий |
| 05 | Олово    | 17 | Титан    |
| 06 | Свинец   | 18 | Молибден |
| 07 | Кобальт  | 19 | Технеций |
| 08 | Алюминий | 20 | Галлий   |
| 09 | Серебро  | 21 | Ванадий  |
| 10 | Скандий  | 22 | Таллий   |
| 11 | Хром     | 23 | Кадмий   |
| 12 | Марганец | 24 | Индий    |



**16.3.** Составьте схему гальванического элемента из пластин металлов  $M_1$  и  $M_2$ , опущенных в водные растворы солей с одноименными ионами  $M_1^{n+}$  и  $M_2^{n+}$ .

Вычислите ЭДС этого элемента при 298 К, если

а)  $c(M_1^{n+}) = c(M_2^{n+}) = 1$  моль/дм<sup>3</sup>;

б)  $c(M_1^{n+}) = 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>;  $c(M_2^{n+}) = 0,001$  моль/дм<sup>3</sup>.

|           | <b><math>M_1</math>:</b> | <b><math>M_2</math>:</b> |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| <b>01</b> | кобальт;                 | серебро;                 |
| <b>02</b> | олово;                   | палладий;                |
| <b>03</b> | медь;                    | свинец;                  |
| <b>04</b> | железо;                  | алюминий;                |
| <b>05</b> | никель;                  | олово;                   |
| <b>06</b> | хром;                    | кадмий;                  |
| <b>07</b> | магний;                  | цинк;                    |
| <b>08</b> | цинк;                    | кобальт;                 |
| <b>09</b> | свинец;                  | никель;                  |
| <b>10</b> | алюминий;                | цинк;                    |
| <b>11</b> | олово;                   | хром;                    |
| <b>12</b> | висмут;                  | серебро;                 |
| <b>13</b> | железо;                  | магний;                  |
| <b>14</b> | серебро;                 | свинец;                  |
| <b>15</b> | цинк;                    | марганец;                |
| <b>16</b> | медь;                    | никель;                  |
| <b>17</b> | платина;                 | медь;                    |
| <b>18</b> | кобальт;                 | свинец;                  |



|           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| <b>19</b> | никель;   | алюминий; |
| <b>20</b> | марганец; | хром;     |
| <b>21</b> | олово;    | медь;     |
| <b>22</b> | медь;     | серебро;  |
| <b>23</b> | алюминий; | висмут;   |
| <b>24</b> | кобальт;  | магний.   |

**16.4.** Напишите уравнения катодного и анодного процессов, протекающих при электролизе водных растворов указанных веществ на графитовых электродах.

|           |                    |                     |
|-----------|--------------------|---------------------|
| <b>01</b> | Бромид натрия      | Перманганат калия   |
| <b>02</b> | Хлорид меди(II)    | Нитрат олова(II)    |
| <b>03</b> | Нитрат свинца(II)  | Хлорид хрома(III)   |
| <b>04</b> | Хлорид бария       | Нитрат бериллия     |
| <b>05</b> | Нитрат кальция     | Иодид калия         |
| <b>06</b> | Сульфат хрома(III) | Нитрат платины(II)  |
| <b>07</b> | Бромид магния      | Ортофосфат натрия   |
| <b>08</b> | Сульфат калия      | Бромид марганца(II) |
| <b>09</b> | Нитрат магния      | Иодид кобальта(II)  |
| <b>10</b> | Нитрат цинка       | Иодид кальция       |
| <b>11</b> | Нитрат серебра(I)  | Сульфат лития       |
| <b>12</b> | Хлорид натрия      | Нитрат марганца(II) |
| <b>13</b> | Гидроксид натрия   | Сульфат никеля(II)  |
| <b>14</b> | Хлорид цинка       | Ортофосфат калия    |
| <b>15</b> | Сульфид калия      | Перхлорат натрия    |





|           |                    |                     |
|-----------|--------------------|---------------------|
| <b>16</b> | Гидроксид калия    | Сульфат железа(III) |
| <b>17</b> | Сульфат меди(II)   | Бромид калия        |
| <b>18</b> | Хлорид ртути(II)   | Сульфат бериллия    |
| <b>19</b> | Сульфат никеля(II) | Хлорид золота(III)  |
| <b>20</b> | Иодид натрия       | Нитрат меди(II)     |
| <b>21</b> | Хлорид железа(III) | Карбонат калия      |
| <b>22</b> | Сульфат алюминия   | Бромид лития        |
| <b>23</b> | Нитрат свинца(II)  | Дихромат калия      |
| <b>24</b> | Иодид цинка        | Хлорид никеля(II)   |

**16.5.** Напишите уравнения электродных процессов, протекающих при электролизе водных растворов солей с указанным анодом:

|           |                    |                     |
|-----------|--------------------|---------------------|
| <b>01</b> | сульфат меди(II)   | (анод медный);      |
| <b>02</b> | хлорид цинка       | (анод цинковый);    |
| <b>03</b> | сульфат алюминия   | (анод алюминиевый); |
| <b>04</b> | нитрат серебра(I)  | (анод серебряный);  |
| <b>05</b> | сульфат никеля(II) | (анод никелевый);   |
| <b>06</b> | хлорид железа(III) | (анод железный);    |
| <b>07</b> | нитрат свинца(II)  | (анод свинцовый);   |
| <b>08</b> | хлорид хрома(III)  | (анод хромовый);    |
| <b>09</b> | нитрат олова(II)   | (анод оловянный);   |
| <b>10</b> | хлорид кадмия(II)  | (анод кадмиевый);   |
| <b>11</b> | иодид цинка        | (анод цинковый);    |
| <b>12</b> | ацетат свинца(II)  | (анод свинцовый);   |



|           |                     |                     |
|-----------|---------------------|---------------------|
| <b>13</b> | бромид алюминия     | (анод алюминиевый); |
| <b>14</b> | нитрат марганца(II) | (анод марганцевый); |
| <b>15</b> | нитрат кобальта(II) | (анод кобальтовый); |
| <b>16</b> | сульфат хрома(III)  | (анод хромовый);    |
| <b>17</b> | хлорид олова(II)    | (анод оловянный);   |
| <b>18</b> | иодид кобальта(II)  | (анод кобальтовый); |
| <b>19</b> | сульфат цинка       | (анод цинковый);    |
| <b>20</b> | хлорид золота(III)  | (анод золотой);     |
| <b>21</b> | хлорид меди(II)     | (анод медный);      |
| <b>22</b> | нитрат никеля(II)   | (анод никелевый);   |
| <b>23</b> | сульфат железа(III) | (анод железный);    |
| <b>24</b> | хлорид платины(IV)  | (анод платиновый).  |

**16.6.** Укажите последовательность восстановления ионов металлов при электролизе водного раствора их солей на графитовых электродах при стандартных условиях.

- |   |   |
|---|---|
| <b>01</b> $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Ag}^+$ , $\text{Bi}^{3+}$ , $\text{Pb}^{2+}$ ;    | <b>13</b> $\text{Hg}^{2+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Ag}^+$ ;    |
| <b>02</b> $\text{Au}^{3+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Sb}^{3+}$ , $\text{Pd}^{2+}$ ; | <b>14</b> $\text{Sn}^{2+}$ , $\text{Au}^{3+}$ , $\text{Bi}^{3+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ ; |
| <b>03</b> $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Sn}^{2+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ ; | <b>15</b> $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Pt}^{2+}$ ; |
| <b>04</b> $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Pt}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ ; | <b>16</b> $\text{Pd}^{2+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Au}^{3+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ ; |
| <b>05</b> $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Pt}^{2+}$ , $\text{Bi}^{3+}$ ; | <b>17</b> $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Bi}^{3+}$ , $\text{Ag}^+$ ;    |
| <b>06</b> $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Au}^{3+}$ , $\text{Ag}^+$ , $\text{Cd}^{2+}$ ;    | <b>18</b> $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Pd}^{2+}$ , $\text{Sb}^{3+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ ; |
| <b>07</b> $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Ag}^+$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ ;    | <b>19</b> $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Ag}^+$ , $\text{Cu}^{2+}$ ;    |



- |   |   |
|---|---|
| <b>08</b> $\text{Ni}^{2+}, \text{Pt}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Pb}^{2+};$ | <b>20</b> $\text{Sb}^{3+}, \text{Pb}^{2+}, \text{Sn}^{2+}, \text{Pt}^{2+};$ |
| <b>09</b> $\text{Sn}^{2+}, \text{Bi}^{3+}, \text{Au}^{3+}, \text{Pd}^{2+};$ | <b>21</b> $\text{Sn}^{2+}, \text{Cd}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Ag}^{+};$  |
| <b>10</b> $\text{Pb}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{Cd}^{2+}, \text{Cr}^{3+};$ | <b>22</b> $\text{Fe}^{2+}, \text{Pb}^{2+}, \text{Pt}^{2+}, \text{Ni}^{2+};$ |
| <b>11</b> $\text{Zn}^{2+}, \text{Ag}^{+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Au}^{3+};$  | <b>23</b> $\text{Zn}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{Au}^{3+}, \text{Mn}^{2+};$ |
| <b>12</b> $\text{Cd}^{2+}, \text{Pb}^{2+}, \text{Bi}^{3+}, \text{Ag}^{+};$  | <b>24</b> $\text{Mn}^{2+}, \text{Bi}^{3+}, \text{Sn}^{2+}, \text{Sb}^{3+}.$ |

**16.7.** Определите массу металла и объем газообразных продуктов (н.у.), выделяющихся при электролизе водных растворов веществ, указанных в задании 16.4, если через раствор в течение 1 часа проходит электрический ток силой 10000А.

**16.8.** Напишите уравнения электрохимической коррозии при контакте приведенных металлов во влажном воздухе и в кислой водной среде. Катодом или анодом является подчеркнутый металл? Ответ мотивируйте, используя стандартные электродные потенциалы соответствующих систем (приложение 2).

- |   |   |
|---|---|
| <b>01</b> $\text{Fe}/\underline{\text{Cu}}$ | <b>13</b> $\underline{\text{Cr}}/\text{Sn}$ |
| <b>02</b> $\underline{\text{Cu}}/\text{Ag}$ | <b>14</b> $\underline{\text{Ni}}/\text{Cu}$ |
| <b>03</b> $\text{Pb}/\underline{\text{Zn}}$ | <b>15</b> $\text{Co}/\underline{\text{Zn}}$ |
| <b>04</b> $\underline{\text{Cr}}/\text{Cu}$ | <b>16</b> $\underline{\text{Cd}}/\text{Hg}$ |
| <b>05</b> $\text{Fe}/\underline{\text{Mn}}$ | <b>17</b> $\underline{\text{Mg}}/\text{Cr}$ |
| <b>06</b> $\text{Fe}/\underline{\text{Zn}}$ | <b>18</b> $\underline{\text{Zn}}/\text{Cu}$ |



|           |               |           |               |
|-----------|---------------|-----------|---------------|
| <b>07</b> | <u>Mn</u> /Pt | <b>19</b> | Fe/ <u>Mo</u> |
| <b>08</b> | Fe/ <u>Cr</u> | <b>20</b> | <u>Zn</u> /Bi |
| <b>09</b> | <u>Be</u> /Cu | <b>21</b> | Cu/ <u>Pb</u> |
| <b>10</b> | <u>Sn</u> /Hg | <b>22</b> | W/ <u>Fe</u>  |
| <b>11</b> | <u>Be</u> /Sn | <b>23</b> | Pt/ <u>Zn</u> |
| <b>12</b> | <u>Ni</u> /Pt | <b>24</b> | <u>Mg</u> /Fe |



## 17. ВОДОПОДГОТОВКА

### *А. Теоретическая часть*

Водоподготовка заключается в освобождении воды от грубодисперсных и коллоидных примесей и содержащихся в ней солей, тем самым предотвращаются: отложение накипи, унос солей паром, коррозия металлов, а также загрязнение обрабатываемых материалов при использовании воды в технологических процессах.

Водоподготовка включает следующие основные способы обработки:

- механическая очистка от нерастворённых загрязнений (сора, песка, ржавчины, окалины, крупно- и мелкодисперсных взвесей);
- осветление (удаление из воды коагуляцией, отстаиванием и фильтрованием коллоидальных и суспензированных загрязнений);
- умягчение (устранение жёсткости воды осаждением солей кальция и магния, известью и содой или удаление их из воды катионированием);
- обессоливание и обескремнивание (ионный обмен или дистилляцией в испарителях);
- удаление растворённых газов (термическим или химическим способом) и оксидов железа, марганца и меди (фильтрованием);
- биологическая очистка воды от бактерий, вирусов и других микроорганизмов. В настоящее время в основном используется хлор, озон и УФ-стерилизация. Проводятся опыты с ультразвуком;
- улучшение органолептических свойств воды (удаление из воды веществ, придающих воде запах (сероводород, хлор), и ряда органических веществ).

**Жёсткость воды** – совокупность химических и физических свойств воды, связанных с содержанием в ней раство-



рѐнных солей щѐлочноземельных металлов, главным образом, кальция и магния (так называемых **солей жѐсткости**) [3].

Вода с большим содержанием солей называется жѐсткой, с малым содержанием – мягкой. Термин «жѐсткая» по отношению к воде исторически сложился из-за свойств тканей после их стирки с использованием мыла на основе жирных кислот – ткань, постиранная в жѐсткой воде, более жѐсткая на ощупь. Этот феномен объясняется, с одной стороны, сорбцией тканью кальциевых и магниевых солей жирных кислот, образующихся в процессе стирки на макроуровне. С другой стороны, волокна ткани обладают ионообменными свойствами, и, как следствие, свойством сорбировать многовалентные катионы – на молекулярном уровне. Различают временную (карбонатную) жѐсткость, обусловленную гидрокарбонатами кальция и магния  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ;  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ , и постоянную (некарбонатную) жѐсткость, вызванную присутствием других солей, не выделяющихся при кипячении воды: в основном сульфатов и хлоридов Ca и Mg ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ).

Жѐсткая вода при умывании сушит кожу, в ней плохо образуется пена при использовании мыла. Использование жѐсткой воды вызывает появление осадка (накипи) на стенках котлов, в трубах и т. п. В то же время, использование слишком мягкой воды может приводить к коррозии труб, так как, в этом случае отсутствует кислотно-щелочная буферность, которую обеспечивает гидрокарбонатная (временная) жѐсткость.

Жѐсткость природных вод может варьироваться в довольно широких пределах и в течение года непостоянна. Увеличивается жѐсткость из-за испарения воды, уменьшается в сезон дождей, а также в период таяния снега и льда.

Для численного выражения жѐсткости воды указывают концентрацию в ней катионов кальция и магния.

С 1 января 2014 года в России введен межгосударственный стандарт ГОСТ 31865-2012 «Вода. Единица жѐсткости».



По новому ГОСТу жёсткость выражается в градусах жесткости (°Ж). 1 °Ж соответствует концентрации щелочноземельного элемента, численно равной 1/2 его миллимоля в 1 дм<sup>3</sup> воды.

Если жесткость воды не превышает 2 °Ж, то вода считается мягкой, от 2 до 10 °Ж – средней жесткости, больше 10 °Ж – жесткой.

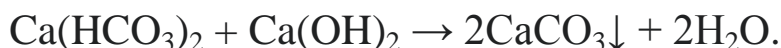
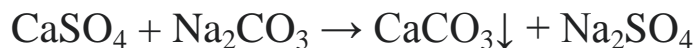
### ***Способы устранения жесткости***

**Термоумягчение.** Основан на кипячении воды, в результате термически нестойкие гидрокарбонаты кальция и магния разлагаются с образованием накипи:

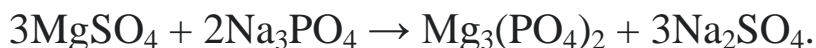
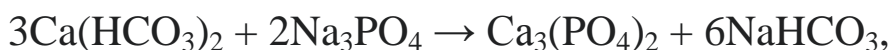


Кипячение устраняет только временную (карбонатную) жёсткость.

**Реагентное умягчение.** Метод основан на добавлении в воду кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  или гашёной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . При этом соли кальция и магния переходят в нерастворимые соединения и, как следствие, выпадают в осадок:



Лучшим реагентом для устранения общей жесткости воды является ортофосфат натрия  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , входящий в состав большинства препаратов бытового и промышленного назначения:



**Катионирование.** Метод основан на использовании ионообменной гранулированной загрузки (чаще всего ионообменные смолы). Такая загрузка при контакте с водой поглощает катионы солей жёсткости (кальций и магний, железо и марганец). Взамен, в зависимости от ионной формы, отдаёт ионы натрия или водорода. Эти методы соответственно



называются Na-катионирование и H-катионирование. При правильно подобранной ионообменной загрузке жёсткость воды снижается при одноступенчатом натрий-катионировании до 0,05–0,1 °Ж, при двухступенчатом – до 0,01 °Ж.

**Обратный осмос.** Метод основан на прохождении воды через полупроницаемые мембраны (как правило, полиамидные). Вместе с солями жёсткости удаляется и большинство других солей. Эффективность очистки может достигать 99,9 %.

Различают нанофильтрацию (условный диаметр отверстий мембраны равен единицам нанометров) и пикофильтрацию (условный диаметр отверстий мембраны равен единицам пикометров). В качестве недостатков данного метода следует отметить:

- необходимость предварительной подготовки воды, подаваемой на обратноосмотическую мембрану;
- относительно высокая стоимость 1 л получаемой воды (дорогое оборудование, дорогие мембраны);
- низкую минерализацию получаемой воды (особенно при пикофильтрации). Вода становится практически дистиллированной.

**Электродиализ.** Основан на удалении из воды солей под действием электрического поля. Удаление ионов растворенных веществ происходит за счёт специальных мембран. Так же как и при использовании технологии обратного осмоса, происходит удаление и других солей, помимо ионов жёсткости.

Полностью очистить воду от солей жёсткости можно **дистилляцией**.

### ***Б. Индивидуальные задания***

**17.1.** Рассчитайте временную, постоянную и общую жесткость воды, содержащей в объеме  $V$  указанные примеси.





Определите пригодность этой воды для технологических процессов пищевой промышленности и предложите методы ее умягчения. Ответ подтвердите уравнениями реакций.

|           | $V(H_2O)$         | Примеси:           |                      |
|-----------|-------------------|--------------------|----------------------|
| <b>01</b> | $5\text{ м}^3$    | 2 кг $CaCl_2$ ;    | 50 г $Mg(HCO_3)_2$   |
| <b>02</b> | $2,5\text{ м}^3$  | 0,9 кг $CaSO_4$ ;  | 200 г $Ca(HCO_3)_2$  |
| <b>03</b> | $3\text{ м}^3$    | 1,1 кг $MgCl_2$ ;  | 0,2 кг $Mg(HCO_3)_2$ |
| <b>04</b> | $100\text{ дм}^3$ | 20 г $MgCl_2$ ;    | 10 г $Ca(HCO_3)_2$   |
| <b>05</b> | $0,4\text{ м}^3$  | 0,1 кг $CaSO_4$ ;  | 0,1 кг $MgCl_2$      |
| <b>06</b> | $30\text{ м}^3$   | 3,0 кг $CaSO_4$ ;  | 1,2 кг $Mg(HCO_3)_2$ |
| <b>07</b> | $10\text{ м}^3$   | 0,7 кг $MgSO_4$ ;  | 1,5 кг $Ca(HCO_3)_2$ |
| <b>08</b> | $50\text{ м}^3$   | 6 кг $CaSO_4$ ;    | 10 кг $MgSO_4$       |
| <b>09</b> | $100\text{ дм}^3$ | 20 г $MgCl_2$ ;    | 42 г $Mg(HCO_3)_2$   |
| <b>10</b> | $10\text{ м}^3$   | 1,7 кг $CaSO_4$ ;  | 1,6 кг $Ca(HCO_3)_2$ |
| <b>11</b> | $100\text{ м}^3$  | 13,6 кг $CaSO_4$ ; | 24 кг $MgSO_4$       |
| <b>12</b> | $0,5\text{ м}^3$  | 0,13 кг $MgCl_2$ ; | 0,2 кг $Mg(HCO_3)_2$ |
| <b>13</b> | $500\text{ дм}^3$ | 170 г $CaSO_4$ ;   | 0,3 кг $Mg(HCO_3)_2$ |
| <b>14</b> | $1\text{ м}^3$    | 0,27 кг $CaSO_4$ ; | 0,5 кг $Mg(HCO_3)_2$ |
| <b>15</b> | $200\text{ дм}^3$ | 90 г $CaCl_2$ ;    | 50 г $Mg(HCO_3)_2$   |



|           |                     |  |  |
|-----------|---------------------|--|--|
| <b>16</b> | 20 м <sup>3</sup>   | 3,4 кг CaSO <sub>4</sub> ;                   | 2,2 кг MgCl <sub>2</sub>                   |
| <b>17</b> | 1,5 м <sup>3</sup>  | 0,6 кг MgCl <sub>2</sub> ;                   | 0,4 кг Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  |
| <b>18</b> | 1 м <sup>3</sup>    | 0,25 кг MgSO <sub>4</sub> ;                  | 0,3 кг Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  |
| <b>19</b> | 100 дм <sup>3</sup> | 12 г Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ;    | 30 г MgSO <sub>4</sub>                     |
| <b>20</b> | 5 м <sup>3</sup>    | 1,3 кг CaSO <sub>4</sub> ;                   | 2,4 кг Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  |
| <b>21</b> | 100 м <sup>3</sup>  | 30,1 кг CaSO <sub>4</sub> ;                  | 15,2 кг Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> |
| <b>22</b> | 1,2 м <sup>3</sup>  | 0,16 кг Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ; | 300 г MgCl <sub>2</sub>                    |
| <b>23</b> | 100 дм <sup>3</sup> | 65 г CaCl <sub>2</sub> ;                     | 12 г Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>    |
| <b>24</b> | 20 м <sup>3</sup>   | 3,5 кг CaSO <sub>4</sub> ;                   | 3,3 кг Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  |



## 18. ОСНОВЫ ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ

### *А. Теоретическая часть*

#### **Углеводороды**

Углеводороды – самые простые органические соединения, состоящие из атомов углерода и водорода. В зависимости от характера связей углеводороды делятся на: насыщенные (предельные) и ненасыщенные (непредельные) [10].

#### Алканы (предельные углеводороды)

Алканы – это органические соединения, атомы углерода и водорода в которых соединены между собой  $\sigma$ -связями.

Общая формула алканов:  $C_nH_{2n+2}$ . Родоначальник гомологического ряда метан ( $CH_4$ ). Основными природными источниками предельных углеводородов являются природный газ, нефть и уголь.

Наиболее характерными реакциями для алканов являются реакции замещения атомов водорода. Причем протекают такие реакции в жестких условиях (высокие температуры, облучение УФ и т. д.). Это связано с тем, что химические связи в алканах достаточно прочные.

К наиболее важным реакциям замещения относятся:

- галогенирование;
- нитрование.

Реакции замещения водорода легче протекают у третичного атома углерода и только потом у вторичного и первичного.

#### Алкены (этиленовые углеводороды)

Алкены – непредельные углеводороды, в которых два соседних атома углерода связаны двойной связью. Общая формула алкенов  $C_nH_{2n}$ . Родоначальником ряда является этилен  $CH_2=CH_2$  ( $C_2H_4$ ).

В промышленности алкены получают в основном из углеводородов нефти. В лаборатории алкены получают дегид-



ратацией спиртов, дегидрогалогенированием галогенопроизводных и дегалогенированием дигалогенопроизводных.

Реакции отщепления воды и галогеноводорода протекают по **правилу Зайцева**: при отщеплении воды или галеноводорода от несимметричных спиртов или галегенопроизводных водород отщепляется от соседнего с ОН-группой или галогеном наименее гидрированного атома углерода.

Для алкенов наиболее характерными являются реакции, протекающие с разрывом двойной связи, то есть реакции присоединения, окисления и полимеризации.

Присоединение галогеноводородов и воды к несимметричным алкенам протекает по **правилу Марковникова**: при присоединении галогеноводорода или воды положительная частица (протон) присоединяется к наиболее гидрированному атому углерода при двойной связи.

В присутствии перекиси водорода присоединение галогеноводородов к алкенам протекает против правила Марковникова (перекисный эффект Караша), то есть водород присоединяется к менее гидрированному атому углерода.

### Алкадиены

Алкадиены (диены) – непредельные углеводороды, в молекуле которых содержатся две двойные связи. Общая формула диеновых углеводородов  $C_nH_{2n-2}$ .

Для диенов также как и для алкенов характерны реакции, протекающие с разрывом  $\pi$ -связей, то есть реакции присоединения. Однако для сопряженных диенов реакции присоединения могут протекать в двух направлениях – 1,2 и 1,4.

Присоединение по типу 1,2 протекает к 1 и 2 атомам углерода, связанным двойной связью, при этом вторая двойная связь в реакции не участвует. В случае присоединения по типу 1,4 происходит разрыв обеих двойных связей и происходит смещение двойной связи в середину молекулы.



### Алкины (ацетиленовые углеводороды)

Алкинами называют углеводороды, в молекуле которых два атома углерода связаны тройной связью. Родоначальником ряда алкинов является ацетилен  $C_2H_2$ . Общая формула  $C_nH_{2n-2}$ .

Для алкинов характерны реакции присоединения с разрывом  $\pi$ -связей, которые в отличие от алкенов, протекают ступенчато. Кроме этого, алкины достаточно легко подвергаются окислению. Если в молекуле алкина присутствуют атомы водорода при тройной связи, то для них становятся характерными реакции замещения (металлирования).

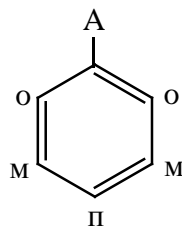
Реакция гидратации (присоединение воды, реакция М. Г. Кучерова) для алкинов протекает в присутствии катализатора  $HgSO_4$ . Из ацетилена при гидратации образуется уксусный альдегид, из гомологов ацетилена – кетоны.

### Ароматические углеводороды (арены)

Арены – это группа карбоциклических соединений, содержащих циклическую группу из шести атомов углерода (бензольное кольцо). Общая формула аренов  $C_nH_{2n-6}$ .

Родоначальник ряда – бензол ( $C_6H_6$ ).

Изомерия гомологов бензола связана со взаимным положением радикалов в бензольном кольце. По этому признаку различают орто- (о-), мета- (м-) и пара – (п-) изомеры.



Для аренов наиболее характерными являются реакции замещения водорода в бензольном кольце, также они могут вступать в реакции гидрирования и окисления.

#### ***Правила замещения в бензольном кольце***

При появлении в кольце бензола группы-заместителя, то место введения (орто-, мета- или пара-положение) второго заместителя будет определяться природой уже находящегося



в молекуле заместителя. Все заместители можно разделить на две группы:

1) группы – электронодоноры (ориентанты 1 рода) –  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{OR}$ ,  $-\text{R}$ , галогены.

Ориентанты 1 рода будут направлять заместитель в **орто-и пара-положения**.

2) группы- электроноакцепторы (ориентанты 2 рода)  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{CN}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{CCl}_3$ ,  $-\text{CHO}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{COOR}$ .

Ориентанты 2 рода направляют заместители в **мета-положение**.

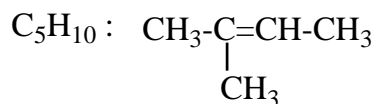
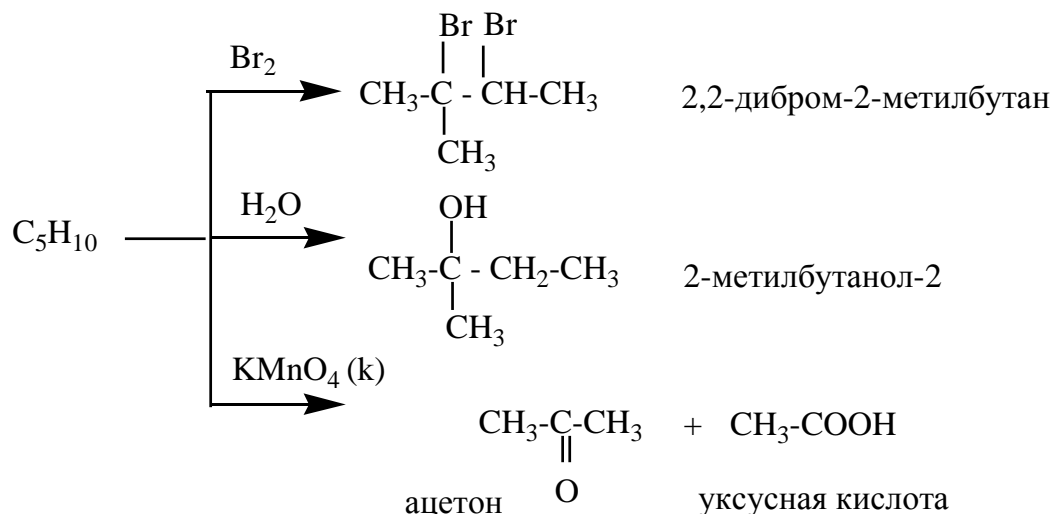
### ***Б. Примеры решения типовых задач***

**Пример 1.** Установите строение углеводорода состава  $\text{C}_5\text{H}_{10}$ , который обесцвечивает бромную воду, при взаимодействии с водой образует третичный спирт, а при его окислении концентрированным раствором перманганата калия образуется смесь уксусной кислоты и ацетона. Напишите уравнения соответствующих реакций, назовите все органические соединения.

#### ***Решение:***

Указанный углеводород соответствует общей формуле алкенов  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ , кроме того, он способен обесцвечивать бромную воду, что также свидетельствует о наличии в его молекуле кратной связи. Установить его точное строение можно по продуктам окисления, так как при окислении алкенов концентрированным раствором перманганата калия происходит разрыв двойной связи. Также тот факт, что при взаимодействии данного углеводорода с водой образуется третичный спирт, позволяет судить о наличии в его молекуле радикалов-заместителей.



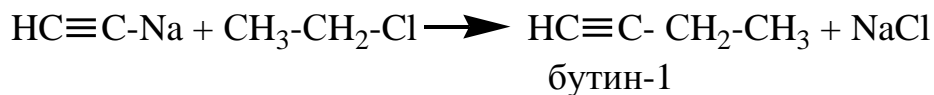
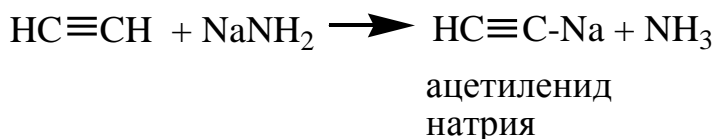
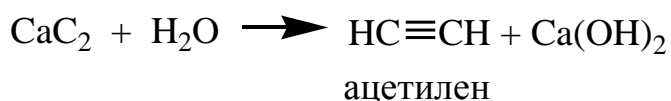


2-метилбутен-2

**Пример 2.** Приведите схему синтеза бутина-1 из карбида кальция. Напишите реакции. Будет ли указанный алкин взаимодействовать с  $\text{NaNH}_2$ ? Обоснуйте свой ответ.

**Решение:**

При взаимодействии карбида кальция с водой образуется ацетилен. На основе ацетилена, путем реакций металлирования и алкилирования, можно получить любой гомолог ацетилена.



Бутин-1 будет взаимодействовать с  $\text{NaNH}_2$ , так как в его молекуле присутствуют атомы водорода при тройной связи и для них становятся характерными реакции замещения (металлирования).

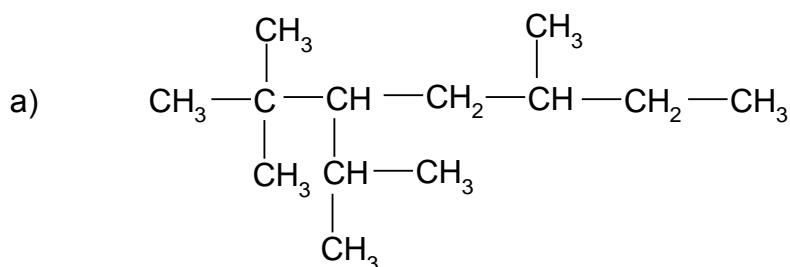
### ***В. Индивидуальные задания***

Для каждой темы раздела 18 необходимо выполнить по три задания своего варианта, номера которых приведены в таблице.

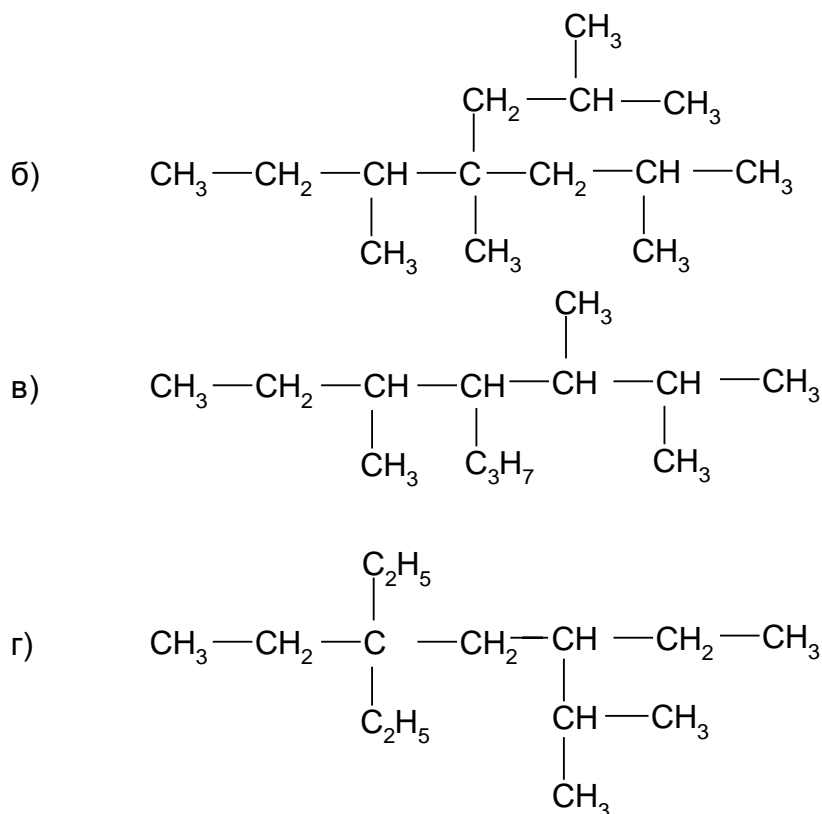
|                  | <i>Номера заданий</i> |     |     |  | <i>Номера заданий</i> |    |     |     |
|------------------|-----------------------|-----|-----|--|-----------------------|----|-----|-----|
| <i><b>1</b></i>  | 1а                    | 9   | 17  |  | <i><b>13</b></i>      | 4Г | 15Г | 20Г |
| <i><b>2</b></i>  | 1б                    | 10  | 18а |  | <i><b>14</b></i>      | 5  | 16  | 21  |
| <i><b>3</b></i>  | 1в                    | 11а | 18б |  | <i><b>15</b></i>      | 6  | 11б | 22  |
| <i><b>4</b></i>  | 1Г                    | 11б | 18в |  | <i><b>16</b></i>      | 7  | 14  | 23  |
| <i><b>5</b></i>  | 2а                    | 11в | 18Г |  | <i><b>17</b></i>      | 8  | 9   | 24  |
| <i><b>6</b></i>  | 2б                    | 11Г | 19а |  | <i><b>18</b></i>      | 1а | 11Г | 25  |
| <i><b>7</b></i>  | 2в                    | 12  | 19б |  | <i><b>19</b></i>      | 1б | 10  | 18б |
| <i><b>8</b></i>  | 2Г                    | 13  | 19в |  | <i><b>20</b></i>      | 1в | 11а | 17  |
| <i><b>9</b></i>  | 3                     | 14  | 19Г |  | <i><b>21</b></i>      | 1Г | 12  | 19а |
| <i><b>10</b></i> | 4а                    | 15а | 20а |  | <i><b>22</b></i>      | 3  | 15б | 20а |
| <i><b>11</b></i> | 4б                    | 15б | 20б |  | <i><b>23</b></i>      | 6  | 11в | 18Г |
| <i><b>12</b></i> | 4в                    | 15в | 20в |  | <i><b>24</b></i>      | 8  | 13  | 18а |

### **18.1. Алканы**

1. Назовите по систематической номенклатуре:







2. Составьте структурные формулы и назовите по систематической номенклатуре следующие соединения:

- а) бутилтретбутилизоамилметан;
- б) метилизопропилбутилметан;
- в) диизопропилнеопентилметан;
- г) этилпропилвторбутилметан.

3. Напишите структурные формулы пяти изомеров гексана и назовите их по систематической и рациональной номенклатурам.

4. Приведите структурные формулы следующих углеводородов и назовите их по рациональной номенклатуре:

- а) 2,2,3,3-тетрамилпентан;
- б) 3,4-диметил-4-этилгептан;
- в) 2,2,4-триметилпентан;
- г) 2,2,4-триметил-4-этилгептан.

5. Назовите по систематической номенклатуре: диметилпропилтретбутилметан.



6. Укажите первичные, вторичные, третичные, четвертичные атомы углерода в алканах:

- а) 2,2,3-триметил-4-этилгексан;
- б) 2,4-диметил-3-этил-3-пропилоктан.

7. Напишите структурные формулы изомерных углеводородов состава  $C_7H_{16}$ , главная цепь которых состоит из четырех атомов углерода. Назовите эти изомеры по рациональной номенклатуре.

8. Напишите структурные изомеры состава  $C_5H_{12}$ , назовите их и получите каждый по реакции Вюрца.

9. Напишите все структурные изомеры состава  $C_6H_{14}$ . Назовите их по рациональной и систематической номенклатуре ИЮПАК. Получите двумя способами изомеры, не содержащие третичных атомов углерода.

10. Напишите уравнения реакций получения бутана:

- а) сплавлением соли соответствующей карбоновой кислоты со щелочью;
- б) электролизом водного раствора натриевой соли соответствующей карбоновой кислоты. Назовите все органические вещества.

11. Получите реакцией Вюрца следующие углеводороды:

- а) 2,6-диметилгептан;
- б) 2,7-диметилнонан;
- в) 3,4-диметилоктан;
- г) 2,4-диметилгексан.

12. Укажите, какие углеводороды могут быть получены, если 2-метилбутан подвергнуть хлорированию, а затем полученное монохлорпроизводное обработать металлическим натрием?

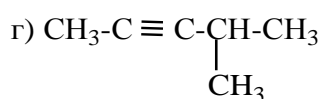
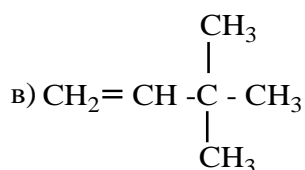
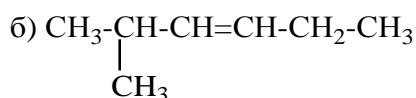
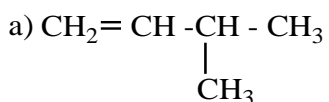
13. Какие углеводороды получатся при действии металлического натрия на смесь изобутилбромида и пропилбромида?



да? Для одного из полученных продуктов напишите реакции дегидрирования и галогенирования.

14. Получите 2,3–диметилпентан гидрированием непредельного углеводорода и сплавлением соответствующей соли карбоновой кислоты со щелочью. Назовите все органические вещества.

15. Получите предельные углеводороды каталитическим гидрированием следующих углеводородов. Назовите продукты реакции по рациональной и систематической номенклатурам:

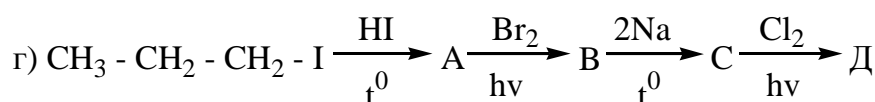
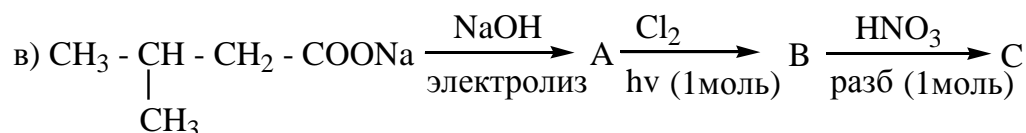
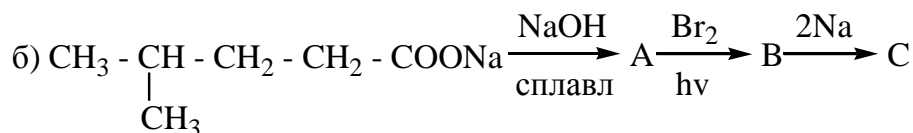
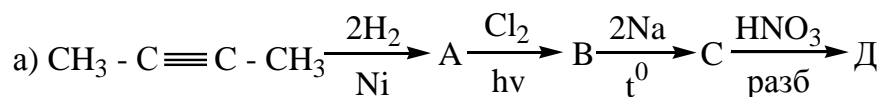


16. Напишите для 2–метилбутана уравнение реакций хлорирования и нитрования (по Коновалову). Назовите все полученные органические вещества.

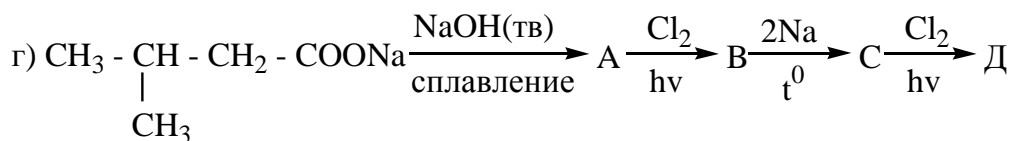
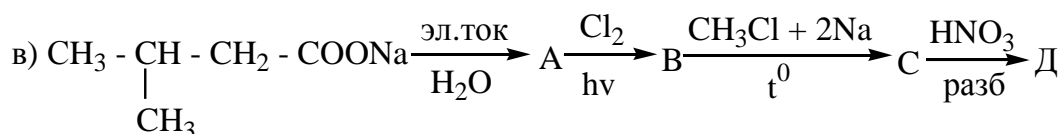
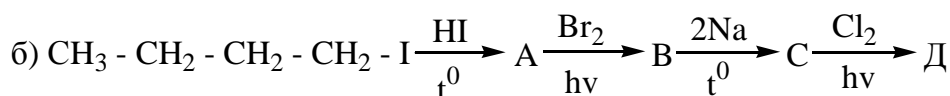
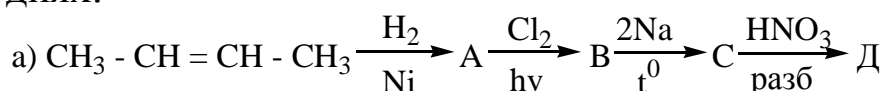
17. Напишите для 3–метилпентана уравнения реакций хлорирования и нитрования (по Коновалову). Назовите все полученные органические вещества.

18. Осуществите следующие превращения и назовите органические вещества, образующиеся в промежуточных стадиях:





19. Осуществите следующие превращения и назовите органические вещества, образующиеся в промежуточных стадиях:



20. Осуществите следующие превращения и назовите органические вещества, образующиеся в промежуточных стадиях:

а) пропан  $\rightarrow$  2,3-диметилбутан;

б)  $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{COONa} \rightarrow$  2-нитробутан;

в) 3-метил-1-бутен  $\rightarrow$  2-бром-2-метилбутан;

г) 3-метил-2-бутен  $\rightarrow$  2-бром-2-метилбутан.



21. Установите строение соли карбоновой кислоты, которая при сплавлении со щелочью образует изобутан, а электролиз ее водного раствора приводит к 2,5–диметилгексану. Напишите уравнения реакций.

22. Напишите структурную формулу органического вещества  $C_8H_{18}$ , если известно, что при его бромировании образует только одно монобромпроизводное. Назовите этот углеводород по рациональной и систематической номенклатурам.

23. При нитровании одного из изомеров пентана получено только первичное нитросоединение. Напишите структурную формулу этого нитросоединения. Предложите синтез исходного углеводорода по реакции Вюрца.

24. Предложите методы синтеза 2,3–диметилбутана из соединений, содержащих в молекуле 3,4,6,7 атомов углерода. Назовите все органические вещества.

25. Углеводород  $C_6H_{14}$  в условиях реакции Коновалова превращается преимущественно в третичное нитросоединение, а при галогенировании – в третичное галогенпроизводное. Определите строение исходного углеводорода.

## 18.2. Алкены, Алкадиены

1. По названию вещества составьте его структурную формулу:

- а) симм–третбутилнеопентилэтилен;
- б) 3–метил–3–пропилгексадиен–1,5;
- в) 2,5,5–триметил–3–изопропилоктен–1;
- г) 2–винил–3–изопропилпентен–1.

2. Напишите формулы диенов состава:

- а)  $C_{17}H_{12}$ ;      б)  $C_8H_{14}$ ;      в)  $C_9H_{16}$ ;      г)  $C_6H_{10}$ ,



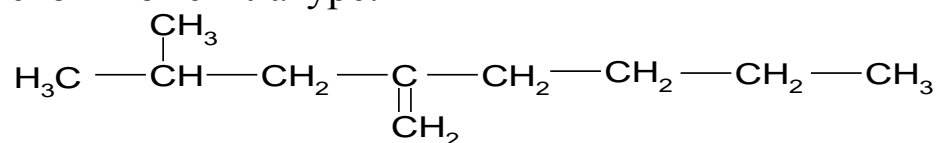
имеющих в главной цепи пять углеродных атомов, и назовите их по систематической номенклатуре.

3. Напишите структурные формулы всех изомерных алкенов состава  $C_5H_{10}$ . Назовите их по рациональной и систематической номенклатурам.

4. Назовите следующие углеводороды по рациональной номенклатуре:

- а) 2,2,6,6-тетраметилгептен-3;
- б) 2,2,5-триметилгексен-3;
- в) 2,8-диметилнонен-4;
- г) 4-метилгексен-2.

5. Назовите соединение по рациональной и систематической номенклатуре:



6. Укажите, ошибки в названиях, составленных неверно с точки зрения правил номенклатуры ИЮПАК:

- а) 2-этилбутен-3;
- б) 2-метилгексен-5;
- в) 2,3-диэтилбутен-2.

7. Напишите структурную формулу 2,2,6,7-тетраметилоктена-4. Назовите его по рациональной номенклатуре.

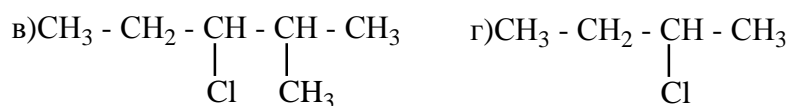
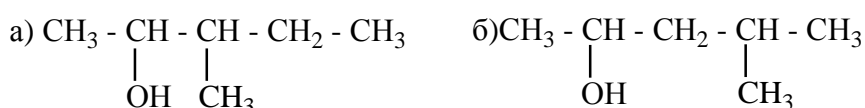
8. Найдите ошибку в названии углеводорода: 2-изопропилпентен-2. Назовите это соединение по рациональной номенклатуре.

9. Получите гексен-1 из соответствующего а) галогенпроизводного, б) спирта, в) дигалогенпроизводного и г) алкина. Назовите все органические вещества.



10. Получите 2,3–диметилбутен–1 тремя различными способами. Для исходного алкена напишите реакции гидратации, гидрогалогенирования и озонирования. Назовите все органические вещества.

11. Получите этиленовые углеводороды реакцией дегидро-галогенирования из следующих галогенуглеводородов:



12. Составьте уравнения реакций, протекающих по следующей схеме. Назовите все органические вещества.



13. Получите 1,3–бутадиен а) дегидратацией двухатомного спирта, б) дегидрогалогенированием дигалогенпроизводного, в) по методу С. В. Лебедева, г) дегидрированием бутана.

14. Получите пентен–2 из следующих соединений:

а) 2–бромпентана, б) пентанола–1; в) 2,3–дибромпентана, г) пентина–2. Укажите реагенты и условия проведения реакций.

15. Какие углеводороды получатся при действии спиртового раствора щелочи на следующие соединения:

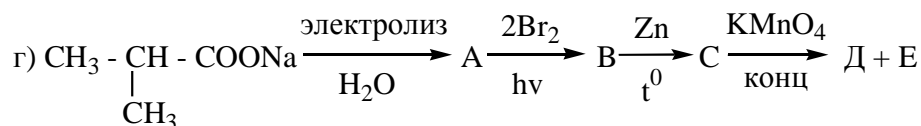
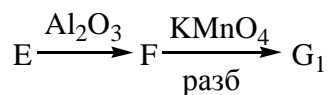
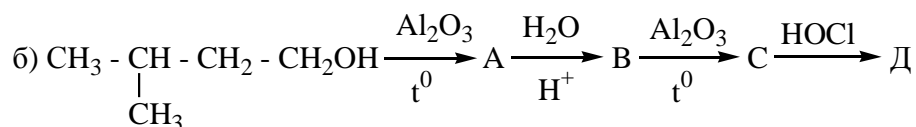
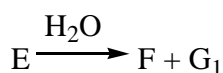
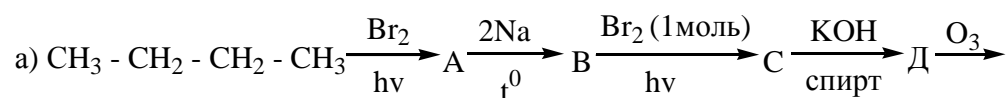
- а) 2,3–дибром–2–метилбутан;
- б) 2,4–дихлорбутан;
- в) 2,4–дибром–3–метилпентан;
- г) 2,4–дибром–3,3–диметилпентан.

Назовите полученные диеновые углеводороды. Укажите диены с изолированными, сопряженными и кумулированными двойными связями.

16. Напишите уравнения реакций окисления 2,4-диметил-гексена-2 а) концентрированным, б) разбавленным растворами перманганата калия, в) кислородом воздуха в присутствии серебряного катализатора, г) озонем. Назовите все полученные продукты реакций.

17. Установите структурные формулы алкенов, гидратацией которых можно получить 3-метилгексанол-3. Напишите уравнения реакций гидратации и галогенирования этих алкенов.

18. Осуществите следующие превращения и назовите органические вещества, образующиеся в промежуточных стадиях:



19. Предложите два способа получения следующих диеновых углеводородов:

- а) 2-метилбутадиен-1,3;    б) 2,3-диметилпентадиен-2,4;  
в) октадиен-3,5;    г) 3-этилпентадиен-1,3.





Назовите все органические вещества.

20. Получите двумя способами указанные алкены. Для полученных алкенов приведите реакцию а) гидрогалогенирования в присутствии перекиси водорода и б) озонирования:

а) 2,3-диметилпентен-2;

б) 3-этилгексен-2;

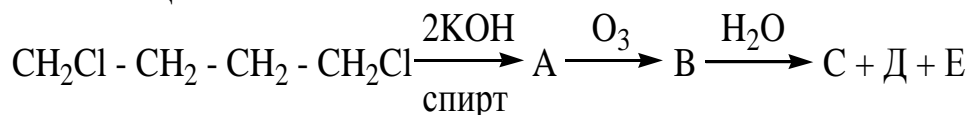
в) 4-метилпентен-2;

г) 2-метилбутен-2.

21. При электролизе водного раствора соли кислоты RCOOH было получено соединение C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>, которое образуется также при каталитическом гидрировании 2,3-диметилбутена-2. Установите строение кислоты и напишите схемы реакций.

22. Установите строение соединения C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>, если при каталитическом гидрировании оно образует 2-метилбутан, а при взаимодействии с бромоводородной кислотой в присутствии перекиси водорода превращается в вещество C<sub>5</sub>H<sub>11</sub>Br, которое при нагревании с металлическим натрием образует 2,7-диметилоктан. Приведите соответствующие уравнения реакций. Назовите все органические вещества.

23. Осуществите превращения и назовите все органические вещества:



24. Установите строение двух углеводов состава C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>, если известно, что они оба обесцвечивают бромную воду, а при окислении концентрированным раствором KMnO<sub>4</sub> один из них образует ацетон и уксусную кислоту, а другой – муравьиную и изомасляную кислоты.



25. Определите строение углеводорода  $C_6H_{12}$ , если известны следующие его свойства: взаимодействует с бромом, образует бесцветный продукт состава  $C_6H_2Br_2$ , при гидрировании дает 2-метилпентан, при озонировании и разложении озонида водой получают уксусный и изомасляный альдегиды.

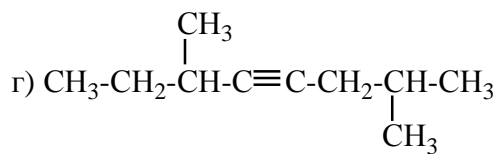
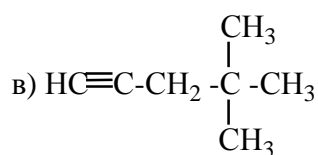
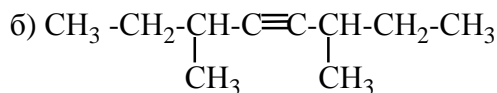
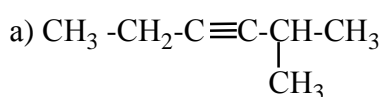
Напишите соответствующие уравнения реакций. Назовите все органические вещества.

### 18.3. Алкины

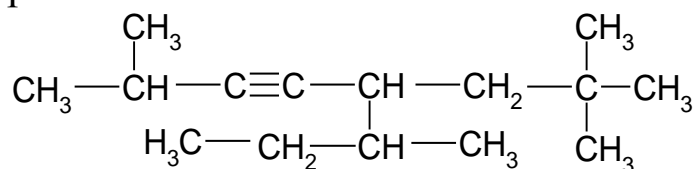
1. По названию вещества составьте его структурную формулу

- а) неопентилтретпентилацетилен;
- б) 2,2,6,6-тетраметилоктин-4;
- в) изобутилтретпентилацетилен;
- г) 3-этил-4-изопропилгептин-1.

2. Назовите по систематической и рациональной номенклатурам:



3. Назовите соединение по систематической номенклатуре



4. Напишите структурные формулы и назовите по рациональной номенклатуре:

- а) 4-метилпентин-1;
- б) 2,2,5-триметилгексин-3;
- в) 2,6-диметилгептин-3;
- г) 2,2,6,6-тетраметилгептин-3.

5. Напишите структурные формулы изомерных ацетиленовых углеводородов  $C_6H_{10}$ , главная цепь которых состоит из четырех углеводородных атомов. Назовите их.

6. Приведите структурную формулу изомера октина, имеющего в своем составе третичный и четвертичный атом углерода. Назовите этот изомер по номенклатуре ИЮПАК.

7. Напишите структурную формулу соединения:  
2-метил-4-изопропилгептадиен-1,3-ин-5.

8. Какие алкины можно получить из бутена-1? Приведите соответствующие уравнения реакций. Как эти алкины можно получить из ацетилена?

9. Получите диметилацетилен из следующих соединений:  
а) бутана; б) ацетилена; в) соответствующих диалогенпроизводных.

10. Получите алкин из 1,2-дихлорпропана. Из каких еще дихлорпроизводных можно получить этот же алкин?

11. Какие алкины можно получить из следующих соединений:

- а) 1,2-дихлор-3-метилбутана; б) 1,1,2,2-тетрабромэтана;
  - в) 2,2-дибром-3-метилпентана; г) 1,1-дихлорпропана?
- Приведите соответствующие уравнения реакций.

12. Получите ацетилен пятью способами.



13. Получите изопропилацетилен из следующих соединений: а) алкана; б) ацетилена; в) дигалогенпроизводных.

14. Осуществите следующее превращение:

этанол  $\rightarrow$  метилацетилен.

15. Исходя из 1-хлорбутана получите следующие соединения: а) бутин-1; б) бутин-2; в) пентин-2; г) гептин-3.

16. Из каких алкинов по реакции Кучерова можно получить гексанон-3? Какие продукты получатся при окислении этих алкинов? Приведите соответствующие уравнения реакций.

17. Напишите реакции пропина со следующими реагентами: а)  $\text{H}_2\text{O}$ ; б)  $\text{CH}_3\text{OH}$ ; в)  $\text{CH}_3\text{MgI}$ .

18. Напишите реакции бутин-1 со следующими реагентами: а)  $\text{Br}_2$ ; б)  $\text{H}_2\text{O}$  (реакция Кучерова);  
в)  $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{OH}$ ; г)  $\text{HCN}$ .

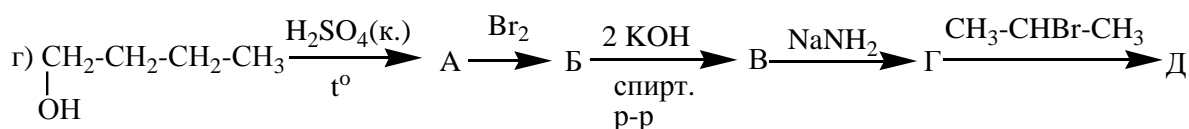
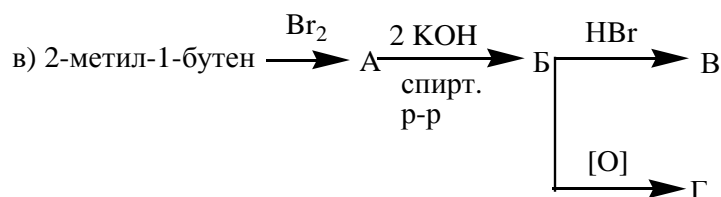
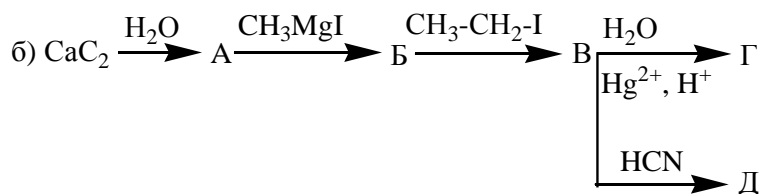
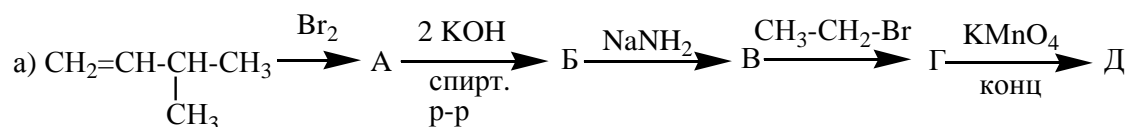
19. С какими из указанных реагентов будут вступать в реакцию метилацетилен и диметилацетилен:

а) ацетон; б) реактив Гриньяра;  
в) синильная кислота; г) бромная вода?

Приведите соответствующие уравнения реакций.

20. Осуществите превращения. Назовите все органические соединения.





21. Назовите все возможные изомеры алкинов с общей формулой  $\text{C}_5\text{H}_8$  по систематической номенклатуре ИЮПАК. Приведите реакции, с помощью которых их можно различить.

22. Установите строение алкина, если при его окислении были получены изомасляная кислота и муравьиная кислота. Какой продукт получится из этого алкина по реакции Кучерова? Приведите соответствующие уравнения реакций.

23. Предложите схему синтеза пропилацетилен, исходя из этана. Приведите соответствующие уравнения реакций и назовите все соединения.

24. Установите строение углеводорода  $\text{C}_6\text{H}_{10}$ , если при его полном гидрировании образуется 2-метилпентан, гидратация данного углеводорода приводит к образованию кетона, а также, он реагирует с аммиачным раствором оксида серебра и реактивом Гриньяра. Приведите соответствующие уравнения реакций.

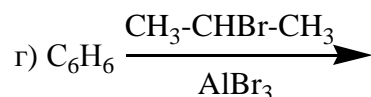
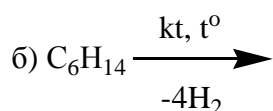
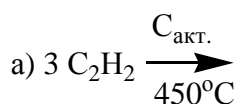


25. Предложите схему синтеза пентина-2 исходя из карбида кальция. Будет ли данный алкин вступать в реакции со следующими реагентами: а)  $\text{NaNH}_2$ ; б)  $\text{H}_2\text{O}$ ?

### 18.4. Арены

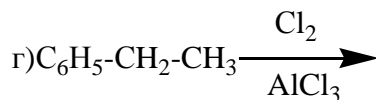
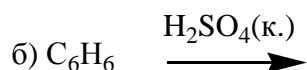
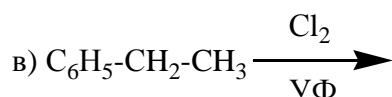
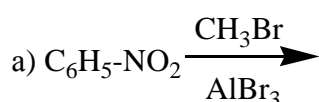
1. Получите этилбензол из соответствующих соединений: а) алкана; б) циклоалкана; в) алкина; г) бензола.

2. Закончите следующие реакции и назовите все соединения:



3. Приведите по две реакции получения бензола и любого его гомолога. Назовите все соединения.

4. Закончите следующие реакции и назовите все соединения:



5. Какой гомолог бензола можно получить из гептана? Приведите еще два способа его получения. Назовите все соединения.

6. Напишите реакций хлорирования толуола, в следующих условиях:

а) при облучении ультрафиолетом;



б) в присутствии катализатора Фриделя–Крафтса.

7. Получите бензол из бензоата натрия и напишите для него реакцию хлорирования и нитрования.

8. Исходя из бензола, получите изопропилбензол двумя способами.

9. Получите этилбензол тремя способами и напишите для него реакции нитрования, ацилирования и окисления.

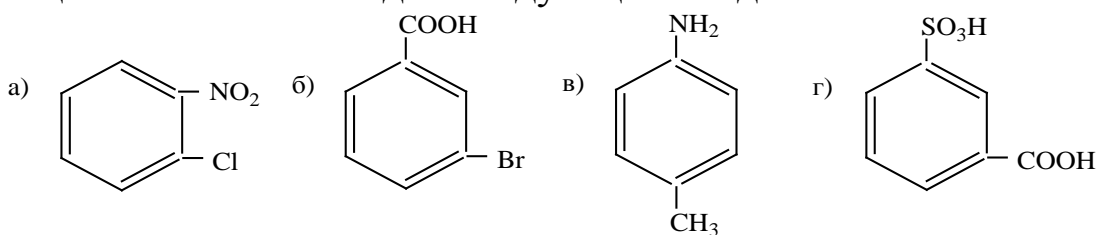
10. Напишите реакции:

а) нитрования толуола;

б) ацилирования нитробензола;

в) бромирования в пара-положение этилбензола в присутствии катализатора Фриделя–Крафтса.

11. Укажите согласованную и несогласованную ориентацию заместителей для следующих соединений:



12. Укажите тип ориентации (согласованная или несогласованная) в реакциях бромирования для следующих соединений:

а) п-нитрофенол, б) м-нитрохлорбензол, в) п-нитробензойная кислота. Приведите соответствующие реакции.

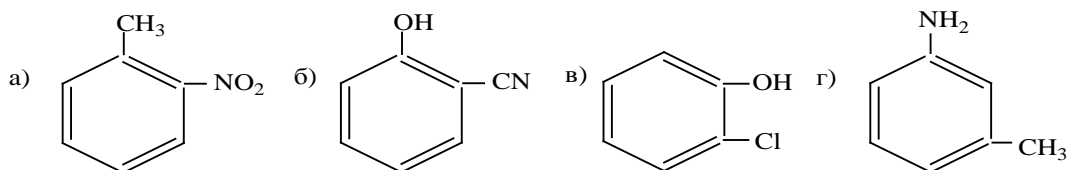
13. Исходя из бензола, получите

а) о-толуолсульфокислоту, б) п-толуолсульфокислоту,

в) м-толуолсульфокислоту.

14. Укажите тип ориентации (согласованная или несогласованная) в реакциях нитрования для следующих соединений: а) м-нитротолуол, б) п-нитробензойная кислота, в) п-метилбензойная кислота. Приведите соответствующие реакции.

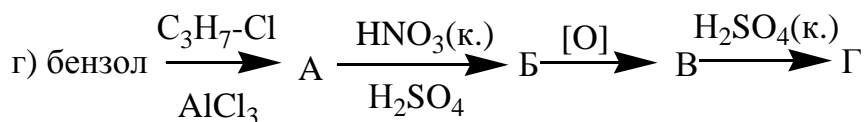
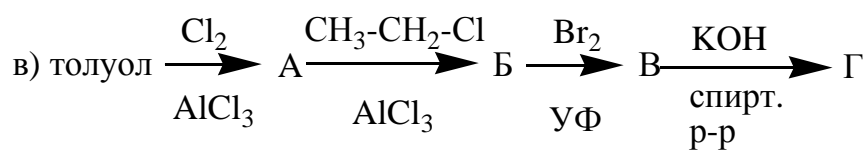
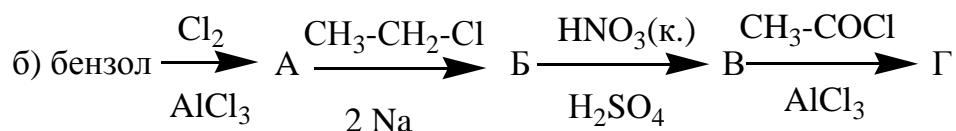
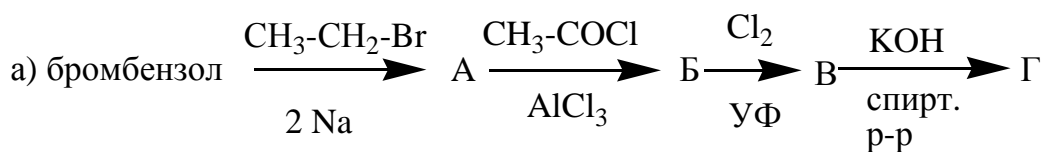
15. Укажите согласованную и несогласованную ориентацию заместителей для следующих соединений:



16. Получите, исходя из гексана, 4-метил-2-изопропиламинобензол.

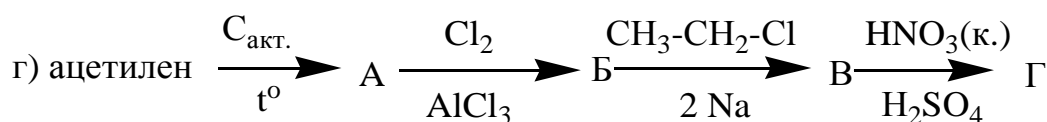
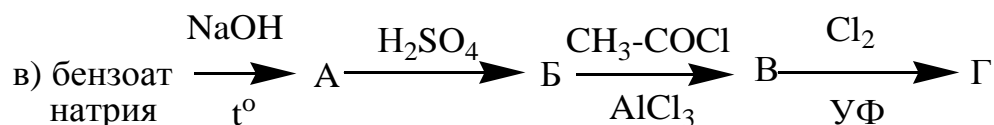
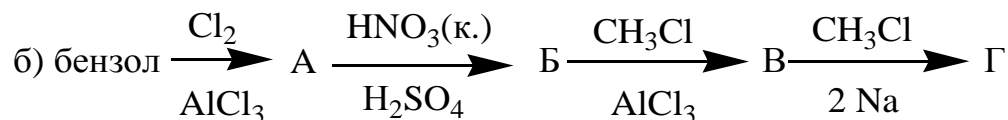
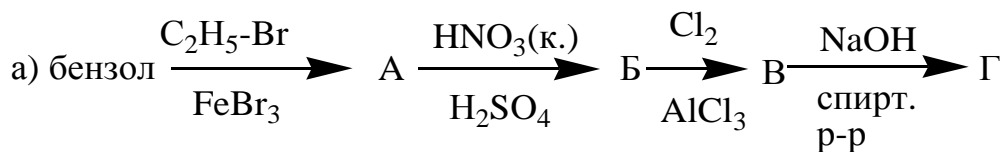
17. Получите, исходя из ацетилена, 2-бром-4-нитробензойную кислоту.

18. Осуществите превращения. Назовите все органические соединения.



19. Осуществите превращения. Назовите все органические соединения.

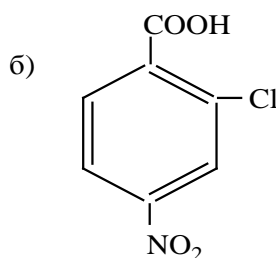
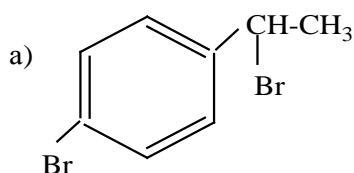




20. В каком порядке следует вводить заместители при получении из бензола следующих соединений:

- а) м-нитрохлорбензола и п-нитрохлорбензола;
- б) 2,4 –динитротолуола и п-нитробромбензола;
- в) о-нитроэтилбензола и м-бромбензолсульфокислоты;
- г) п-хлорбензолсульфокислоты и о-этилбензолсульфокислоты.

21. Напишите реакции, с помощью которых можно получить следующие соединения:

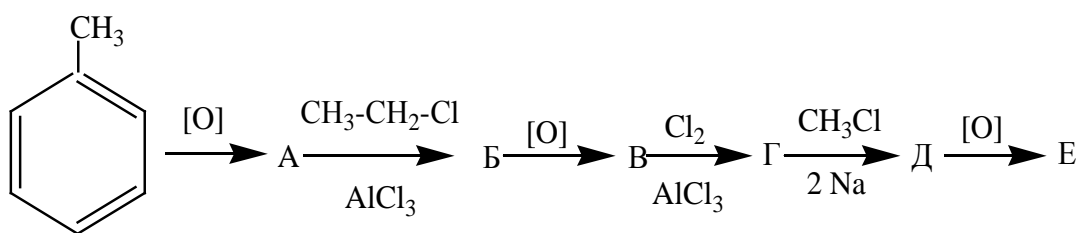


22. Осуществите следующие превращения:  
 бромбензол → пара-бромтолуол → пара-ксилол →  
 → терефталевая кислота → бензол.

23. Установите строение углеводорода состава  $C_8H_6$ , который обесцвечивает бромную воду, при окислении образует бензойную кислоту, с аммиачным раствором оксида серебра образует осадок. Напишите соответствующие уравнения реакций.

24. Исходя из циклогексана, путем последовательных превращений получите п-нитрохлорбензол.

25. Осуществите превращения и приведите названия всех органических соединений по систематической номенклатуре:



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов, Н. С. Общая и неорганическая химия: учебник для вузов / Н. С. Ахметов. – 4-е издание, исправленное. – Москва: Академия, 2001. – 743 с. *Гриф Министерства образования РФ – для студентов химико-технологических специальностей вузов.*

2. Гельфман, М. И. Химия: учебник / М. И. Гельфман, В. П. Юстратов. – 4-е изд. – Санкт-Петербург: Лань, 2008. – 480 с. *Гриф Министерства образования РФ – для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим специальностям и направлениям.*

3. Гельфман, М. И. Неорганическая химия: учебное пособие / М. И. Гельфман, В.П. Юстратов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2009. – 528 с. *Гриф СибРУМЦ ВПО для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по технологическим специальностям и направлениям.*

4. Юстратов, В. П. Основы химии: учебное пособие для студентов / В. П. Юстратов, Л. Н. Мартыновская. – Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2011. – 203 с.

5. Гольбрайх, З. Е. Сборник задач и упражнений по химии: учебное пособие для студентов / З. Е. Гольбрайх, Е. И. Маслов. – 6-е издание. – Москва: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2004. – 383 с. – (Высшая школа).

6. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой / сост. Н. М. Барон [и др.]. – Санкт-Петербург: Иван Федоров, 2003. – 238 с.

7. Юстратов, В. П. Фазовые равновесия. Коллоидно-дисперсные системы. Растворы высокомолекулярных веществ: учебное пособие / В. П. Юстратов. – Кемерово, 2017. – 79 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/102671> (дата обращения: 18.09.2018).



8. Гельфман, М. И. Коллоидная химия: учебник / М. И. Гельфман, О. В. Ковалевич, В. П. Юстратов. – Санкт-Петербург: Лань, 2017. – 336 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/91307> (дата обращения: 18.09.2018).

9. Холохонова, Л. И. Учение о фазовых равновесиях: учебное пособие / Л. И. Холохонова, Н. Е. Молдагулова; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2009. – 128 с.

10. Нечаев, А. П. Органическая химия: учебник / А. П. Нечаев, В. М. Болотов. – Москва: ДеЛи плюс, 2014. 765 с.



*Приложение 1*

**Общие константы нестойкости  
некоторых комплексных ионов в водных растворах  
при 298 К**

| №  | Комплексный ион                 | $K_{\text{нест}}$    | №  | Комплексный ион                   | $K_{\text{нест}}$    |
|----|---------------------------------|----------------------|----|-----------------------------------|----------------------|
| 01 | $[\text{AgBr}_2]^-$             | $7,8 \cdot 10^{-8}$  | 30 | $[\text{CdCl}_6]^{4-}$            | $2,6 \cdot 10^{-3}$  |
| 02 | $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$    | $8,0 \cdot 10^{-22}$ | 31 | $[\text{Cd I}_4]^{2-}$            | $8,0 \cdot 10^{-7}$  |
| 03 | $[\text{AgCl}_2]^-$             | $1,8 \cdot 10^{-5}$  | 32 | $[\text{Cd I}_6]^{4-}$            | $1,0 \cdot 10^{-6}$  |
| 04 | $[\text{Ag I}_2]^-$             | $1,8 \cdot 10^{-12}$ | 33 | $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ | $7,6 \cdot 10^{-8}$  |
| 05 | $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$  | $9,3 \cdot 10^{-8}$  | 34 | $[\text{Cd}(\text{OH})_4]^{2-}$   | $3,8 \cdot 10^{-9}$  |
| 06 | $[\text{Ag}(\text{OH})_2]^-$    | $1,0 \cdot 10^{-4}$  | 35 | $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{4-}$   | $1,0 \cdot 10^{-19}$ |
| 07 | $[\text{AlF}_6]^{3-}$           | $1,4 \cdot 10^{-20}$ | 36 | $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$   | $1,0 \cdot 10^{-64}$ |
| 08 | $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$    | $1,0 \cdot 10^{-33}$ | 37 | $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ | $8,5 \cdot 10^{-6}$  |
| 09 | $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$    | $5,0 \cdot 10^{-39}$ | 38 | $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ | $3,1 \cdot 10^{-33}$ |
| 10 | $[\text{AuCl}_4]^-$             | $5,0 \cdot 10^{-22}$ | 39 | $[\text{Cr}(\text{OH})_4]^-$      | $1,0 \cdot 10^{-30}$ |
| 11 | $[\text{BiBr}_6]^{3-}$          | $3,0 \cdot 10^{-10}$ | 40 | $[\text{Cr}(\text{OH})_6]^{3-}$   | $3,9 \cdot 10^{-15}$ |
| 12 | $[\text{BiCl}_6]^{3-}$          | $3,8 \cdot 10^{-7}$  | 41 | $[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$   | $5,0 \cdot 10^{-31}$ |
| 13 | $[\text{Bi I}_6]^{3-}$          | $3,1 \cdot 10^{-12}$ | 42 | $[\text{Cu I}_2]^-$               | $1,8 \cdot 10^{-9}$  |
| 14 | $[\text{BeF}_4]^{2-}$           | $4,1 \cdot 10^{-14}$ | 43 | $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ | $2,1 \cdot 10^{-13}$ |
| 15 | $[\text{Be}(\text{OH})_4]^{2-}$ | $1,0 \cdot 10^{-15}$ | 44 | $[\text{Cu}(\text{OH})_4]^{2-}$   | $7,6 \cdot 10^{-7}$  |
| 16 | $[\text{CdBr}_4]^{2-}$          | $2,0 \cdot 10^{-4}$  | 45 | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$   | $1,0 \cdot 10^{-24}$ |
| 17 | $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$ | $1,4 \cdot 10^{-19}$ | 46 | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$   | $1,0 \cdot 10^{-31}$ |



| №  | Комплексный ион                   | $K_{\text{нест}}$    | №  | Комплексный ион                   | $K_{\text{нест}}$    |
|----|-----------------------------------|----------------------|----|-----------------------------------|----------------------|
| 18 | $[\text{FeF}_6]^{3-}$             | $7,9 \cdot 10^{-17}$ | 47 | $[\text{PbBr}_4]^{2-}$            | $1,0 \cdot 10^{-3}$  |
| 19 | $[\text{Ga}(\text{OH})_6]^{3-}$   | $5,0 \cdot 10^{-41}$ | 48 | $[\text{PbI}_4]^{2-}$             | $1,4 \cdot 10^{-4}$  |
| 20 | $[\text{HgCl}_4]^{2-}$            | $8,7 \cdot 10^{-16}$ | 49 | $[\text{PbCl}_6]^{4-}$            | $5,0 \cdot 10^{-12}$ |
| 21 | $[\text{HgBr}_4]^{2-}$            | $2,0 \cdot 10^{-22}$ | 50 | $[\text{SnCl}_6]^{2-}$            | $1,5 \cdot 10^{-7}$  |
| 22 | $[\text{Hg}(\text{CN})_4]^{2-}$   | $4,0 \cdot 10^{-42}$ | 51 | $[\text{SnF}_6]^{2-}$             | $1,0 \cdot 10^{-25}$ |
| 23 | $[\text{HgI}_4]^{2-}$             | $1,5 \cdot 10^{-30}$ | 52 | $[\text{Sn}(\text{OH})_6]^{2-}$   | $1,0 \cdot 10^{-63}$ |
| 24 | $[\text{Hg}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ | $5,0 \cdot 10^{-20}$ | 53 | $[\text{TlBr}_4]^-$               | $1,3 \cdot 10^{-24}$ |
| 25 | $[\text{InF}_4]^-$                | $2,0 \cdot 10^{-10}$ | 54 | $[\text{TlBr}_6]^{3-}$            | $6,3 \cdot 10^{-27}$ |
| 26 | $[\text{In}(\text{OH})_4]^-$      | $6,7 \cdot 10^{-36}$ | 55 | $[\text{TlI}_4]^-$                | $1,5 \cdot 10^{-32}$ |
| 27 | $[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$   | $1,8 \cdot 10^{-14}$ | 56 | $[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$   | $1,3 \cdot 10^{-17}$ |
| 28 | $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ | $1,1 \cdot 10^{-8}$  | 57 | $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ | $3,5 \cdot 10^{-10}$ |
| 29 | $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ | $1,9 \cdot 10^{-9}$  | 58 | $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$   | $3,6 \cdot 10^{-16}$ |



**Приложение 2**

**Стандартные электродные потенциалы  
некоторых окислительно-восстановительных систем  
в водной среде при 298 К**

| Электродный процесс                     | E <sup>0</sup> , В | Электродный процесс   | E <sup>0</sup> , В |
|---|--------------------|---|--------------------|
| $\text{Li}^+ + \bar{e} = \text{Li}$     | -3,045             | $\text{V}^{2+} + 2\bar{e} = \text{V}$   | -1,175             |
| $\text{Rb}^+ + \bar{e} = \text{Rb}$     | -2,925             | $\text{Nb}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Nb}$   | -1,100             |
| $\text{K}^+ + \bar{e} = \text{K}$       | -2,924             | (щелочная среда)<br>$2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$    | -0,828             |
| $\text{Cs}^+ + \bar{e} = \text{Cs}$     | -2,923             | $\text{Zn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Zn}$   | -0,763             |
| $\text{Ba}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ba}$ | -2,905             | $\text{Cr}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Cr}$   | -0,744             |
| $\text{Sr}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Sr}$ | -2,888             | $\text{Ga}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Ga}$   | -0,53              |
| $\text{Ca}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ca}$ | -2,866             | $\text{S} + 2\bar{e} = \text{S}^{2-}$   | -0,48              |
| $\text{Na}^+ + \bar{e} = \text{Na}$     | -2,714             | $\text{Fe}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Fe}$   | -0,447             |
| $\text{Ac}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Ac}$ | -2,6               | (нейтральная среда)<br>$2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ | -0,411             |
| $\text{La}^{3+} + 3\bar{e} = \text{La}$ | -2,522             | $\text{Cd}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Cd}$   | -0,403             |
| $\text{Y}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Y}$   | -2,372             | $\text{In}^{3+} + 3\bar{e} = \text{In}$   | -0,343             |
| $\text{Mg}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Mg}$ | -2,363             | $\text{Tl}^+ + \bar{e} = \text{Tl}$   | -0,336             |
| $\text{Sc}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Sc}$ | -2,077             | $\text{Co}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Co}$   | -0,277             |
| $\text{Be}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Be}$ | -1,847             | $\text{Ni}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ni}$   | -0,250             |
| $\text{Al}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Al}$ | -1,663             | $\text{Mo}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Mo}$   | -0,200             |
| $\text{Ti}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Ti}$ | -1,603             | $\text{Sn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Sn}$   | -0,136             |
| $\text{Zr}^{4+} + 4\bar{e} = \text{Zr}$ | -1,539             | $\text{Pb}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Pb}$   | -0,126             |
| $\text{Mn}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Mn}$ | -1,179             | $\text{W}^{3+} + 3\bar{e} = \text{W}$   | -0,05              |
| $\text{Fe}^{3+} + 3\bar{e} = \text{Fe}$ | -0,036             | $\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \bar{e} = \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$          | 0,80               |



| Электродный процесс   | E°, В       | Электродный процесс  | E°, В |
|---|-------------|--|-------|
| $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$  | <b>0,00</b> | $\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Hg}$   | 0,854 |
| $\text{Ge}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ge}$  | 0,05        | $\text{NO}_3^- + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$       | 0,87  |
| $\text{Sb}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Sb}$  | 0,15        | $\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$          | 0,94  |
| $\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | 0,17        | $\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- = \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$            | 0,957 |
| $\text{Bi}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Bi}$  | 0,215       | $\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pd}$   | 0,987 |
| $\text{Re}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Re}$  | 0,30        | $\text{Br}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Br}^-$   | 1,065 |
| $\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$  | 0,311       | $2\text{NO}_3^- + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{N}_2\text{O} + 5\text{H}_2\text{O}$ | 1,116 |
| $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$  | 0,337       | $\text{Ir}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Ir}$   | 1,15  |
| $\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$             | 0,357       | $\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pt}$   | 1,188 |
| $\text{Tc}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Tc}$  | 0,40        | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$                           | 1,229 |
| $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$                             | 0,401       | $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- = \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$        | 1,246 |
| $\text{Ru}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ru}$  | 0,45        | $\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Cl}^-$   | 1,359 |
| $\text{I}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{I}^-$  | 0,536       | $\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Au}$   | 1,498 |
| $\text{Rh}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Rh}$  | 0,60        | $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- = 2\text{SO}_4^{2-}$                            | 2,010 |
| $\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$  | 0,799       | $\text{F}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{F}^-$   | 2,87  |





Гомологический ряд алканов

| Название углеводорода | Формула                                       | Название углеводорода | Формула                                       |
|-----------------------|---|-----------------------|---|
| Метан                 | $\text{CH}_4$                                 | Гексан                | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_4 - \text{CH}_3$ |
| Этан                  | $\text{CH}_3 - \text{CH}_3$                   | Гептан                | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_5 - \text{CH}_3$ |
| Пропан                | $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$     | Октан                 | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_6 - \text{CH}_3$ |
| Бутан                 | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_2 - \text{CH}_3$ | Нонан                 | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_7 - \text{CH}_3$ |
| Пентан                | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_3 - \text{CH}_3$ | Декан                 | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_8 - \text{CH}_3$ |

Важнейшие радикалы

|  |  |   |
|--|--|---|
| $\text{CH}_3 -$<br>метил   | $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 -$<br>этил  | $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$<br>пропил   |
| $\text{CH}_3 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}} -$<br>изопропил   | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_2 - \text{CH}_2 -$<br>бутил   | $\text{CH}_3 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}} - \text{CH}_2 -$<br>изобутил                   |
| $\text{CH}_3 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\underset{\text{CH}_3}{ }{\text{C}}}} -$<br>трет-бутил              | $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}} -$<br>втор-бутил                            | $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_3 - \text{CH}_2 -$<br>пентил (амил)  |
| $\text{CH}_3 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\underset{\text{CH}_3}{ }{\text{C}}}} - \text{CH}_2 -$<br>неопентил | $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\underset{\text{CH}_3}{ }{\text{C}}}} -$<br>трет-пентил | $\text{CH}_3 - \underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}} - (\text{CH}_2)_2 -$<br>изопентил<br>(изоамил) |
| $\text{CH}_2 = \text{CH} -$<br>винил<br>(этенил)   | $\text{CH}_3 - \text{CH} = \text{CH} -$<br>1-пропенил  | <br>фенил                 |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Введение .....  | 3   |
| 1. Классы неорганических соединений .....                         | 4   |
| 2. Основные понятия и законы химии .....                          | 14  |
| 3. Строение атома. Периодический закон.<br>Химическая связь ..... | 24  |
| 4. Основы химической термодинамики .....                          | 37  |
| 5. Скорость химических реакций.<br>Химическое равновесие .....    | 44  |
| 6. Количественный состав растворов .....                          | 56  |
| 7. Свойства растворов неэлектролитов .....                        | 65  |
| 8. Свойства растворов электролитов .....                          | 72  |
| 9. Произведение растворимости .....                               | 83  |
| 10. Ионное произведение воды.<br>Водородный показатель (рН) ..... | 93  |
| 11. Гидролиз солей .....  | 101 |
| 12. Коллоидно-дисперсные системы .....                            | 111 |
| 13. Фазовые равновесия .....                                      | 119 |
| 14. Комплексные соединения .....                                  | 134 |
| 15. Окислительно-восстановительные реакции .....                  | 144 |
| 16. Электрохимические процессы .....                              | 164 |
| 17. Водоподготовка .....  | 177 |
| 18. Основы органической химии .....                               | 183 |
| Список рекомендуемой литературы .....                             | 207 |
| <i>Приложение 1</i> .....   | 209 |
| <i>Приложение 2</i> .....   | 211 |
| <i>Приложение 3</i> .....   | 213 |



*Учебное издание*

## **ХИМИЯ**

### **Коллектив составителей:**

**Проскунов Игорь Владимирович**  
**Сенчурова Людмила Анатольевна**  
**Салищева Олеся Владимировна**  
**Шевченко Татьяна Викторовна**  
**Захаренко Мария Анатольевна**

+ 16

Редактор О. С. Григорьева  
Технический редактор В. П. Манаенко

Подписано в печать 27.09.2021. Формат 60×84/16  
Бумага типографская. Гарнитура Times New Roman  
Печ. л. 13,4. Тираж 500 экз.  
Заказ № 152

Оригинал-макет изготовлен  
в Центре книгоиздания  
Кемеровского государственного университета  
650000, г. Кемерово, пр-т Советский, 73

Отпечатано в лаборатории множительной техники  
Кемеровского государственного университета  
650000, г. Кемерово, пр-т Советский, 73

Кемеровский государственный университет,  
650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

