

Н.Ф. СТАСЬ

ВВЕДЕНИЕ В ХИМИЮ

1A	1	H	IIA																			0	2	He
	2	3	Li	4	Be							5	6	7	8	9	10							
	3	11	Na	12	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	— VII —	IB	IB	13	14	15	16	17	18					
	4	19	K	20	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31	32	33	34	35	36			
	5	37	Rb	38	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	49	50	51	52	53	54			
	6	55	Cs	56	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	81	82	83	84	85	86			
	7	87	Fr	88	Ra	+Ac	Ku	Nb																

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Томск 2007

УДК 546 (076.5)

ББК

Стась Н.Ф.

Введение в химию: Учебное пособие. – Томск: СТАНИФ, 2007. – 155 с.

В пособии рассматриваются понятия и закономерности атомно-молекулярного учения, классификация и номенклатура неорганических соединений, структура и закономерности Периодической системы Д.И. Менделеева, типы химических реакций. Предназначено для студентов с недостаточной базовой подготовкой по химии.

*Рецензенты*

Кандидат химических наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Томского политехнического университета  
**Л.Д. Свинцова**

Кандидат химических наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Томского политехнического университета  
**А.В. Коршунов**

© Николай Фёдорович Стась, 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Уровень базовых знаний по химии выпускников наших школ из года в год снижается. Причин этого явления много: уменьшение числа уроков, выделяемых на изучение химии, плохое материальное снабжение химических кабинетов, снижение профессиональной компетенции учителей и т.д. Но главная причина, как мы считаем, – это отмена обязательного выпускного экзамена в школах по химии. Поступив в технический университет, многие студенты испытывают поистине шоковое состояние, когда узнают о том, что в университете изучается химия, на которую в школе они не обращали внимания, считая её второстепенным предметом.

Преподаватели химии в технических университетах вынуждены решать проблему ликвидации пробелов в школьном химическом образовании студентов в условиях, когда аудиторное время не выделяется, так как в Государственных образовательных стандартах высшего профессионального образования изучение базового химического материала не предусмотрено. На входном контроле, который мы проводим ежегодно, и на первых же занятиях выявляются огромные пробелы в базовых знаниях по химии. Отметим самые типичные пробелы первокурсников в школьных знаниях по химии.

1. Они не знают атомно-молекулярное учение (это фундамент химии) и простейшие соотношения между количеством, массой и молярной массой вещества.

2. Из школьной химии «вытравлено» понятие стехиометрической валентности; не зная валентность элементов, они часто ошибаются при составлении формул химических соединений.

3. Пониманию состава соединений способствуют их структурные формулы, но о структурных формулах «что-то слышали» лишь отдельные студенты.

4. Они не знают разницы между схемой и уравнением реакции.

5. Стехиометрия как раздел химии, изучающий количественные соотношения между элементами в соединениях и между соединениями в реакциях, большей части поступившим в университет неизвестна.

6. Практически все первокурсники не могут привести объем газа к нормальным условиям и проводить без ошибок вычисления по уравнению Клапейрона – Менделеева.

7. Основные классы неорганических соединений абитуриенты знают, но показать уравнениями реакций химические свойства – это проблема для многих, а показать свойства амфотерного оксида или основания – проблема для всех.

8. Абитуриенты не демонстрируют глубины понимания периодического закона и закономерностей Периодической системы, например, как изменяются в периодах и группах свойства элементов и однотипных соединений. Поэтому они не могут прогнозировать свойства элемента и его соединений по его месту в Периодической системе.

9. Они имеют слабое представление о способах получения и практическом применении даже самых распространенных соединений: серной кислоты, гидроксида натрия и кальция, карбоната натрия. Практически никто не знает доменный процесс получения железа.

10. При объяснении закономерности химической кинетики абитуриенты любую реакцию рассматривают как простую, тогда как большинство реакций – сложные, кинетический порядок которых не равен молекулярности.

11. Они не знают, что кислые и основные соли диссоциируют ступенчато, не умеют правильно записывать схемы диссоциации.

12. Гидролиз солей: по этой теме из года в год повторяется проблема его ступенчатости; у абитуриентов гидролиз всех солей протекает необратимо по всем ступеням одновременно.

13. Они плохо решают задачи, связанные с массовой долей растворенного вещества, и совсем не знают молярной концентрации, которая является основным способом выражения состава растворов.

14. Трудно поверить, но многие абитуриенты не знают соотношения между граммом и килограммом, миллилитром и литром и т.д.

15. Они не умеют вычислять логарифмы и антилогарифмы чисел, хотя в химических расчетах такие математические действия приходится проводить, например в расчетах по уравнениям Аррениуса и Нернста.

Немало и таких студентов, которые до поступления в университет химию вообще не изучали. Например, на машиностроительный факультет Томского политехнического университета принимаются выпускники машиностроительного колледжа, которым в качестве вступительных экзаменов за-

считываются итоговые оценки колледжа. В этом колледже изучение химии учебным планом не предусмотрено, и она не изучается.

В Томском политехническом университете преподаватели кафедры общей и неорганической химии в течение 5–6 недель в начале семестра вынуждены обучать студентов школьной химии, из-за чего часть вузовского материала, предусмотренного Государственным образовательным стандартом, не изучается. Но они должны это делать, так как без этой вынужденной меры химические знания студентов не будут иметь прочного фундамента.

Можно ли изменить эту ситуацию? Какими методическими приёмами можно сократить время изучения «начал» химии?

Возможности имеются: дополнительные занятия, консультации, обучение в компьютерных классах и по Интернету, обучение с помощью компакт-дисков, репетиторство и т.д. Но эти возможности студенты не используют. Адаптация к суровым вузовским требованиям идёт медленно, синдром школьника (пусть меня научат) сопровождает студента на протяжении всего первого курса.

Ещё одна возможность – самостоятельное изучение основных понятий и законов химии. Самостоятельная работа студентов является сейчас основным методом в системе высшего профессионального образования. Эффективность самостоятельной работы зависит в первую очередь от самого студента, от его умения самостоятельно учиться. Но преподаватели должны обеспечивать студентов хорошим учебным материалом: учебными пособиями, примерами использования теоретического материала при решении практических задач, средствами самоконтроля и внешнего объективного контроля.

Данное пособие предназначено для самостоятельного изучения «начал» химии. Это атомно-молекулярное учение, стехиометрия, классификация и номенклатура неорганических соединений, структура и закономерности Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева, типы и уравнения химических реакций, основные способы выражения концентрации растворов, электролитическая диссоциация, ионообменные реакции, гидролиз солей.

Содержание дисциплины «Химия», которую изучают студенты общетехнических (нехимических) направлений в Томском политехническом университете и усвоение которого контролируется на экзамене (на некоторых факультетах – на зачёте) распределено по 12 темам, каждая из которых включает от 5 до 14 элементов содержания (приложение 1). Материал данного пособия соответствует полному содержанию темы 1 (Атомно-молекулярное учение и стехиометрия), 2 (Классификация и номенклатура неорганических соединений), 11 (Окислительно-восстановительные реакции) и части содержания темы 3 (Строение атома и Периодическая система химических элементов), 8 (Концентрация растворов), 9 (Свойства растворов) и 10 (Реакции в растворах электролитов). Данным пособием охвачено 20 элементов содержания, то есть пятая часть всего материала химии (общее число элементов содержания равно 100). Усвоив этот материал, студент значительно облегчает себе работу по изучению других, более сложных тем.

Изложение теоретического материала в данном пособии сопровождается примерами решения задач и упражнений, которые способствуют лучшему восприятию теоретического материала. После изучения каждой главы необходимо (для самоконтроля) выполнить тест и задания для самостоятельного решения. Полученные ответы самостоятельно сверяются с правильными (приложение 2). После полного изучения пособия (на это выделяется примерно один месяц от начала занятий) необходимо сдать зачёт по всему материалу. Пример зачётного задания, которое выполняется на двухчасовом аудиторном занятии, приведен в приложении 3.

## ВВЕДЕНИЕ

### 1. Предмет химии

Человека окружает огромный мир разнообразных веществ и явлений. Естественные науки изучают этот мир и закономерности происходящих в нем явлений. Природные явления и технические процессы подразделяются на физические и химические. В физических явлениях и процессах вещества не изменяют своего состава; в химических процессах из одних веществ образуются другие вещества с другими свойствами. *Химические процессы называются химическими реакциями.*

**Химия изучает состав, строение и свойства веществ, закономерности химических реакций и явления, которыми они сопровождаются.**

Химические вещества и химические реакции используются в металлургии, энергетике, химических источниках электроэнергии, в медицине, при приготовлении продуктов питания, при уходе за автомобилем, в сельском хозяйстве, в быту и т.д. Химия вносит большой вклад в решение самых главных проблем человечества: получение новых веществ, энергетика, продовольственная и экологические проблемы. Поэтому каждый специалист, работающий в сфере материального производства, должен знать основы химии.

## 2. Этапы развития химии

### Вставка 1

#### Глава 1. АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОЕ УЧЕНИЕ И СТЕХИОМЕТРИЯ

Атомно-молекулярное учение – фундаментальная основа химии и физики. Представление о том, что вещество состоит из отдельных очень малых неделимых частиц атомов, возникло еще в Древней Греции (атомная гипотеза). Но научное обоснование этой гипотезы стало возможным лишь в конце 18 – начале 19 вв., когда при изучении химических и физических процессов стали использовать все более точные количественные методы исследования.

Основные положения атомно-молекулярного учения были сформулированы М.В. Ломоносовым (1741) в разработанной им корпускулярной теории строения вещества. Работы Ломоносова на многие десятилетия опередили свою эпоху, его корпускулярная теория не была понята и не была воспринята современниками. Но количественные методы исследований, которые стали применяться в химии, привели к появлению и быстрому развитию *стехиометрии*.

#### 1. Стехиометрические законы

Стехиометрией называется раздел химии, который изучает количественный состав веществ и количественные соотношения между взаимодействующими веществами. Основой этого раздела химии являются стехиометрические законы: сохранения массы, постоянства состава, кратных отношений, объемных отношений и эквивалентов.

**Закон сохранения массы:** *масса веществ, вступивших в реакцию, равна массе веществ, образующихся в результате реакции.* Этот закон сформулировал (1748) и экспериментально подтвердил (1756) Ломоносов. Независимо от него этот закон установил позже (1789) Лавуазье, который показал, что при химических реакциях сохраняется не только общая масса веществ, но и масса каждого из элементов, входящих в состав взаимодействующих веществ.

**Закон постоянства состава** (Пруст, 1808): *вещества имеют постоянный состав независимо от способа их получения.*

**Закон кратных отношений** (Дальтон, 1803): *если два элемента образуют между собой несколько соединений, то массы одного элемента, соединяющиеся с одной и той же массой другого элемента, относятся между собой как небольшие целые числа.*

Для объяснения этих законов Дальтон в (1803) предложил атомную теорию строения вещества, сущность которой сводится к следующему:

- 1) элементы состоят из мельчайших частиц – атомов; все атомы одного элемента одинаковы;
- 2) атомы разных элементов имеют разную массу и обладают разными свойствами;
- 3) в химических реакциях атомы одного элемента не превращаются в атомы других элементов;
- 4) химические соединения состоят из атомов двух или нескольких элементов, при этом количества атомов различных элементов в соединении всегда постоянны.

Теория Дальтона объяснила законы сохранения массы, постоянства состава и кратных отношений, но не **закон простых объемных отношений**, установленный Гей-Люссаком (1805): *объемы вступающих в реакцию газов относятся друг к другу и к объемам образующихся газообразных продуктов реакции как небольшие целые числа.*

Для объяснения этого закона Авогадро (1811) выдвинул гипотезу, которая теперь называется **законом Авогадро:** *в равных объемах любых газов, взятых при одной и той же температуре и при одинаковом давлении, содержится одно и то же число молекул.* Этот закон ввел в науку понятие о молекуле как о частице вещества; при этом понятие атома как мельчайшей частицы элемента сохранялось.

Все наши представления о строении и свойствах веществ, о природе физических и химических явлений базируется на атомно-молекулярном учении. Реальность атомов и молекул доказана не только косвенными данными, но и прямыми исследованиями их внутреннего строения.

С развитием науки выяснилось, что мир веществ сложен и разнообразен. Не все вещества состоят из молекул; например, соли имеют ионную структуру. В начале 20 в. были открыты соединения переменного состава, на которые не распространяется закон постоянства состава и кратных отношений. Такие вещества объединяются общим названием *бертоллиды*, тогда как вещества постоянного состава имеют название *дальтониды*.

Но самое главное открытие в конце 19-го–начале 20 века – открытие сложного внутреннего строения атома. Установлено, что атом имеет положительно заряженное ядро, которое состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов, и электронной оболочки, которая состоит из валентных и невалентных, спаренных и неспаренных электронов. Открыты и экспериментально освоены процессы разложения и образования ядер атомов, решены проблемы использования внутриядерной энергии и синтеза новых химических элементов, которых нет в природе. Но новые открытия не «отменяют», а лишь развивают и углубляют атомно-молекулярное учение.

## 2. Химические элементы

Химическим элементом называется вид атомов с определенной величиной положительного заряда ядра и определенной совокупностью свойств.

В настоящее время известно 112 химических элементов. Одни элементы используются человеком с древних времен, другие открыты в природе в 18 – 20 вв. Около 20 элементов в природе не существуют, они получены искусственно с помощью ядерных реакций.

Все элементы имеют названия и символы. Символ элемента – это его обозначение первой буквой или двумя первыми буквами латинского названия химического элемента.

Великий русский химик Д.И. Менделеев установил, что между всеми химическими элементами существует закономерная связь, которую он назвал периодическим законом (1869). Наглядным отображением этого закона является известная всем таблица – Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева. В ней приведены символы, названия и важнейшие характеристики элементов.

**Примечание.** Символы многих химических элементов понятны, потому что их русские и латинские названия созвучны, например Ca – кальций (Calzium), Na – натрий (Natrium) и т.д. Но у некоторых элементов русские и латинские названия сильно отличаются, например, Fe – железо (Ferrum), Au – золото (Aurum), Ag – серебро (Argentum), O – кислород (Oxigenium), H – водород (Hydrogenium), C – углерод (Carboneum) и т.д. В справочнике, который рекомендуется использовать при изучении химии (Стась Н.Ф. Справочник по общей и неорганической химии), приведены две формы Периодической системы (8-клеточная и 18-клеточная) и таблица с русскими, латинскими, английскими, немецкими и французскими названиями химических элементов.

Если число химических элементов 112, а элемент – это вид атома, то должно существовать 112 видов атома. В действительности это не так. Установлено, что почти каждый химический элемент является совокупностью нескольких *изотопов*. Изотопами называются атомы, обладающие одинаковым зарядом ядра, но разным числом нейтронов в ядре. Изотопы обозначаются символами химических элементов с индексом слева вверху, который показывает массовое число. Массовым числом атома (изотопа) называется сумма протонов и нейтронов, содержащихся в ядре атома, например:  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{37}\text{Cl}$ ,  $^{29}\text{Mg}$ ,  $^{29}\text{Mg}$ ,  $^{29}\text{Mg}$  и т.д.

Масса ядра атома (изотопа) всегда несколько меньше, чем массовое число. Уменьшение массы при образовании атомных ядер (*дефект массы*) объясняется тем, что в ядрах атомов действуют огромные силы притяжения между протонами и нейтронами. Возникновение этих сил сопровождается дефектом массы согласно теории относительности Эйнштейна.

Массовое число любого изотопа – целое число, а атомная масса элемента – нет. Объясняется это тем, что атомная масса элемента – средняя величина атомных масс его изотопов с учетом их распространенности в природе.

**Пример 1.** Вычислите атомную массу ..., который имеет ...изотопа

### 3. Простые вещества и соединения

Простыми называются вещества, в состав которых входят атомы одного и того же химического элемента.

Простое вещество и химический элемент – это не тождественные понятия, хотя такое отождествление иногда ошибочно делается. Исторически сложилось так, что простые вещества называются также как и химические элементы, но это не одно и то же. Например, говорят: 1) в состав воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) входит кислород; 2) мы дышим кислородом. В первом случае речь идет о химическом элементе кислороде, а во втором – о веществе  $\text{O}_2$ , который находится в воздухе.

Если бы понятия «химический элемент» и «простое вещество» были тождественными понятиями, то простых веществ было бы столько же, сколько химических элементов (112), но в действительности их несколько сотен. Объясняется это тем, что многие элементы образуют не одно, а несколько простых веществ. Это явление называется *аллотропией*. Различные простые вещества, образованные одним и тем же химическим элементом, называются *аллотропическими модификациями* (видоизменениями) этого вещества. Они отличаются составом молекул ( $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ), кристаллическим строением (алмаз, графит) или и тем и другим (белый фосфор – молекулы  $\text{P}_4$ , красный – полимерное вещество).

Сложными называются вещества, в состав которых входят атомы различных химических элементов. Сложные вещества называются *химическими соединениями*. Они подразделяются на органические (их изучает органическая химия) и неорганические.

Неорганические соединения разнообразны по составу и свойствам. В химической практике чаще всего приходится иметь дело с четырьмя классами неорганических соединений: оксидами, основаниями, кислотами и солями. Эти классы неорганических соединений называются важнейшими или основными. Каждый класс важнейших соединений, в свою очередь, подразделяется на группы веществ, близких по свойствам. Классификации, свойствам и номенклатуре неорганических соединений посвящена следующая глава этого пособия.

### 4. Валентность

Валентностью элемента называется свойство его атомов соединяться с определенным числом других атомов.

Количественным выражением валентности являются три показателя: стехиометрическая валентность, электронная валентность и координационное число. В этой главе рассматривается первый показатель – стехиометрическая валентность.

**Стехиометрическая валентность** показывает, сколько атомов другого элемента присоединяет атом данного элемента. За единицу валентности принята валентность водорода, так как водород всегда одновалентен. Следовательно, валентность элемента – это число атомов водорода, присоединяемых или замещаемых одним атомом этого элемента. Например, в соединениях  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_4$  хлор одновалентен, кислород двухвалентен, азот трехвалентен и углерод четырехвалентен.

Но с водородом образуют соединения не все элементы, а с кислородом – почти все. Стехиометрическая валентность кислорода, как правило, равна двум. Следовательно, валентность элемента равна удвоенному числу атомов кислорода, присоединяемых к атому этого элемента. Например, в соединениях  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SeO}_3$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_7$  натрий одновалентен, железо двухвалентно, хром трехвалентен, олово четырехвалентно, ванадий пятивалентен, селен шестивалентен и марганец семивалентен.

Стехиометрическую валентность принято выражать римскими числами. Например, в соединениях  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Cl}_2\text{O}_7$  и  $\text{XeO}_4$  валентность элементов равна I (N), II (Ba), III (Al), IV (C), V (P), VI (S), VII (Cl) и VIII (Xe).

Химические элементы подразделяются на элементы постоянной валентности и элементы переменной валентности. К элементам постоянной валентности относятся:

- водород, фтор и щелочные металлы (валентность I);
- все элементы второй группы, кроме ртути (валентность II);
- все элементы третьей группы, кроме таллия (валентность III).

Остальные элементы – переменной валентности, например, сера (II, IV, VI), азот (I, II, III, IV, V), марганец (II, III, IV, V, VI, VII). Максимальное значение валентности таких элементов обычно равно номеру группы в Периодической системе, в которой они расположены. В Периодической системе имеется восемь групп, поэтому валентности выше восьми не бывает.

Максимальная валентность не равна номеру группы у фтора (группа VII, валентность I), кислорода (группа VI, валентность II), меди (группа I, валентность II) и золота (группа I, валентность III). Гелий, неон и аргон не образуют химических соединений, т.е. они имеют нулевую валентность, хотя расположены в восьмой группе Периодической системы.

## 5. Формулы соединений

Формулы соединений составляются согласно валентности элементов; составление формул облегчается тем, что в названиях соединений валентность элемента переменной валентности указывается, например: оксид марганца (VII), оксид ванадия (V), гидроксид железа (III) и т.д.

В бинарных соединениях (бинарными называются соединения, содержащие атомы двух различных элементов) произведение числа атомов на валентность одного элемента должно быть равно произведению числа атомов на валентность другого элемента: оксид азота (I)  $N_2O$ , оксид железа (III)  $Fe_2O_3$ , оксид марганца (VII)  $Mn_2O_7$ , оксид ванадия (V)  $V_2O_5$ , сульфид олова (IV)  $SnS_2$ , сульфид мышьяка (V)  $As_2S_5$  и т.д.

В последнее время понятие валентность стало распространяться на устойчивые группировки атомов – ионы. Например, анионы  $OH^-$ ,  $CN^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $ClO_3^-$  одновалентны, анионы  $SO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $CrO_4^{2-}$  – двухвалентны,  $PO_4^{3-}$ ,  $BO_3^{3-}$  – трехвалентны. Из этих примеров видно, что стехиометрическая валентность аниона равна его заряду. Точно также и валентность сложных катионов равна их заряду:  $NH_4^+$ ,  $BiO^+$ ,  $UO_2^{2+}$ ,  $TiO^{2+}$ . Благодаря этому становятся понятными формулы оснований и солей: гидроксид железа (III)  $Fe(OH)_3$ , сульфат железа (II)  $FeSO_4$ , сульфат железа (III)  $Fe_2(SO_4)_3$ , нитрат железа (III)  $Fe(NO_3)_3$ , сульфат аммония  $(NH_4)_2SO_4$ , нитрат диоксиурана (VI)  $UO_2(NO_3)_2$ .

Наиболее сложно составлять формулы кислот, так как при отсутствии опыта кажется непонятным, чему равна валентность элемента, образующего кислоту. На самом деле всё не так сложно, как кажется вначале. Следует иметь в виду, что водород в кислотах, как и в других соединениях, одновалентен, кислород двухвалентен, а валентность центрального атома (кислотообразующего элемента) может быть максимальной и не максимальной. Если в названии кислоты имеются суффиксы **-н**, **-ов** или **-ев** (серная, хромовая, кремневая), то это означает, что валентность кислотообразующего элемента – максимальная, а если суффикс **-ист**, **-оват** или **-оватист**, (сернистая, азотистая, хлорноватая, хлорноватистая) – то не максимальная.

В систематических международных названиях кислот валентность кислотообразующего элемента указывается:  $HO_4$  – тетраоксоидат (VII) водорода,  $H_5IO_6$  – гексаоксоидат (VII) водорода,  $H_2S_2O_7$  – гептаоксодисульфат (VI) водорода и т.д. Тривиальные (не систематические) названия кислот, которые обычно используются, а также названия их солей приводятся в упомянутом выше справочнике.

Формулы соединений подразделяются на простейшие и истинные. Простейшая (эмпирическая) формула отражает количественный состав соединения. Истинная (молекулярная) формула показывает реальный состав молекулы. Например, простейшие формулы пероксида водорода  $HO$ , оксида фосфора(V)  $P_2O_5$ , персульфата калия  $KSO_4$ , а истинные –  $H_2O_2$ ,  $P_4O_{10}$ ,  $K_2S_2O_8$ . Для большинства неорганических соединений простейшие формулы совпадают с истинными, чего нельзя сказать об органических соединениях, где расхождение между простейшей и истинной формулой вещества встречается часто. Например, простейшей формуле  $CH$  соответствуют истинные формулы ацетилена  $C_2H_2$  и бензола  $C_6H_6$ .

## 6. Структурные формулы

В химии, наряду с обычными формулами, используются структурные формулы. Название *структурная формула* должно означать, что она отражает структуру соединения, т.е. геометрическое строение молекул или кристаллов. Но в действительности это не так: структурные формулы показывают только взаимные связи между атомами в соединении, а не их пространственно-геометрическое расположение. Поэтому многие химики называют их по-другому: *графические формулы*.

В структурных (графических) формулах черточкой между атомами обозначается одна валентность (одна связь), а число черточек, отходящих от атома, соответствует валентности элемента.

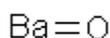
**Примечание.** Строго говоря, структурные формулы показывают не стехиометрическую, а электронную валентность, но в большей части неорганических соединений стехиометрическая валентность элементов равна электронной валентности.

При написании структурных формул кислот и солей необходимо иметь в виду, что атомы водорода соединяются с атомами кислотообразующих элементов не непосредственно, а через кислород («кислородный мостик») и что в нормальных солях атомы металлов замещают атомы водорода полностью, а в кислых солях – частично.

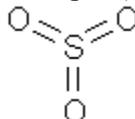
**Пример** Напишите обычные и структурные формулы оксида бария, оксида серы (VI), оксида железа (III), гидроксида железа (III), азотной кислоты, серной кислоты, нитрата кальция, сульфата железа (II), дигидрофосфата натрия.

*Решение.*

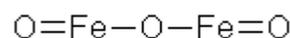
1) Оксид бария BaO



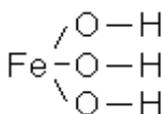
2) Оксид серы (VI) SO<sub>3</sub>



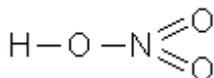
3) Оксид железа (III) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



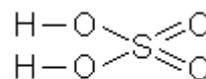
4) Гидроксид железа (III)



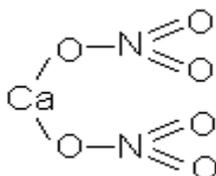
5) Азотная кислота HNO<sub>3</sub>



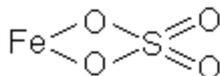
6) Серная кислота H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



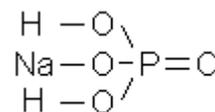
7) Нитрат кальция Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>



8) Сульфат железа (II) FeSO<sub>4</sub>



9) Дигидрофосфат натрия



## 7. Атомные и молекулярные массы

Массы атомов чрезвычайно малы ( $10^{-27}$ – $10^{-25}$  кг), поэтому в науке пользуются не их абсолютными значениями ( $m_a$ ), а относительными; они обозначаются  $A_r$ , где нижний индекс  $r$  означает «относительный» (от англ. relative).

Относительной массой химического элемента называется отношение массы его атома к  $1/12$  массы изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , которая принята за атомную единицу массы (а.е.м или АЕМ.):

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_a(^{12}\text{C}) = \frac{1,993 \cdot 10^{-26}}{12} = 1,667 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,666 \cdot 10^{-24} \text{ г}$$

Относительная атомная масса является одной из главных характеристик химического элемента и приводится в Периодической системе под символом элемента. Для элементов устойчивых (или неустойчивых, но с большим «временем жизни», т.е. с большим периодом полураспада) приводятся средние атомные массы изотопов с учетом их содержания в общей смеси изотопов. Для элементов с коротким «временем жизни» приводятся (в квадратных скобках) массовые числа наиболее устойчивых изотопов.

Округленные атомные массы наиболее распространенных химических элементов (H, O, N, C, S, Na, Mg, Ca, Al, Fe, Cl) желательно знать «по памяти». Они равны 1 (H), 16 (O), 14 (N), 12 (C), 32 (S), 23 (Na), 24 (Mg), 40 (Ca), 27 (Al), 56 (Fe), 35,5 (Cl).

Примечание. Атомную массу хлора принято округлять до первого десятичного знака.

Относительной молекулярной массой вещества называется отношение массы его молекулы к  $1/12$  массы изотопа  $^{12}\text{C}$ . Она обозначается  $M_r$  и вычисляется путем сложения атомных масс элементов, входящих в состав вещества с учетом числа их атомов в формуле вещества, независимо от того, какую структуру имеет вещество: молекулярную или немолекулярную. Округленные молекулярные массы наиболее распространенных простых и сложных веществ также желательно знать «по памяти»: H<sub>2</sub> (2), O<sub>2</sub> (32), N<sub>2</sub> (28), Cl<sub>2</sub> (71), H<sub>2</sub>O (18), NH<sub>3</sub> (17), CaO (56), MgO (40), NaOH (40), KOH (56), Ca(OH)<sub>2</sub> (74), HCl (36,5), HNO<sub>3</sub> (63), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98), H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (98), NaNO<sub>3</sub> (85), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (106), CaCO<sub>3</sub> (100).

## 8. Количество и молярная масса вещества

В химических экспериментах и технологических процессах имеют дело не с отдельными атомами и молекулами, а с той или иной массой (или объемом) вещества, в которой содержится огромное число атомов и молекул. Для проведения расчетов с такими массами введено понятие о количестве вещества. Количество вещества определяется числом содержащихся в нем атомов или молекул.

Количество вещества обозначается символом  $n$  (читается: эн) Единицей количества вещества является моль.

**Один моль** – это такое количество вещества, в котором содержится столько молекул, атомов или других структурных единиц, сколько содержится атомов в 12 г изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ .

Число структурных единиц, составляющих один моль вещества, известно:  $6,02 \cdot 10^{23}$ . Это число называется *постоянной Авогадро* (или *числом Авогадро*) и является одной из фундаментальных постоянных величин в химии и физике.

**Примечание.** Строго говоря, числом Авогадро – это число  $6,02 \cdot 10^{23}$ , а постоянная Авогадро – это то же число с указанием единицы измерения:  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

Масса одного моля вещества называется молярной массой; её обозначение (символ) –  $M$ , единица измерения – г/моль. Для веществ с атомной структурой (благородные газы, металлы, бор, углерод, кремний) молярная масса равна относительной атомной массе, выраженной в граммах, например:  $M(\text{Fe}) = 55,85$  г/моль  $\approx 56$  г/моль. Для веществ с молекулярной структурой молярная масса равна относительной молекулярной массе, выраженной в граммах, например:  $M(\text{H}_2\text{SO}_4) \approx 98$  г/моль. Для веществ с ионной структурой молярная масса рассчитывается для формульной единицы вещества, например:  $M(\text{CaCO}_3) \approx 100$  г/моль.

Термин *моль* – это полное название единицы измерения количества вещества, и в то же время её сокращенное обозначение; в других единицах измерения такого не бывает: сравните, например, килограмм – кг, метр – м, секунда – с. Поэтому слово моль при написании *после числа и в заголовках таблиц* не склоняется, но при чтении текста его следует склонять, иначе нарушаются правила грамматики. Например, написан текст: в химической реакции 500 г NaOH провзаимодействовало с 1 кг  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Читается: в химической реакции пятьсот граммов гидроксида натрия провзаимодействовало с одним килограммом серной кислоты. Написан текст: в химической реакции 2 моль KOH провзаимодействовало с 3 моль  $\text{HNO}_3$ . Читается: в химической реакции два моля гидроксида калия провзаимодействовало с тремя молями азотной кислоты.

Часто в химических текстах перед указанием числа молей пишутся слова «количество вещества», например: «в реакции участвовало количество вещества аммиака 5 моль». Такая фраза для русского языка непривычная. Для сравнения вспомним, что когда речь идет не о количестве, а о массе или объеме, то в этих случаях говорят просто и естественно: «в реакции участвовало 25 г хлорида бария»; нигде нет неестественных для русского языка фраз типа: «в реакции участвовала масса хлорида бария 20 г». Но термин «количество» применяется не только в том смысле, который он имеет в химии, но шире, например количество тепла, электричества, денег, людей и т.д. Именно по этой причине принято говорить «в реакции участвовало количество вещества аммиака 5 моль».

Понятие моль распространяется на любые формульные и структурные единицы:  $n_{\text{Fe}}$  – количество атомов железа,  $n(\text{H}_2\text{O})$  – количество молекул воды,  $n_{\text{NaCl}}$  – количество формульных единиц хлорида натрия,  $n(\text{Na}^+)$  – количество катионов натрия,  $n_{\text{OH}}$  – количество групп OH,  $n_e$  – количество электронов. В текстах формульная или структурная единица указана и разночтений не бывает. В устной речи молекулы и формульные единицы специально не указываются, а все остальные структурные единицы следует указывать. Например, если имеют в виду молекулярный водород  $\text{H}_2$ , то говорят: количество водорода. Это следует понимать так, что все знают о том, что естественное состояние водорода, азота, кислорода, галогенов – это двухатомные молекулы, а не атомы. К сожалению, это знают не все. Поэтому приходится говорить: количество **молекулярного** водорода, хотя при обычных условиях существование атомарного водорода невозможно.

Количество вещества ( $n$ ), масса ( $m$ ) и молярная масса ( $M$ ) связаны между собой соотношениями:

$$n = \frac{m}{M}; \quad m = n \cdot M; \quad M = \frac{m}{n}$$

**Пример** . Какое количество воды содержится в 0,9 л этого вещества?

*Решение.* Плотность воды равна единице (1 кг/л), следовательно, масса 0,9 л воды равна 0,9 кг или 900 г. Молярная масса  $H_2O$  18 г/моль. Искомая величина равна  $900:18$ , т.е. 50 моль.

**Пример** . Вычислитт массу 25 моль гидроксида калия.

*Решение.* Молярная масса KOH равна 56 г/моль, поэтому масса 25 моль этого вещества составляют  $25 \cdot 56$ , т.е. 1400 г.

**Пример.** Массе 5,39 г соответствует 0,05 моль неизвестного металла. Какой это металл?

*Решение.* Вычисляем молярную массу неизвестного металла, она равна  $5,39:0,05$ , т.е. 107,8 г/моль. Это означает, что неизвестный металл (находим его по атомной массе в Периодической системе) – серебро.

## 9. Молярный объем газа

Согласно закону Авогадро, одно и то же число молекул любого газа занимает при одинаковых условиях один и тот же объем. Объясняется это тем, что в газах расстояния между молекулами, по сравнению с размерами самих молекул, велики и примерно одинаковы. Следовательно, при одинаковых условиях один моль любого газа занимает один и тот же объем. Этот объем при нормальных условиях (273 К, 101325 Па) называется молярным объемом газа, обозначается  $V_m$ , единица измерения л/моль. Точное численное значение  $V_m$  равно 22,4138 л/моль, округленная величина  $V_m \approx 22,4$  л/моль.

Для приведения объема газа к нормальным условиям используется уравнение Клапейрона:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0},$$

в котором  $p$  и  $V$  – давление и объем газа при температуре  $T$ ,  $p_0$  – нормальное давление (101325 Па),  $T_0$  – нормальная температура (273 К),  $V_0$  – объем газа при нормальных условиях.

**Пример.** При давлении 98,5 кПа и температуре 80 °С некоторое количество газа занимает объемом 3,25 л. Определите объем газа при нормальных условиях.

*Решение.* Из уравнения Клапейрона выражаем и вычисляем  $V_0$ :

$$V_0 = \frac{pVT_0}{p_0T} = \frac{98500 \cdot 3,25 \cdot 273}{101325 \cdot 353} = 2,44 \text{ л}$$

Характеристики газов удобно рассчитывать, пользуясь уравнением Клапейрона – Менделеева (уравнение состояния идеального газа):

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

в котором  $p$  – давление газа (Па);  $V$  – его объем ( $m^3$ );  $m$  – масса газа (г);  $M$  – его молярная масса (г/моль);  $T$  – температура (К);  $R$  – молярная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)).

При расчётах по уравнению Клапейрона – Менделеева необходимо строго соблюдать единицы измерения характеристик газа.

**Пример.** Какой объем занимает 1 кг воздуха при 17 °С и давлении 100 кПа?

*Решение.* Искомую величину вычисляем по уравнению Клапейрона – Менделеева, имея в виду, что масса 1 кг равна 1000 г, температура 17 °С по абсолютной шкале равна 290 К, а средняя молярная масса воздуха равна 29 г/моль:

$$V = \frac{mRT}{pM} = \frac{1000 \cdot 8,314 \cdot 290}{100000 \cdot 29} = 0,8314 \text{ м}^3 = 831,4 \text{ л}$$

**Пример 24.** Колба объемом 750 мл, наполненная при 27 °С кислородом, имеет массу 83,3 г. Масса пустой колбы равна 82,1г. Определите давление кислорода в колбе.

*Решение.* 1) Вычитая из большей массы (83,3 г) меньшую (82,1 г), находим массу кислорода; она равна 1,2 г.

2) По уравнению Клапейрона – Менделеева вычисляем давление:

$$p = \frac{mRT}{MV} = \frac{1,2 \cdot 8,31 \cdot 300}{32 \cdot 0,75 \cdot 10^{-31}} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

**Пример 23.** Чему равна молярная масса газа, если 1 л этого газа при давлении  $1,2 \cdot 10^5$  Па и температуре  $27^\circ\text{C}$  имеет массу 0,96 г.

*Решение.* Из уравнения Клапейрона – Менделеева выражаем и вычисляем молярную массу:

$$M = \frac{mRT}{pV} = \frac{0,96 \cdot 8,31 \cdot 300}{120000 \cdot 0,001} = 20 \text{ г/моль}$$

**Пример.** Вычислите молярную массу ацетона, если масса 0,5 л его паров при  $87^\circ\text{C}$  и давлении 96 кПа равна 0,93 г.

*Решение.* Из уравнения Клапейрона-Менделеева выражаем и вычисляем молярную массу газа:

$$M = \frac{mRT}{PV} = \frac{0,93 \cdot 8,314 \cdot 360}{96000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 58 \text{ г/моль}$$

### Вставка

## 10. Закон эквивалентов

**Закон эквивалентов относится к основным законам химии, на которых основано атомно-молекулярное учение, но в школьном курсе химии он не изучается, поэтому требует специального рассмотрения.**

**Практически во всех учебных пособиях приводится такая формулировка закона эквивалентов: массы взаимодействующих без остатка веществ относятся как их эквивалентные массы. Этой формулировке соответствует математическое выражение:**

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_{\text{эк}}(B_1)}{M_{\text{эк}}(B_2)}$$

**В действительности формулировка закона эквивалентов такова:**

**А та формулировка, которая обычно приводится в учебных пособиях, и её математическое выражение – это следствие закона эквивалентов.**

*Эквивалентом* называется реальная или условная частица, которая соединяется с одним атомом или ионом водорода, либо замещает его. Реальные частицы – это атомы или молекулы, а условные – их части, например,  $\frac{1}{2}$  атома кислорода,  $\frac{1}{3}$  молекулы  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и т.д. Относительная масса такой частицы называется эквивалентной массой, а масса одного моля этих частиц (эквивалентов) – молярной массой эквивалента. Эквивалентная масса и молярная масса эквивалента обозначаются одинаково ( $M_{\text{эк}}$ ). Единица измерения молярной массы эквивалента – г/моль эк.

Из определения эквивалента следует, что эквивалентная масса – относительная величина, причем, за эталон взят водород, эквивалент которого – его атом, а эквивалентная масса равна единице.

Для определения эквивалентной массы химического элемента не обязательно исходить из его соединения с водородом. Ее можно вычислить по составу соединения данного элемента с кислородом, эквивалентная масса которого в большинстве случаев равна восьми, или по составу соединения данного элемента с любым другим, эквивалентная масса которого известна.

Элементы переменной валентности образуют с другими элементами по несколько соединений разного состава, при этом их эквивалентные массы в этих соединениях будут различными. Между атомной массой ( $A_r$ ), валентностью ( $Z$ ) и эквивалентной массой ( $M_{\text{эк}}$ ) элемента существует простая взаимосвязь:

$$M_{\text{эк}} = \frac{A_r}{Z}$$

**Пример .** Мышьяк образует два оксида, массовая доля мышьяка в которых равна 65,2 % и 75,7 %. Определите эквивалентную массу и валентность мышьяка в оксидах и напишите формулы оксидов.

*Решение.* Проводим вначале все вычисления для первого оксида.

1) Принимаем массу оксида равной 100 г. В этом случае масса мышьяка равна 65,2 г, а кислорода 100 – 65,2, т.е. 34,8 г;

2) Молярная масса эквивалентов кислорода в оксидах равна 8 г/моль эк. По закону эквивалентов вычисляем молярную массу эквивалентов мышьяка:

$$\frac{m(\text{As})}{m(\text{O})} = \frac{M_{\text{эк}}(\text{As})}{M_{\text{эк}}(\text{O})}; \quad M_{\text{эк}}(\text{As}) = \frac{65,2 \cdot 8}{34,8} = 15,0 \text{ г/моль эк}$$

3) Определяем валентность мышьяка:

$$Z = \frac{M(\text{As})}{M_{\text{эк}}(\text{As})} = \frac{75}{15} = 5,$$

следовательно формула оксида  $\text{As}_2\text{O}_5$ .

4) Проводим такие же вычисления для второго оксида, получим  $\text{As}_2\text{O}_3$ .

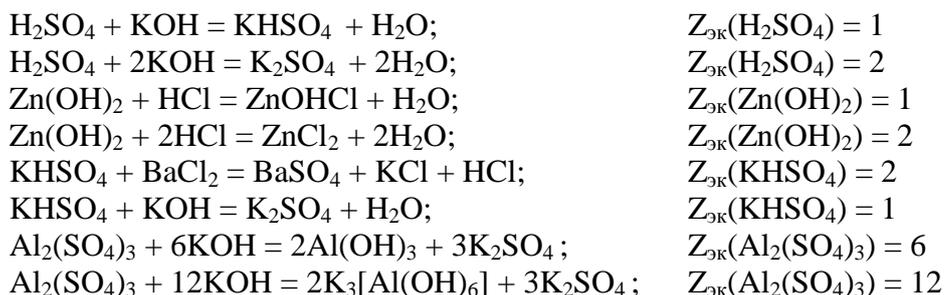
Для вычисления эквивалентной массы и численно равной ей молярной массы эквивалента химического соединения используется соотношение:

$$M_{\text{эк}} = \frac{M}{Z_{\text{эк}}},$$

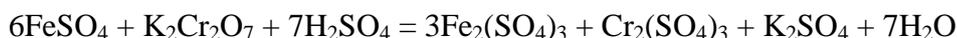
В котором  $M$  – молярная масса соединения;  $Z_{\text{эк}}$  – его эквивалентное число.

Эквивалентное число показывает, сколько эквивалентов вещества содержится в его молекуле или формульной единице. Оно зависит от типа реакции, в которой участвует вещество и, в сущности, является аналогом валентности химического элемента.

В обменных реакциях эквивалентное число определяется стехиометрией реакции, например:



В окислительно-восстановительных реакциях эквивалентное число окислителя равно числу электронов, принимаемых одной формульной единицей окислителя, а эквивалентное число восстановителя – числу отдаваемых им электронов. Например, в реакции:



эквивалентное число  $\text{FeSO}_4$  (восстановитель) равно 1, а  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (окислитель) равно 6.

Понятие «эквивалент» и закон эквивалентов имеют большое значение в химии. С ними связаны способы определения атомных масс химических элементов, концентрации растворов, жесткости воды и расчеты процессов электролиза.

**Пример** . Двухвалентный металл массой 1,168 г вытеснил из серной кислоты 438 мл водорода (объем измерен при температуре 17 °С и давлении 750 мм рт. ст.). Определите эквивалентную и атомную массу металла. Какой это металл?

*Решение.* 1) Переводим давление в паскалы по пропорции:

$$\begin{aligned} 101325 \text{ Па} &\text{ соответствует } 760 \text{ мм рт. ст.} \\ x \text{ Па} &\text{ соответствует } 750 \text{ мм рт. ст.} \end{aligned}$$

$$x = \frac{101325 \cdot 750}{760} = 99992 \text{ Па}$$

2) По уравнению Клапейрона – Менделеева вычисляем массу водорода:

$$m(\text{H}_2) = \frac{pVM}{RT} = \frac{99992 \cdot 438 \cdot 10^{-6} \cdot 2}{8,31 \cdot 290} = 0,036 \text{ г}$$

3) По закону эквивалентов находим эквивалентную массу металла:

$$M_{\text{эк}} = \frac{1,168 \cdot 1}{0,036} = 32,6$$

4) Вычисляем атомную массу металла

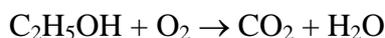
$$A_r = M_{\text{эк}} \cdot Z = 32,6 \cdot 2 = 65,2$$

В Периодической системе двухвалентный металл с близкой атомной массой – цинк.

## 11. Химические реакции

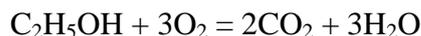
Химические превращения одних веществ в другие называется химическими реакциями. С помощью формул веществ химическую реакцию можно записать или в виде схемы, или в виде уравнения.

Схема химической реакции несет только качественную информацию: какие вещества взаимодействуют и что при этом получается:



Закон сохранения массы в схеме реакции не соблюдается, поэтому между реагентами (исходными веществами) и продуктами ставится стрелка.

В уравнении реакции закон сохранения массы соблюдается, поэтому между реагентами и продуктами ставится знак равенства:



Химические реакции подробно рассматриваются в четвертой главе данного пособия.

## 12. Стехиометрические расчеты

**Напоминаем, что стехиометрией называется раздел химии, который изучает количественные соотношения между элементами в соединениях и между веществами в химических реакциях.** Стехиометрические расчеты проводятся по формулам веществ, уравнениям реакций и по закону эквивалентов.

### 12.1. Расчеты по формулам веществ

Формула вещества – это не только молекула или формульная единица вещества, но и один моль этого вещества. Поэтому по формуле можно вычислить количественный состав вещества (массовые доли элементов) и, наоборот, по известному количественному составу вещества определить его формулу.

**Пример** . Вычислите массовые доли натрия, углерода и кислорода в карбонате натрия.

*Решение.* Один моль карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  содержит 2 моль атомов натрия, 1 моль атомов углерода и 3 моль атомов кислорода. Молярная масса  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  равна 106 г/моль, натрия – 23 г/моль, углерода – 12 г/моль, кислорода – 16 г/моль. В 106 г (1 моль)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  содержится натрия – 46 г, углерода – 12 г и кислорода – 48 г. Вычисляем массовые доли элементов ( $\omega$ ):

$$\omega(\text{Na}) = \frac{46}{106} = 0,444 = 44,4\%; \quad \omega(\text{C}) = \frac{12}{106} = 0,113 = 11,3\% \quad \omega(\text{O}) = \frac{48}{106} = 0,453 = 45,3\%$$

**Пример** . Определите формулу оксида железа, содержащего 69,9 % железа и 30,1 % кислорода.

*Решение.* Обозначим числа атомов железа и кислорода в формуле оксида через  $x$  и  $y$  ( $\text{Fe}_x\text{O}_y$ ). Молярная масса атомов железа равна 55,85 г/моль, а кислорода – 16,00 г/моль. Масса железа в оксиде составляет  $55,85 \cdot x$ , кислорода –  $16,00 \cdot y$ , а отношение этих масс по условию задачи равно 69,9:30,1. Таким образом:

$$69,9:30,1 = 55,85 \cdot x : 16,00 \cdot y, \quad \text{откуда } x:y = \frac{69,9}{55,85} : \frac{30,1}{16,00} = 1,25:1,88$$

Чтобы выразить полученное отношение целыми числами, разделим оба его члена на меньший из них, а затем умножим на два:

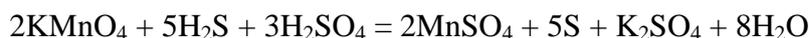
$$x : y = \frac{1,25}{1,25} : \frac{1,88}{1,25} = 1 : 1,5; \quad x : y = 2 : 3$$

Таким образом, формула оксида железа –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## 12.2. Расчеты по уравнениям реакций

В уравнении химической реакции коэффициенты перед формулами – это количества веществ. Поэтому достаточно знать массу лишь одного вещества, чтобы определить массы всех остальных участвующих в реакции веществ. А если в реакции участвуют газообразные вещества, то по уравнению реакции можно найти их объемы.

**Пример** . Перманганат калия и сероводород в присутствии серной кислоты взаимодействуют по уравнению:



Какая масса  $\text{KMnO}_4$  и какой объем  $\text{H}_2\text{S}$  (при н.у.) взаимодействуют в этой реакции, если образуется 80 г серы?

*Решение.* 1) Молярная масса атомов серы  $M(\text{S}) = 32$  г/моль. Находим количество серы, образующейся в результате реакции:

$$n(\text{S}) = \frac{m(\text{S})}{M(\text{S})} = \frac{80}{32} = 2,5 \text{ моль}$$

2) Согласно уравнению реакции, на образование 5 моль серы расходуется 2 моль  $\text{KMnO}_4$ , следовательно, при образовании 2,5 моль серы в реакции участвует 1 моль  $\text{KMnO}_4$ , т.е. 158,0 г.

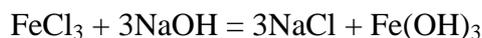
3) По уравнению реакции количества сероводорода и серы одинаковы, следовательно, объем сероводорода можно вычислить так:

$$V(\text{H}_2\text{S}) = n(\text{H}_2\text{S}) \cdot V_m = 2,5 \cdot 22,4 = 56,0 \text{ л}$$

Бывают задачи, в которых даны массы двух взаимодействующих веществ. В таких задачах необходимо вначале определить, какое вещество дано в недостатке и по этому веществу вести расчет продуктов реакции.

**Пример** . К раствору, содержащему 16,22 г  $\text{FeCl}_3$ , прилили раствор, содержащий 14,5 г  $\text{NaOH}$ . Определите массу образовавшегося осадка  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

*Решение.* Записываем уравнение реакции и молярные массы веществ:



$$M(\text{FeCl}_3) = 162,2 \text{ г/моль}; \quad M(\text{NaOH}) = 40,0 \text{ г/моль}; \quad M(\text{Fe}(\text{OH})_3) = 106,8 \text{ г/моль}$$

Находим количества реагентов:

$$n(\text{FeCl}_3) = \frac{16,22}{162,2} = 0,1 \text{ моль}; \quad n(\text{NaOH}) = \frac{14,5}{40} = 0,3625 \text{ моль}$$

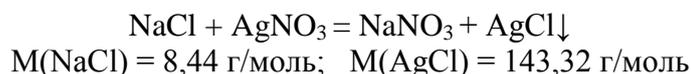
Согласно уравнению реакции, количество гидроксида натрия должно быть в три раза больше количества хлорида железа (III), но по результатам проведенного расчета оно еще больше, следовательно,  $\text{FeCl}_3$  дан в недостатке, и определение массы  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  необходимо вести по этому веществу.

По уравнению реакции количества  $\text{FeCl}_3$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  одинаковы, следовательно, будет получено 0,1 моль или 10,68 г  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Стехиометрические расчеты имеют большое значение при анализе смесей и сплавов, когда с помощью химических реакций определяется их состав.

**Пример** . Для определения состава смеси нитрата натрия с хлоридом натрия 20,00 г этой смеси растворили в воде и к полученному раствору добавили в избытке раствор  $\text{AgNO}_3$ . Полученный осадок промыли и высушили; масса осадка оказалась равной 2,87 г. Определите массу и массовую долю хлорида натрия в исходной смеси.

*Решение.* Осадок образуется в результате реакции нитрата серебра с хлоридом натрия:



Находим количество образовавшегося осадка хлорида серебра:

$$n(\text{AgCl}) = \frac{m(\text{AgCl})}{M(\text{AgCl})} = \frac{2,87}{143,32} = 0,02 \text{ моль}$$

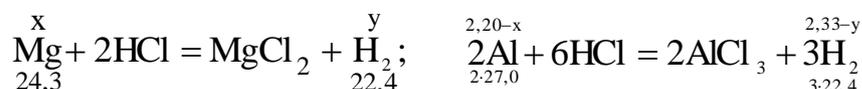
Согласно уравнению реакции, количества хлорида натрия и хлорида серебра одинаковые, следовательно, количество NaCl составляет 0,02 моль, а его масса равна 0,02·58,44 г, т.е. 1,17 г.

Вычисляем массовую долю хлорида натрия в исходной смеси:

$$\omega(\text{NaCl}) = \frac{1,17}{20} = 0,0585 = 5,85 \%$$

**Пример** . При взаимодействии соляной кислоты с 2,20 г сплава магния с алюминием выделилось 2,33 л водорода (н.у.). Определите массовые доли алюминия и магния в сплаве.

*Решение.* 1) Если массу магния в сплаве принять за  $x$ , а объем выделившегося водорода за  $y$ , то масса алюминия будет равна  $(2,20 - x)$ , а объем водорода, который выделяется при взаимодействии алюминия с соляной кислотой, будет равен  $(2,33 - y)$ . Записываем уравнения реакций, в которых указываем массы и молярные массы магния и алюминия, объем и молярный объем водорода:



2) Составляем две пропорции:

$$\frac{x}{24,3} = \frac{y}{22,4}; \quad \frac{2,20 - x}{2 \cdot 27,0} = \frac{2,33 - y}{3 \cdot 22,4};$$

3) По пропорциям составляем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$22,4 \cdot x = 24,3 \cdot y \quad (1)$$

$$3 \cdot 22,4 \cdot (2,20 - x) = 2 \cdot 27,0 \cdot (2,33 - y) \quad (2)$$

4) Выразив из первого уравнения значение неизвестного  $y$  и подставив его во второе уравнение, находим значение  $x$ , т.е. массу магния; она равна 1,26 г. Массу алюминия в сплаве находим по разности; она равна 0,94 г.

5) Вычисляем массовые доли металлов в сплаве:

$$\omega(\text{Mg}) = \frac{1,26}{2,20} = 0,575 = 57,5\%; \quad \omega(\text{Al}) = \frac{0,94}{2,20} = 0,425 = 42,5\%$$

### 12.3. Расчеты по закону эквивалентов

Закон эквивалентов позволяет производить расчеты, не записывая уравнений реакций.

**Пример** . В растворе содержится 75,6 г  $\text{HNO}_3$ . На нейтрализацию этого раствора израсходовано 67,2 г щелочи. Какая щелочь использовалась для нейтрализации?

*Решение.* Эквивалентное число  $\text{HNO}_3$  в основно-кислотных реакциях равно единице (кислота одноосновная), следовательно, молярная масса её эквивалента равна молярной массе, т.е. 63 г/моль эк. По закону эквивалентов вычисляем молярную массу эквивалента щелочи:

$$\frac{m(\text{HNO}_3)}{m(\text{щёл})} = \frac{M_{\text{эк}}(\text{HNO}_3)}{M_{\text{эк}}(\text{щёл})}; \quad M_{\text{эк}}(\text{щёл}) = \frac{67,2 \cdot 63}{75,6} = 56 \text{ г/моль}$$

Из результатов расчета следует, что в реакции использовался гидроксид калия KOH.

**Пример** . При взаимодействии 11,17 г железа с кислородом образовалось 15,97 г оксида. Определите формулу образовавшегося оксида железа.

*Решение.* 1) Вычитая из массы оксида массу железа, находим массу кислорода, которая присоединяется к данной массе железа:

$$m(\text{O}) = 15,97 - 11,17 = 4,80 \text{ г}$$

2) По закону эквивалентов вычисляем эквивалентную массу железа:

$$\frac{m(\text{Fe})}{m(\text{O})} = \frac{M_{\text{эк}}(\text{Fe})}{M_{\text{эк}}(\text{O})}; \quad M_{\text{эк}}(\text{Fe}) = \frac{11,17 \cdot 8}{4,80} = 18,62$$

3) Из соотношения, связывающего атомную массу, эквивалентную массу и валентность, найдем валентность железа в образовавшемся оксиде:

$$M_{\text{эк}}(\text{Fe}) = \frac{A_r(\text{Fe})}{Z}; \quad Z = \frac{55,85}{18,62} = 3$$

Из результатов расчета следует, что образуется оксид трёхвалентного железа, т.е.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

### 13. Способы определения атомной массы

Понятие атомной массы как важнейшей характеристики химического элемента было введено Дальтоном в его атомистической теории. Считая невозможным определить абсолютную массу атомов, Дальтон предложил использовать понятие *относительной атомной массы*, приняв за единицу массу атома наиболее легкого элемента – водорода. Но многие элементы с водородом не взаимодействуют, а с кислородом соединяются практически все элементы. Поэтому с 1906 г. стала применяться кислородная единица измерения атомных масс, численно равная  $1/16$  массы атома кислорода.

В 1929 г. было установлено, что природный кислород состоит из трех изотопов:  $^{16}\text{O}$  (99,759 %),  $^{17}\text{O}$  (0,087 %) и  $^{18}\text{O}$  (0,204 %). Поэтому использовались две шкалы атомных масс: физическая, в которой за единицу была принята  $1/16$  часть массы атома изотопа  $^{16}\text{O}$ , и химическая, в которой за единицу принималась  $1/16$  средней атомной массы природного кислорода. Неудобства, связанные с существованием двух единиц измерения атомной массы, были устранены в 1961 г., когда в качестве единицы атомной массы была принята  $1/12$  массы самого легкого изотопа атома углерода  $^{12}\text{C}$ .

Атомные массы химических элементов в 19-м столетии определялись физико-химическими методами: с использованием закона эквивалентов и правила Дюлонга и Пти (пример ), по законам электролиза (пример ), анализом газообразных соединений (пример ), весовым методом (пример ).

В 1819 г. французские физики П. Дюлонг и А. Пти установили, что **атомная теплоемкость большинства простых веществ (произведение удельной теплоемкости на атомную массу элемента) в твердом состоянии находится в пределах 22–29 Дж/(моль·К) или в среднем около 26 Дж/(моль·К)**. Следовательно, разделив число 26 на удельную теплоемкость (которая определяется опытным путем), можно найти приблизительное значение атомной массы. Сравнивая полученную величину с эквивалентной массой элемента, которая определяется также опытным путем, устанавливают валентность элемента, после чего находят точное (в пределах ошибки определения эквивалентной массы) значение атомной массы.

**Пример** . Удельная теплоемкость металла равна 0,39 Дж/(моль·К). 20 г этого металла соединяются с 3,426 л кислорода (н.у.). Определите атомную массу металла. Какой это металл?

*Решение.* 1) Находим по правилу Дюлонга и Пти приблизительную атомную массу металла:

$$A_r(\text{Me}) = \frac{26}{c} = \frac{26}{0,39} = 66,67$$

2) Вычисляем массу кислорода:

$$m(\text{O}_2) = \frac{V(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2)}{V_m} = \frac{3,426 \cdot 32}{22,4} = 4,89 \text{ г}$$

3) По закону эквивалентов рассчитываем эквивалентную массу металла:

$$M_{\text{эк}}(\text{Me}) = \frac{m(\text{Me}) \cdot M_{\text{эк}}(\text{O})}{m(\text{O}_2)} = \frac{20 \cdot 8}{4,89} = 32,69$$

4) Вычисляем валентность металла:

$$Z(\text{Me}) = \frac{A_r}{M_{\text{эк}}} = \frac{66,67}{32,69} = 2,04 = 2$$

5) Находим точную атомную массу металла:

$$A_r(\text{Me}) = Z \cdot M_{\text{эк}}(\text{Me}) = 2 \cdot 32,69 = 65,38.$$

В Периодической системе находим металл с близкой атомной массой – это цинк.

В 1848 г. английский ученый М. Фарадей установил, что для получения одного моля эквивалента любого металла методом электролиза затрачивается одно и то же количество электричества 96484,56 Кл (кулонов) Метод электролиза стал использоваться для определения эквивалентной и атомной массы металлов.

**Пример** . При электролизе соли двухвалентного металла в течение одного часа при силе тока 1 А на катоде выделилось 2,097 г металла. Определите эквивалентную и атомную массу металла. Какой это металл?

*Решение.* 1) Учитывая, что 1 ч – это 3600 с, вычисляем количество израсходованного электричества:

$$Q = I \cdot \tau = 1 \cdot 3600 = 3600 \text{ Кл}$$

2) Составляем и решаем пропорцию:

$$\begin{array}{l} 3600 \text{ кулонов выделяют } 2,097 \text{ г металла} \\ 96484,56 \quad \quad \quad \text{---} \quad M_{\text{эк}} \end{array}$$

$$\frac{3600}{96484,56} = \frac{2,097}{M_{\text{эк}}}; \quad M_{\text{эк}} = \frac{96484,56 \cdot 2,097}{3600} = 56,206 \text{ г/моль}$$

3) Вычисляем молярную массу атомов и численно равную ей атомную массу металла:

$$M(\text{Me}) = M_{\text{эк}}(\text{Me}) \cdot Z = 56,206 \cdot 2 = 112,412 \text{ г/моль}; \quad A_r(\text{Me}) = 112,412 \text{ (а.е.м.)}$$

В Периодической системе находим металл с близкой атомной массой – это кадмий.

Ещё один метод определения атомных масс был предложен итальянским химиком Канницаро (1858). По этому методу определяют молекулярные массы нескольких газообразных или летучих соединений данного элемента (см. ниже п. 14), и в каждом из них химическим анализом находят массовую долю данного элемента. Наименьшее из полученных чисел является атомной массой элемента, поскольку меньше одного атома в молекуле содержаться не может. Иллюстрируем этот метод на примере соединений углерода.

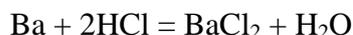
Соединения углерода	Метан	Эфир	Спирт	Бензол	Ацетон
Молекулярная масса	16	74	46	78	58
Массовая доля углерода, %	75,0	64,9	52,2	92,3	62,1
Масса углерода	12	48	24	72	36

Из этих данных видно, что наименьшая масса углерода, содержащаяся в молекулах его соединений, равна 12, а другие массы (24, 36, 48, 72) кратны этому числу. Следовательно, 12 – атомная масса углерода.

При известной валентности химического элемента его атомная масса может быть определена по стехиометрии химической реакции с использованием весового анализа.

**Пример** . При взаимодействии 1,530 г бария с соляной кислотой образовалось 2,320 г хлорида бария. Определите атомную массу бария.

*Решение.* 1) Зная валентность бария (она всегда равна двум), записываем уравнение реакции:



2) Атомная масса хлора известна (35,453), поэтому рассуждаем так:

$$\begin{array}{l} \text{из } 1,530 \text{ г бария получено } 2,320 \text{ г BaCl}_2 \\ \text{из } A \text{ г бария получится } (A + 2 \cdot 35,453) \text{ г BaCl}_2 \end{array}$$

3) Составляем и решаем пропорцию:

$$\frac{1,530}{A} = \frac{2,320}{(A + 70,906)}; \quad A_r = 137,33$$

Таким образом, атомная масса бария равно 137,33 (а.е.м.), а численно равная ей молярная масса бария равна 137,33 г/моль.

В 1869 г. Д.И. Менделеев, положив атомную массу в основу классификации элементов, открыл периодическое изменение их свойств по мере возрастания атомной массы. Исходя из местоположения элементов в созданной им Периодической системе, Менделеев не только исправил неверные значения атомной массы некоторых элементов (Be, In, U, Ce, Th, La), но и указал атомные массы еще не открытых и им же предсказанных элементов (Ga, Ge, Sc).

Следует иметь в виду, что физико-химическими методами определяются атомные массы природной смеси изотопов элементов. При этом их точность не превышает 0,01 %.

Более точные значения атомных масс получают с помощью физических методов, среди которых наиболее распространенным является метод масс-спектрометрии. Масс-спектрометрическим методом определяются массы отдельных ионов по закономерностям их движения в электрическом и магнитном поле. При этом определяют атомные массы отдельных изотопов и изотопный состав элементов. Точность определения атомных масс физическими методами превышает 0,001 %.

#### 14. Определение молекулярных масс соединений

Молекулярные массы газообразных или легколетучих веществ можно определить с помощью закона Авогадро (напоминаем его формулировку: равные объемы газов при одинаковой температуре и одинаковом давлении, содержат равное число молекул), из которого следует, что массы равных объемов двух газов относятся друг к другу, как их молекулярные или численно равные им молярные массы:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1}{M_2}$$

Отношение  $m_1 : m_2$  называется относительной плотностью первого газа по второму и обозначается символом  $D$ :

$$D = \frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1}{M_2},$$

Из него следует:

$$M_1 = D \cdot M_2,$$

т.е. молекулярная масса газа равна его плотности по отношению ко второму газу, умноженной на молекулярную массу второго газа.

Плотность газов обычно определяют по отношению к водороду или воздуху. Молекулярная масса водорода равна 2, а средняя молекулярная масса воздуха 29, поэтому уравнения для расчета молекулярной массы имеют вид:

$$M_r = 2d_{H_2}; \quad M_r = 29d_{возд}$$

**Пример** . Плотность некоторого газа по воздуху равна 1,517. Определите молекулярную массу газа.

*Решение.*

$$M_r = 29 \cdot 1,517 = 44 \text{ (а.е.м.)}$$

Молярную массу газообразного вещества (а следовательно, и его относительную молекулярную массу) можно определить по молярному объему.

**Пример** . Определите молярную массу газа, если при н.у. 0,180 г этого газа занимают объем 0,126 л.

*Решение.* 1) При н.у. один моль любого газа занимает объем 22,4 л. Следовательно, вычислив массу 22,4 л данного газа, мы узнаем его молярную и молекулярную массу. Рассуждаем так:

0,180 г газа занимает объем 0,126 л  
x г газа занимает объем 22,4 л

2) Составляем и решаем пропорцию:

$$\frac{0,180}{x} = \frac{0,126}{22,4}; \quad x = \frac{0,180 \cdot 22,4}{0,126} = 32,0 \text{ г}$$

Следовательно, молярная масса газа равна 32,0 г/моль, а молекулярная масса 32,0 (а.е.м.).

Молярную и молекулярную массу газа или легколетучего соединения можно вычислить по уравнению Клайперона – Менделеева, если свойства этого газа не очень сильно отличаются от свойств идеального газа.

**Пример .** Вычислите молярную массу ацетона, если масса 0,5 л его паров при 87 °С и давлении 96 кПа равна 0,93 г.

*Решение.* Из уравнения Клайперона – Менделеева выражаем и вычисляем М, подставляя массу паров в граммах (0,93 г), давление в паскалях (96000 Па), объем в м<sup>3</sup> (0,5 · 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>) и температуру в абсолютных градусах (360 К):

$$PV = \frac{m}{M} RT; \quad M = \frac{mRT}{PV} = \frac{0,93 \cdot 8,314 \cdot 360}{96000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 58 \text{ г/моль}$$

Для твердых и жидких веществ – неэлектролитов, растворяющихся без диссоциации молекул на ионы, молекулярная масса определяется по свойствам их растворов: по понижению температуры замерзания раствора (криоскопический метод), по повышению температуры кипения (эбуллиоскопический метод), по понижению давления пара над раствором (тоноскопический метод) и по осмотическому давлению (осмотический метод). Эти методы рассматриваются при изучении растворов.

## 15. Установление формул соединений

Формулы соединений показывают, какие элементы и в каком количестве входят в состав вещества. Различают формулы простейшие и истинные. Простейшая формула выражает соотношение атомов в формуле соединения наименьшими целыми числами, которые определяются по результатам анализа состава соединения.

**Пример .** Определите простейшую формулу соединения, в состав которого входят калий (31,90 %), хлор (28,93 %) и кислород (39,17 %).

*Решение.* 1) Обозначаем числа атомов калия, хлора и кислорода в соединении как x, y и z; тогда его формула имеет вид K<sub>x</sub>Cl<sub>y</sub>O<sub>z</sub>. Атомные массы элементов равны 39,098 (калий), 35,453 (хлор) и 15,999 (кислород). Принимаем массу соединения произвольно равной 100 г; тогда массы калия, хлора и кислорода, входящие в состав соединения, равны 31,90 г, 28,93 г и 39,17 г, соответственно.

2) Вычисляем количество каждого элемента в 100 г соединения:

$$x = \frac{31,90}{39,098} = 0,816 \text{ моль}; \quad y = \frac{28,93}{35,453} = 0,816 \text{ моль}; \quad z = \frac{39,17}{15,999} = 2,448 \text{ моль}$$

3) Выражая отношение количеств элементов в соединении целыми числами:

$$x : y : z = 0,816 : 0,816 : 2,448 = 1 : 1 : 3,$$

и получаем простейшую формулу соединения: KClO<sub>3</sub> (хлорат натрия).

Для неорганических соединений немoleкулярного строения простейшая формула является истинной. В случае молекулярных соединений, в особенности органических, истинная (молекулярная) формула может быть сложнее, чем простейшая: истинная формула содержит числа атомов, кратные их числам в простейшей формуле. В этом случае истинная формула соединения устанавливается по его молекулярной массе.

**Пример** . Газообразное соединение содержит 82,64 % углерода и 17,36 % водорода. Плотность его по водороду 29. Определите истинную формулу соединения.

*Решение.* 1) Записываем формулу соединения как  $C_xH_y$ . Принимаем массу соединения 100 г; тогда масса углерода составит 82,64 г, а масса водорода 17,36 г.

2) Вычисляем количества каждого элемента в соединении и выражаем их целыми числами:

$$x = \frac{82,64}{12} = 6,88 \text{ моль}; \quad y = \frac{17,36}{1} = 17,36 \text{ моль};$$

$$x : y = 6,88 : 17,36 = 2 : 5$$

Таким образом, простейшая формула соединения  $C_2H_5$ . Этой формуле соответствует молекулярная масса 29.

3) По условию задачи молекулярная масса  $M = 2 \cdot 29 = 58$ . Следовательно, истинная формула соединения  $C_4H_{10}$ .

### Тест для самоконтроля

(ответы находятся в приложении 2)

1. В каком из приведенных ниже случаев речь идет о водороде как об элементе?

- 1) Используется при получении металлов из руд
- 2) Имеет низкую температуру перехода в жидкое состояние
- 3) Получается при разложении воды электрическим током
- 4) Входит в состав воды

2. С учетом валентности цинка и кислорода (элементы постоянной валентности), определите валентность фосфора (элемент переменной валентности) в соединении  $Zn_3(PO_4)_2$ .

- 1) II
- 2) III
- 3) IV
- 4) V

3. Какая масса серной кислоты соответствует 1,5 моль? Сколько молекул содержится в этом количестве вещества?

- 1) 196 г;  $1,2 \cdot 10^{23}$
- 2) 49 г;  $3,01 \cdot 10^{23}$
- 3) 147 г;  $9,03 \cdot 10^{23}$
- 4) 98 г;  $6,02 \cdot 10^{23}$

4. Вычислите массовую долю железа в сульфате железа (II).

- 1) 36,8 %
- 2) 57,8 %
- 3) 21,0 %
- 4) 62,2 %

5. Плотность некоторого газа по воздуху равна 2. Чему равна масса 5,6 л (н.у.) этого газа?

- 1) 29 г
- 2) 14,5 г
- 3) 58 г
- 4) 7,25 г

6. Какой объем (при н.у.) занимают 7 г азота?

- 1) 0,56 л
- 2) 5,6 м<sup>3</sup>
- 3) 5,6 мл
- 4) 5,6 л

7. Определите формулу вещества, в котором массовая доля серы составляет 84 % и углерода 16 %, а плотность пара вещества по воздуху равна 2,62

- 1)  $C_3S_4$
- 2)  $C_2S$
- 3)  $CS_2$
- 4)  $C_2S_2$

8. Как относятся объемы, занимаемые при одной и той же температуре и давлении равными массами кислорода ( $O_2$ ) и озона ( $O_3$ )?

- 1)  $V(O_2) = V(O_3)$
- 2)  $1,5 \cdot V(O_2) = V(O_3)$
- 3)  $V(O_2) = 1,5 \cdot V(O_3)$

9. В каком соединении эквивалент марганца составляет  $\frac{1}{4}$  его атома?

- 1)  $MnSO_4$
- 2)  $Mn_2O_7$
- 3)  $MnO_2$
- 4)  $K_2MnO_4$

10. При взаимодействии 3,24 г трехвалентного металла с кислотой выделяется 4,03 л водорода, измеренного при н.у. Вычислите эквивалентную и атомную массы металла и по этим данным найдите металл в Периодической системе.

- 1) Al
- 2) Cr
- 3) Fe
- 4) Ti

### Задачи и упражнения для самостоятельного решения

(ответы находятся в приложении 2)

1. Определите: а) массу 5 моль серной кислоты; б) количество оксида углерода (IV) в 66,0 г этого вещества; в) объем, занимаемой 140 г азота при н.у.; г) сколько молекул содержится в 5,6 л водорода при н.у.

2. На окисление 10,8 г металла расходуется 6,72 л кислорода (объём измерен при н.у.) Определите эквивалентную массу металла.
3. Определите валентность золота в соединении, содержащем 64,9 % золота и 35,1 % хлора.
4. Удельная теплоемкость металла равна 0,454 Дж/(г·К). Массовая доля этого металла в его оксиде составляет 70,97 %. Определите валентность и атомную массу металла. Установите, какой это металл.
5. На взаимодействие 2,71 г хлорида трехвалентного металла затрачивается 2,00 г гидроксида натрия. Определите эквивалентную массу соли и её формулу.
6. Вещество состоит из 75 % алюминия и 25 % углерода. Определите его формулу.
7. Массовые доли магния, фосфора и кислорода в соли составляют 21,83 %, 27,85 % и 50,32 %, соответственно. Определите формулу соли.
8. Определите формулу кристаллогидрата хлорида бария, если известно, что при прокаливании 61 г этого вещества потеря массы составляет 9 г.
9. В двух соединениях содержится одинаковая массовая доля углерода (92,3 %) и водорода (7,7 %). Первое соединение – газ, причем, масса 1 л этого газа равна 1,17 г. Второе соединение – жидкость, которая легко переходит в пар, причем, плотность этого пара по воздуху равна 2,69. Определите формулы соединений.
10. При обработке 5 г сплава меди с алюминием раствором гидроксида калия выделилось 2,8 л водорода (н.у.). Определите массовые доли меди и алюминия в сплаве.

## Глава 2. КЛАССИФИКАЦИЯ И НОМЕНКЛАТУРА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Вещества, существующие в природе и получаемые химическим путём, подразделяются на простые и сложные. Простые вещества состоят из атомов одного элемента. Таких веществ сравнительно мало: кислород ( $O_2$ ), водород ( $H_2$ ), озон ( $O_3$ ), хлор ( $Cl_2$ ), азот ( $N_2$ ), железо (Fe), фосфор ( $P_4$ ), алмаз (C), графит (C) и другие. Сложные вещества состоят из атомов двух и более химических элементов, их называют химическими соединениями:  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $H_2SO_4$ , NaOH, NaCl,  $CaCO_3$  и т.д. Число химических соединений огромно.

По составу и свойствам соединения подразделяются на основные (или важнейшие) и не основные классы. К основным относятся оксиды, основания, кислоты и соли. Они, в свою очередь, подразделяются на группы, в которых соединения наиболее близки по свойствам. Необходимо по каждому классу и по каждой группе соединений знать состав, классификацию, номенклатуру (правила составления названий), отличительные свойства и способы получения. Необходимо усвоить и показывать на конкретных примерах взаимосвязь между классами веществ. Обязательным требованием является также умение решать задачи и упражнения по теме.

### 1. Оксиды

#### 1.1. Классификация оксидов

Оксидами называются сложные вещества, которые состоят из двух элементов, одним из которых является кислород в степени окисления  $-2$ .

По составу и кислотно-основным свойствам оксиды подразделяются на солеобразующие (основные, кислотные, амфотерные) и несолеобразующие.

*Основные* – это оксиды, которым соответствуют основания, например:  $Na_2O$  (соответствует основание NaOH), BaO (основание  $Ba(OH)_2$ ),  $La_2O_3$  (основание  $La(OH)_3$ ) и т.д.

*Кислотные* – это оксиды, которым соответствуют кислоты, например:  $SO_3$  (соответствует кислота  $H_2SO_4$ ),  $CO_2$  (кислота  $H_2CO_3$ ),  $SiO_2$  (кислота  $H_2SiO_3$ ),  $CrO_3$  (кислота  $H_2CrO_4$ ) и т.д.

*Амфотерные* – это оксиды, которым соответствуют амфотерные основания, например:  $ZnO$  (основание  $Zn(OH)_2$ ),  $Al_2O_3$  (основание  $Al(OH)_3$ ),  $SnO_2$  (основание  $Sn(OH)_4$ ) и т.д.

Из основных, кислотных и амфотерных оксидов можно получать соли (см. п. 1.3), поэтому их называют *солеобразующими*. Почти все оксиды – солеобразующие. Но имеется небольшая группа оксидов, которые солей не образуют, у них нет соответствующих кислот и оснований. Они называются *несолеобразующими* («безразличными»). К ним относятся оксиды CO, NO,  $N_2O$  и ещё некоторые мало известные и редко встречающиеся оксиды.

С учётом деления химических элементов на неметаллы и металлы можно сказать, что неметаллы образуют кислотные и безразличные оксиды. Что касается металлов, то принадлежность их оксидов к тому или иному классу определяется валентностью (степенью окисления) металла: чем она больше, тем сильнее выражены кислотные свойства. Так, например все оксиды одновалентных металлов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$  и др.) основные, кроме оксидов серебра  $\text{Ag}_2\text{O}$  и меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , которые обладают слабыми амфотерными свойствами. Часть оксидов двухвалентных металлов – основные ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{MnO}$  и др.), а часть – амфотерные ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{SnO}$ ,  $\text{PbO}$  и др.). Среди оксидов трёхвалентных металлов основные встречаются редко ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tl}_2\text{O}_3$ ), т.е. большинство их – амфотерные ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и др.). Оксиды четырёхвалентных металлов все амфотерные ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{PbO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$  и др.), а при валентности металла выше четырёх оксиды всех металлов являются кислотными ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_7$  и др.).

## 1.2. Номенклатура оксидов

Названия оксидов состоят из двух слов: первое слово «оксид» – производное от латинского названия кислорода (оксигениум), а второе – русское название элемента в родительном падеже. Если элемент образует несколько оксидов, то указывается его валентность (степень окисления) римской цифрой в скобках после названия элемента. Примеры:  $\text{Na}_2\text{O}$  – оксид натрия,  $\text{CaO}$  – оксид кальция,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – оксид алюминия,  $\text{FeO}$  – оксид железа (II),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – оксид железа (III),  $\text{N}_2\text{O}_5$  – оксид азота (V).

Если элемент имеет чётную валентность, то в названии его оксида число атомов кислорода может быть указано греческими названиями чисел 1 (моно), 2 (ди), 3 (три) и 4 (тетра), которые вводятся в виде префикса к слову «оксид»; при этом валентность не указывается. Примеры:  $\text{CO}$  – монооксид углерода,  $\text{CO}_2$  – диоксид углерода,  $\text{SO}_3$  – триоксид серы,  $\text{RuO}_4$  – тетраоксид рутения.

Кислотные оксиды часто называются ангидридами соответствующих кислот:  $\text{SO}_3$  – серный ангидрид,  $\text{SO}_2$  – сернистый ангидрид,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – фосфорный ангидрид,  $\text{N}_2\text{O}_3$  – азотистый ангидрид,  $\text{N}_2\text{O}_5$  – азотный ангидрид. Слово «ангидрид» переводится как «безводный», следовательно, подобное название оксида  $\text{SO}_3$  дословно означает «безводная серная кислота»,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – «безводная фосфорная кислота» и т.д.

## 1.3. Свойства оксидов

Физические свойства оксидов разнообразны. Одни из них являются газообразными веществами ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ), другие – жидкости ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_7$ ), третьи – твёрдые ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Химические свойства оксидов определяются их взаимодействием с водой, кислотами и щелочами.

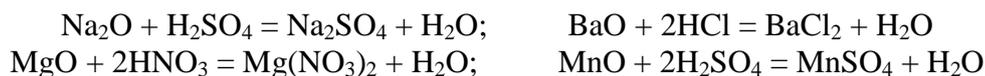
1. Основные оксиды наиболее активных металлов (щелочных и щелочноземельных) взаимодействуют с водой с образованием сильных оснований – щелочей:



Основные оксиды других, менее активных металлов с водой при обычных условиях не взаимодействуют. Поэтому соответствующие им основания получают другими способами; принято говорить, что их получают косвенным путём.

**Примечание.** Самый распространённый косвенный метод получения оснований тех металлов, которые не относятся к щелочным и щелочноземельным – их осаждение (они практически не растворимы в воде) из растворов солей щелочами или раствором аммиака (см. п. 2.4).

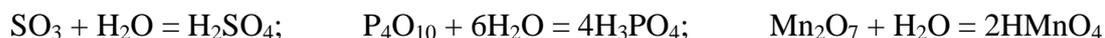
2. Все основные оксиды взаимодействуют с кислотами с образованием соли и воды:



Но с основаниями основные оксиды не взаимодействуют ни при каких условиях – эти реакции принципиально невозможны:



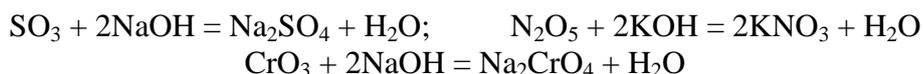
3. Многие кислотные оксиды взаимодействуют с водой с образованием кислот:



Некоторые кислотные оксиды с водой при обычных условиях не взаимодействуют, поэтому соответствующие им кислоты получают косвенным путём.

**Примечание.** Самый распространённый косвенный метод получения кислот – взаимодействие их солей с другими кислотами (см. п. 3.4).

4. Все кислотные оксиды взаимодействуют со щелочами с образованием солей и воды:



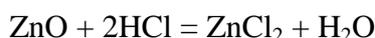
Но с кислотами кислотные оксиды не взаимодействуют ни при каких условиях:



5. Основные и кислотные оксиды взаимодействуют между собой с образованием солей:



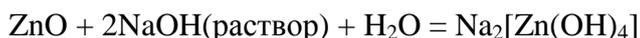
6. Амфотерные оксиды обладают свойствами как основных, так и кислотных оксидов, т.е. они взаимодействуют и с кислотами, и со щелочами. В обоих случаях образуется соль и вода. Например, амфотерный оксид цинка взаимодействует с азотной кислотой согласно уравнению:



Но он взаимодействует и со щелочами. При взаимодействии с расплавленными щелочами образуется соль несуществующей цинковой кислоты. Её гипотетическая формула  $\text{H}_2\text{ZnO}_2$  (это формула гидроксида цинка  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , записанная в виде кислоты), поэтому уравнение реакции таково:



Но при взаимодействии с раствором щёлочи в реакции участвует вода и образуется комплексное соединение, которое также является солью;



Также взаимодействует с кислотами и щелочами амфотерный оксид бериллия.

При взаимодействии с кислотами и щелочами амфотерных оксидов алюминия, хрома (III), олова (II), олова (IV) и др. уравнения реакций принципиально такие же, но в формулах комплексных соединений, образующихся при их взаимодействии с растворами щелочей, число присоединённых OH-групп (координационное число) равно шести

Амфотерные оксиды взаимодействуют как с кислотными, так и с основными оксидами (обычно эти реакции идут при нагревании) с образованием солей:



#### 1.4. Получение оксидов

Для получения оксидов используют различные способы.

1. Взаимодействие простых веществ с кислородом:



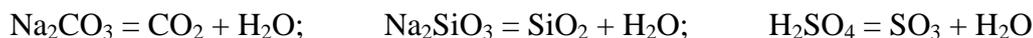
2. Взаимодействие сложных веществ с кислородом:



3. Разложение при нагревании оснований; при этом образуется основной или амфотерный оксид и вода:



4. Разложение кислот. Некоторые кислоты, например угольная  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , разлагаются при обычной температуре, а другие – при нагревании. При этом образуется кислотный оксид и вода:



5. Разложение при нагревании солей; при этом образуются два оксида – основной или амфотерный и кислотный:



6. Действие водоотнимающих веществ (фосфорный ангидрид, концентрированная серная кислота) на кислоты:



Некоторые оксиды являются природными соединениями (минералами):  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – гематит,  $\text{MnO}_2$  – пиролюзит,  $\text{TiO}_2$  – рутил,  $\text{SnO}_2$  – касситерит и др.

### 1.5. Закономерности изменения свойств оксидов

Свойства солеобразующих оксидов закономерно изменяются в соответствии с расположением элементов в Периодической системе и изменением валентности элемента.

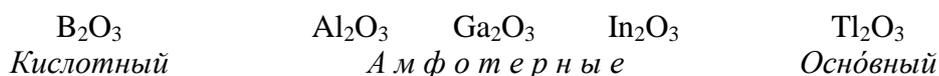
В периодах основные свойства оксидов ослабевают, а кислотные – усиливаются.

Например, для элементов третьего периода (натрий, магний, алюминий, кремний, фосфор, сера, хлор) свойства оксидов изменяются так:



В главных подгруппах Периодической системы у оксидов ослабевают кислотные свойства, а основные – усиливаются.

Например, у элементов главной подгруппы третьей группы (бор, алюминий, галлий, индий, таллий) свойства оксидов изменяются так:



Металлы переменной валентности образуют по несколько оксидов. У таких оксидов с увеличением валентности (степени окисления) металла основные свойства оксидов ослабевают, а кислотные – усиливаются. Наглядным примером проявления этой закономерности являются оксиды марганца:



### 1.6. Двойные оксиды

Металлы переменной валентности образуют по несколько оксидов. С увеличением валентности металла уменьшаются основные и увеличиваются кислотные свойства их оксидов. Вследствие этого оксиды одного и того же металла могут взаимодействовать между собой (обычно это происходит при нагревании) с образованием двойных оксидов, например:



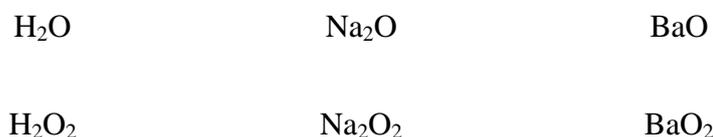
Примечание. Двойные оксиды можно рассматривать как соли, в которых содержатся атомы одного и того же металла, но с разной валентностью. Например, двойной оксид  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  является солью  $\text{Pb}_2\text{PbO}_4$ , в которой первые два атома свинца двухвалентны, а третий – четырёхвалентен. Название этой соли – плюмбат свинца (IV).

### 1.7. Пероксиды

От оксидов следует отличать пероксиды, например:

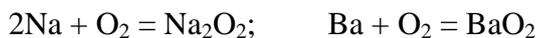


В оксидах и в пероксидах электронная валентность кислорода и число образуемых этим элементом химических связей – одинаковые (II), но стехиометрическая валентность кислорода различная: в оксидах она равна I, а в пероксидах – II. Соответственно степень окисления кислорода в оксидах равна –2, а в пероксидах –1. Это различие объясняется тем, что в молекулах пероксидов имеется химическая связь между атомами кислорода. Отличие пероксидов от оксидов хорошо видно на структурных формулах

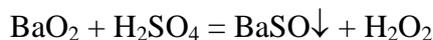


Число пероксидов ограничено: это пероксид водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) и пероксиды щелочных и щелочноземельных металлов:  $\text{K}_2\text{O}_2$ ,  $\text{CaO}_2$  и т.д. Другие элементы пероксидов не образуют.

Пероксиды металлов образуются при взаимодействии щелочных и щелочноземельных металлов с избытком кислорода:



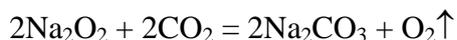
Пероксид водорода получают при взаимодействии пероксидов металлов с кислотами:



Пероксиды щелочных и щелочноземельных металлов, подобно соответствующим оксидам, взаимодействуют с водой, но при этом образуется не только щёлочь, но и кислород:



Пероксиды взаимодействуют с кислотными оксидами, при этом образуется соль и кислород. Например, пероксид натрия взаимодействует с углекислым газом по уравнению:



На этой реакции основано применение пероксида натрия для регенерации кислорода на космических станциях и подводных лодках.

Пероксиды металлов – твёрдые, а пероксид водорода – жидкое вещество, хорошо растворяющееся в воде. Пероксид водорода – сильный окислитель, на чём основано его применение в ракетных двигателях, для отбеливания тканей и в медицине (дезинфицирующее средство).

## 2. Основания

### 2.1 Классификация оснований

Основаниями называются сложные вещества, в состав которых входят атомы металлов, соединённые с одной или несколькими гидроксогруппами:  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  и т.д. Но это определение исключает из класса оснований гидроксид аммония  $\text{NH}_4\text{OH}$ , поэтому лучше пользоваться определением на основе теории электролитической диссоциации: основаниями называются электролиты, при диссоциации которых в качестве анионов образуются только гидроксид-ионы:



По растворимости к воде основания подразделяются на растворимые и нерастворимые.

К растворимым относятся основания щелочных металлов ( $\text{LiOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{RbOH}$ ,  $\text{CsOH}$ ,  $\text{FrOH}$ ), щелочноземельных ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Sr}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ra}(\text{OH})_2$ ) и гидроксид аммония  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Свойства этих оснований определяются концентрацией в их растворах гидроксид-ионов.

Гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов – сильные электролиты. Их диссоциация в водных растворах протекает практически необратимо, концентрация  $\text{OH}^-$ -ионов в растворах велика, поэтому растворы мыльные на ощупь, они разъедают кожу, изменяют окраску индикаторов: красного лакмуса – в синий цвет, бесцветного фенолфталеина – в малиновый и т.д. Гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов называются щелочами.

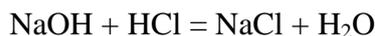
Гидроксид аммония – слабый электролит, его диссоциация обратима, поэтому концентрация  $\text{OH}^-$ -ионов в растворах этого основания невелика, но достаточна для изменения цвета индикаторов.

Остальные основания практически нерастворимы в воде, ионы  $\text{OH}^-$  в их растворах практически отсутствуют, поэтому цвет индикаторов в них не изменяется.

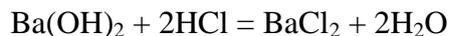
По взаимодействию с другими веществами основания подразделяются на типичные и амфотерные. Типичными являются те основания, которым соответствуют основные оксиды: это все щёлочи, а также  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{La}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Bi}(\text{OH})_3$  и др. Амфотерными являются те основания, которым соответствуют амфотерные оксиды. Это  $\text{Be}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Sn}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Sn}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Pb}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_4$  и др.

Необходимо иметь в виду ещё одну классификацию оснований – по числу гидроксогрупп в составе одной формульной единице. Основания с одним гидроксид-ионом называются одноосновными, с двумя – двухосновными, с тремя – трёхосновными и с четырьмя – четырёхосновными. Кислотность основания равна количеству одноосновной кислоты (см. п. 3), затрачиваемой на реакцию с одним моном данного основания.

На взаимодействие с одним молем однокислотного основания требуется один моль одноосновной кислоты:



Если основание двухкислотное, то требуется два моля кислоты:



А если в реакции участвует один моль трёх- или четырёхкислотного основания, то затрачивается три или четыре моля кислоты, соответственно:



## 2.2. Номенклатура оснований

Названия оснований состоят из слова «гидроксид» и названия металла в родительном падеже: KOH – гидроксид калия, Ba(OH)<sub>2</sub> – гидроксид бария, Al(OH)<sub>3</sub> – гидроксид алюминия т.д. Если металл образует несколько оснований, то указывается валентность (степень окисления) металла римской цифрой в скобках после названия: Fe(OH)<sub>2</sub> – гидроксид железа (II), Fe(OH)<sub>3</sub> – гидроксид железа (III), Sn(OH)<sub>2</sub> – гидроксид олова (II), Sn(OH)<sub>4</sub> – гидроксид олова (IV) и т.д.

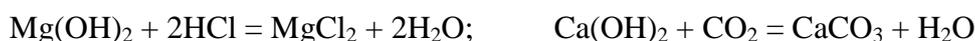
Основание NH<sub>4</sub>OH имеет название гидроксид аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – катион аммония).

**Примечание.** Молекул NH<sub>4</sub>OH в действительности не существует. При растворении аммиака образуется гидрат аммиака, который диссоциирует с образованием NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-катионов и OH<sup>-</sup>-анионов:

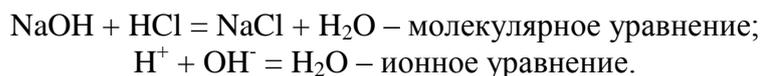


## 2.3. Свойства оснований

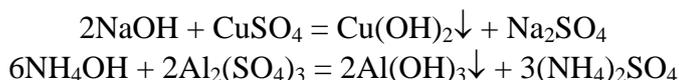
Типичные основания и гидроксид аммония взаимодействуют с кислотами и с кислотными оксидами с образованием солей и воды:



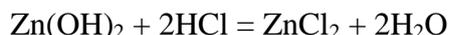
Взаимодействие щелочей с кислотами называется реакцией *нейтрализации*. В реакции нейтрализации H<sup>+</sup>-катионы кислот и OH<sup>-</sup>-анионы щелочей соединяются в молекулы воды, поэтому среда раствора с химической точки зрения становится нейтральной. Типичный пример реакции нейтрализации:



Щелочи и гидроксид аммония взаимодействуют с растворами солей с образованием нерастворимых оснований:



Амфотерные основания взаимодействуют как с кислотами, так и со щелочами. В реакциях с кислотами они проявляют свойства типичных оснований:



Но при взаимодействии со щелочами амфотерные основания проявляют свойства кислот. При сплавлении со щелочами образуются обычные соли и вода:



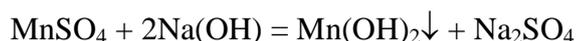
а при взаимодействии с растворами щелочей – комплексные соли:



## 2.4. Получение оснований

Существуют различные способы получения оснований.

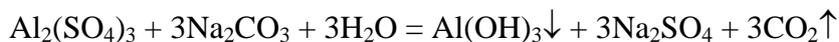
1. Нерастворимые неамфотерные основания получают действием щелочей на водные растворы солей:



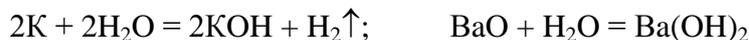
Но если получаемое этим способом основание является амфотерным, оно взаимодействует с избытком щёлочи. Поэтому при получении амфотерных оснований вместо щелочей используют раствор аммиака:



2. Нерастворимые основания получают также с помощью солей, которые в водных растворах дают щелочную среду вследствие гидролиза. Одной из таких солей является карбонат натрия:

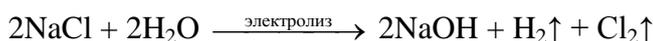


3. Щелочи получают взаимодействием соответствующих металлов или их оксидов с водой:



Самыми распространенными основаниями являются щелочи NaOH и Ca(OH)<sub>2</sub>.

Гидроксид натрия получают электролизом водного раствора хлорида натрия:



Гидроксид кальция получают взаимодействием с водой оксида кальция, получаемого разложением природного соединения – карбоната кальция:

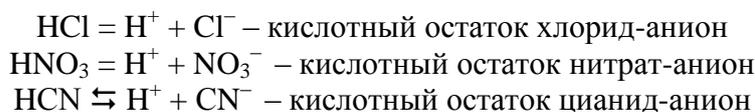


### 3. Кислоты

Кислотами называются вещества, при электролитической диссоциации которых в водных растворах в качестве катионов образуются только катионы водорода H<sup>+</sup> и никаких других катионов не образуется.

Анионы, образующиеся при диссоциации кислот, называются кислотными остатками.

Диссоциация многих кислот протекает необратимо; в этом случае в схеме диссоциации ставится знак равенства. Но ряд кислот диссоциирует обратимо; в этом случае в схеме диссоциации ставится знак обратимости



#### 3.1. Классификация кислот

Кислоты классифицируются по составу кислотного остатка (по содержанию в них кислорода), количеству катионов водорода в одном моле кислоты, по растворимости в воде и по силе.

По составу кислотного остатка кислоты подразделяются на бескислородные (HF, HCl, HBr, HI, H<sub>2</sub>S, HCN и т.д.) и кислородосодержащие (HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HClO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> и т.д.)

По количеству катионов водорода в одном моле кислоты подразделяются на одноосновные (HCl, HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>3</sub>), двухосновные (H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) и многоосновные (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>4</sub>SiO<sub>3</sub>, H<sub>6</sub>TeO<sub>6</sub>).

У большинства кислот их основность равна числу атомов водорода в молекуле. Но встречаются кислоты, в которых основность меньше числа атомов водорода. Например, в молекуле фосфорной кислоты H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> содержится три атома водорода и её основность её равна трём, т.к. при диссоциации из одной молекулы образуются три катиона водорода:



В молекуле фосфористой кислоты H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub> содержится также три атома водорода, но основность её равна двум, так как при диссоциации образуются не три, а только два катиона водорода:



Третий пример – фосфорноватистая кислота H<sub>3</sub>PO<sub>2</sub>, которая, несмотря на наличие трёх атомов водорода в её молекуле, является одноосновной. Её диссоциация в воде идёт с образованием только одного катиона водорода по схеме:



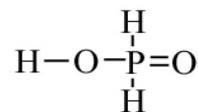
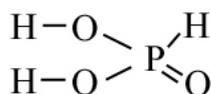
Различие основности этих кислот объясняется тем, что в молекуле H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> атомы водорода по своим химическим связям с другими атомами равноценны – каждый из них соединен с атомом кислорода. В молекулах H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub> и H<sub>3</sub>PO<sub>2</sub> атомы водорода по химическим связям с другими атомами не

равноценны: в первой из них два атома соединены с атомами кислорода, а один – с атомом фосфора, а во второй только один атом водорода соединяется с атомом кислорода, а два – с атомом фосфора. Это различие хорошо видно при сравнении структурных формул кислот.

$\text{H}_3\text{PO}_4$  – ортофосфорная

$\text{H}_3\text{PO}_3$  – фосфористая

$\text{H}_3\text{PO}_2$  – фосфорноватистая



При диссоциации молекул происходит разрыв полярных связей  $\text{H}-\text{O}$ , а практически неполярная связь  $\text{P}-\text{H}$  не разрывается. Поэтому  $\text{H}_3\text{PO}_4$  – трёхосновная кислота,  $\text{H}_3\text{PO}_3$  – двухосновная, а  $\text{H}_3\text{PO}_2$  – одноосновная.

Следует иметь в виду, что заряд кислотного остатка – аниона, образующегося при диссоциации кислоты, равен основности этой кислоты.

Многие свойства кислот определяются концентрацией катионов водорода в их растворах, которая зависит от полноты диссоциации молекул. Кислоты, диссоциирующие практически нацело, называются сильными, а кислоты, диссоциирующие обратимо, – слабыми. Наиболее распространённые сильные кислоты – это  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HClO}_4$ , а наиболее часто встречающиеся слабые кислоты – это  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HClO}$ ,  $\text{HCN}$  и органическая уксусная кислота  $\text{CH}_3\text{COOH}$ .

Принято считать, что все кислоты – растворимые в воде соединения. Действительно, растворимых кислот большинство, но встречаются и малорастворимые, например  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SnO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ .

### 3.2. Номенклатура кислот

Названия бескислородных кислот начинаются с названия неметалла с окончанием **-о** и прибавлением слова водородная:  $\text{HF}$  – фтороводородная,  $\text{HCl}$  – хлороводородная,  $\text{HBr}$  – бромоводородная,  $\text{H}_2\text{S}$  – сероводородная. Кислота  $\text{HCN}$  имеет название циановодородная.

Названия кислородосодержащих кислот производятся от русских названий кислотообразующих элементов с различными суффиксами, которые необходимо строго выдерживать.

Если элемент образует две кислоты, то используются суффиксы **-н** и **-ист**: первый – при максимальной валентности кислотообразующего элемента, а второй, если валентность не максимальная.

$\overset{+6}{\text{H}_2\text{SO}_4}$  – серная кислота,  $\overset{+4}{\text{H}_2\text{SO}_3}$  – сернистая кислота

$\overset{+5}{\text{HNO}_3}$  – азотная кислота,  $\overset{+3}{\text{HNO}_2}$  – азотистая кислота

В названиях некоторых кислот суффикс **-н** заменяется суффиксами **-ов** и **-ев**:  $\text{H}_2\text{CrO}_4$  – хромовая кислота,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  – кремниевая кислота.

Галогены хлор, бром и йод, кроме бескислородных, образуют по четыре кислородосодержащих кислоты при валентности VII, V, III и I. В названиях этих кислот используются, по мере понижения валентности, суффиксы **-н**, **-оват**, **-ист** и **-оватист**:  $\text{HClO}_4$  – хлорная,  $\text{HClO}_3$  – хлорноватая,  $\text{HClO}_2$  – хлористая,  $\text{HClO}$  – хлорноватистая.

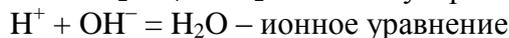
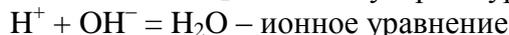
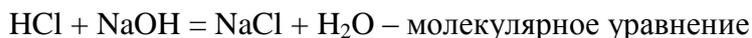
Существуют кислоты, образованные одним и тем же элементом в одной и той же степени окисления, но состав их различен. В этом случае к названию кислоты с наименьшим содержанием атомов водорода и кислорода добавляется префикс (приставка) **мета-**, с наибольшим **орто-**, а при промежуточном содержании атомов водорода и кислорода (в расчёте на один атом кислотообразующего элемента) – **пиро-**:  $\text{HPO}_3$  – метафосфорная кислота,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  – ортофосфорная кислота,  $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$  – пиропосфорная кислота.

В справочнике, которым пользуются студенты при изучении химии (Стась Н.Ф. Справочник по общей и неорганической химии) приведены формулы и названия 38 наиболее распространённых кислот а также их солей.

### 3.3. Свойства кислот

В безводном состоянии кислоты представляют собой жидкие ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), газообразные ( $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) и твёрдые ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SnO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) вещества. Большинство из них хорошо растворяются в воде, растворы имеют кислый вкус, разъедают кожу, изменяют цвет индикаторов.

Сильные кислоты взаимодействуют со щелочами с образованием соли и воды. Эти реакции называются реакциями нейтрализации, т.к. кислая среда кислоты и щелочная среда щёлочи превращаются в нейтральную среду воды. Ионное уравнение реакции нейтрализации одинаково, независимо от вида кислоты и щёлочи



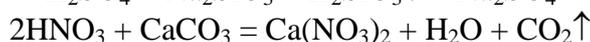
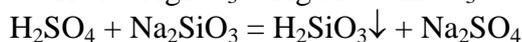
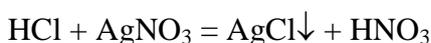
Кислоты взаимодействуют и с другими основаниями (как с типичными, так и с амфотерными) с образованием соли и воды:



Кислоты взаимодействуют с основными и амфотерными оксидами с образованием соли и воды:



Возможно взаимодействие кислот с солями, если при этом образуются малорастворимые или газообразные вещества:



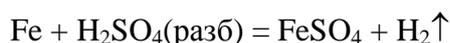
Кислоты взаимодействуют с металлами (окисляют их).

### 3.3.1. Взаимодействие кислот с металлами

При взаимодействии *соляной и разбавленной серной кислоты* с металлами окислителем является ион водорода  $\text{H}^+$ . Поэтому они взаимодействуют с металлами, стоящими в ряду напряжений до водорода. При этом образуется соль и выделяется водород:

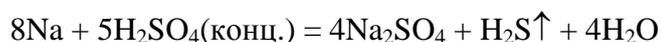


Металлы переменной валентности, проявляющие переменную степень окисления, соляной и разбавленной серной кислотами окисляются, как правило, до низших степеней окисления, например:

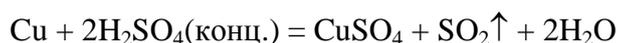


Свинец практически не взаимодействует с соляной и разбавленной серной кислотами, так как на его поверхности образуется плотная нерастворимая пленка хлорида или сульфата свинца (II).

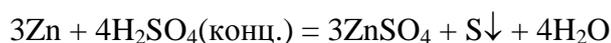
В *концентрированной серной кислоте* окислителем являются сульфат-ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ , в которых сера находится в степени окисления +6. Окисляя металл, серная кислота восстанавливается до сероводорода, серы и оксида серы (IV). При взаимодействии концентрированной серной кислоты с активными металлами образуются соль, вода и преимущественно сероводород:



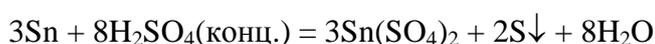
Малоактивные металлы восстанавливают концентрированную серную кислоту преимущественно до  $\text{SO}_2$ , например:



а металлы средней активности – преимущественно до серы:



Металлы переменной валентности концентрированной  $\text{H}_2\text{SO}_4$  окисляются, как правило, до высшей степени окисления, например:



Благородные металлы с концентрированной серной кислотой не взаимодействуют ни при каких условиях. Некоторые металлы (Al, Fe, Cr, Ni, Ti, V и др.) не взаимодействуют с концентрированной серной кислотой при обычных условиях (пассивируются), но взаимодействуют при нагревании.

Большое практическое значение имеет пассивация железа: концентрированную серную кислоту можно хранить в ёмкостях из обычной нелегированной стали.

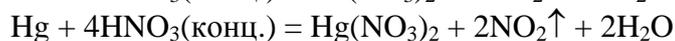
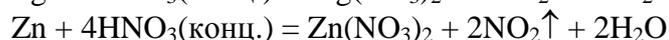
Свинец с концентрированной серной кислотой взаимодействует с образованием растворимой кислой соли (гидросоли), оксида серы (IV) и воды:



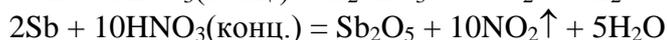
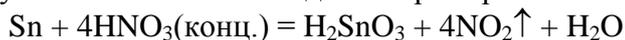
В азотной кислоте, независимо от её концентрации, окислителем являются нитрат-ионы  $\text{NO}_3^-$ , содержащие азот в степени окисления +5. Поэтому при взаимодействии металлов с азотной кислотой водород не выделяется. Азотная кислота окисляет все металлы за исключением самых неактивных (благородных). При этом образуются соль, вода и продукты восстановления азота (+5):  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ . Свободный аммиак не выделяется, так как он взаимодействует с азотной кислотой, образуя нитрат аммония:



При взаимодействии металлов с концентрированной азотной кислотой (30–60 %  $\text{HNO}_3$ ) продуктом восстановления  $\text{HNO}_3$  является преимущественно оксид азота (IV), независимо от природы металла, например:



Металлы переменной валентности при взаимодействии с концентрированной азотной кислотой окисляются до высшей степени окисления. При этом те металлы, которые окисляются до степени окисления +4 и выше, образуют кислоты или оксиды. Например:



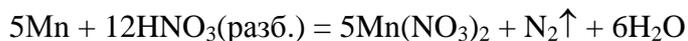
В концентрированной азотной кислоте пассивируются алюминий, хром, железо, никель, кобальт, титан и некоторые другие металлы. После обработки азотной кислотой эти металлы не взаимодействуют и с другими кислотами.

При взаимодействии металлов с разбавленной азотной кислотой продукт её восстановления зависит от восстановительных свойств металла: чем активнее металл, тем в большей степени восстанавливается азотная кислота.

Активные металлы восстанавливают разбавленную азотную кислоту максимально, т.е. образуются соль, вода и  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , например:



При взаимодействии с разбавленной азотной кислотой металлов средней активности образуются соль, вода и азот или  $\text{N}_2\text{O}$ , например:

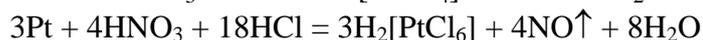


При взаимодействии разбавленной азотной кислоты с малоактивными металлами образуются соль, вода и оксид азота (II), например:

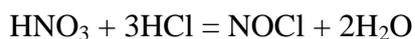


Но уравнения реакций в данных примерах условны, так как в действительности получается смесь соединений азота, причем, чем выше активность металла и ниже концентрация кислоты, тем ниже степень окисления азота в том продукте, которого образуется больше других.

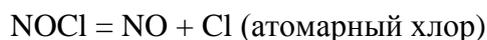
Царской водкой называется смесь концентрированных азотной и соляной кислот. Она применяется для окисления и перевода в растворимое состояние золота, платины и других благородных металлов. Соляная кислота в царской водке затрачивается на образование комплексного соединения окисленного металла. Уравнения реакций золота и платины с царской водкой записываются так:



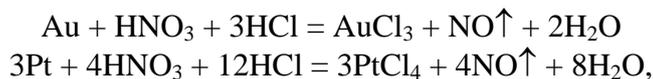
В некоторых учебных пособиях встречается другое объяснение взаимодействия благородных металлов с царской водкой. Считают, что в этой смеси между  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HCl}$  происходит катализируемая благородными металлами реакция, в которой азотная кислота окисляет соляную по уравнению:



Хлорид нитрозила  $\text{NOCl}$  непрочен и разлагается по уравнению:



Окислителем металла является атомарный (т.е. очень активный) хлор в момент выделения. Поэтому продуктами взаимодействия царской водки с металлами являются соль (хлорид), вода и оксид азота (II):



а комплексные соединения образуются при последующих реакциях как вторичные продукты:

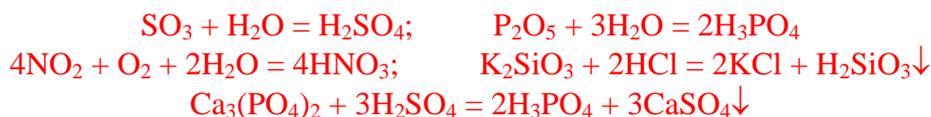


### 3.4. Получение кислот

Бескислородные кислоты получают из простых веществ или из солей этих кислот:



а кислородосодержащие – из кислотных оксидов или солей этих кислот:



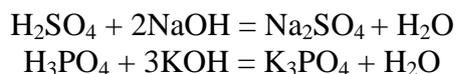
## 4. Соли

### 4.1. Состав и классификация солей

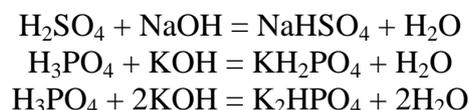
Солями называются соединения, состоящие из катионов металлов (или аммония) и анионов – кислотных остатков:  $\text{KCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и т.д.

Соли можно рассматривать как продукты взаимодействия кислот с основаниями (хотя способ получения может быть другим – см. п.4.4), при этом могут получаться нормальные, кислые и основные соли.

Нормальные соли образуются в том случае, когда количество кислоты и основания достаточно для полного взаимодействия:

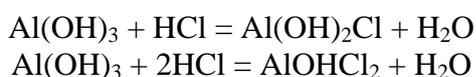


Кислые соли образуются при недостатке основания, когда катионов металла в составе основания недостаточно для замещения всех катионов водорода в молекуле кислоты:



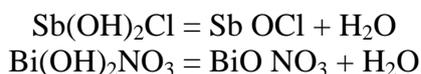
В кислых солях в составе кислотных остатков содержится водород. Кислые соли возможны для многоосновных кислот и невозможны для одноосновных.

Основные соли образуются при избытке основания, когда анионов кислотных остатков недостаточно для полного замещения всех гидроксогрупп в основании:



В основных солях содержатся гидроксогруппы. Основные соли возможны для металлов с валентностью II и выше и невозможны для одновалентных металлов.

Некоторые основные соли самопроизвольно разлагаются с выделением воды; при этом образуются оксосоли, например:



Оксосоли обладают всеми свойствами основных солей.

Многие соли в твёрдом состоянии являются кристаллогидратами, т.е. содержат в своём составе химически связанную воду, например:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и т.д.

Таким образом, по составу (и химическим свойствам, которые зависят от состава) соли подразделяются на пять типов: нормальные, кислые, основные, оксосоли и кристаллогидраты.

Существует также классификация солей по растворимости в воде и по типу гидролиза. Они рассматриваются в 4-й главе данного пособия.

## 4.2. Номенклатура солей

Названия солей связаны с названиями соответствующих кислот: соли хлороводородной кислоты называются хлоридами, серной – сульфатами, азотной – нитратами, азотистой – нитритами и т.д. Таким образом, если в названии кислот используются русские названия химических элементов, то в названиях солей – соответствующие латинские названия этих элементов. В справочнике, в таблице приведены названия нормальных солей 38 наиболее распространённых кислот.

Названия кислых солей имеют приставку **гидро-** (один атом водорода) или **дигидро-** (два атома водорода) к названию аниона:  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  – гидрофосфат калия,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – дигидрофосфат калия,  $\text{NaHCO}_3$  – гидрокарбонат натрия и т.д.

Названия основных солей имеют приставку **гидроксо-** или **дигидроксо-** к названию катиона металла:  $\text{Al(OH)(NO}_3)_2$  – нитрат гидроксоалюминия;  $\text{Cr(OH)}_2\text{Cl}$  – хлорид дигроксохрома (III) и т.д.

Названия оксосолей имеют приставку **оксо-** или **диоксо-** к названию катиона металла:  $\text{BiOCl}$  – хлорид оксовисмута (III),  $\text{TiOBr}_2$  – бромид оксотитана (IV),  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  – нитрат диоксоурана (VI).

Названия кристаллогидратов начинаются с указания количества (греческими названиями чисел) связанной воды:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – пентагидрат сульфата меди(II),  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  – декагидрат карбоната натрия и т.д.

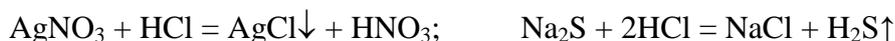
## 4.3. Свойства солей

Соли – твёрдые кристаллические вещества с ионными химическими связями между катионами и анионами. Химические свойства солей обусловлены их взаимодействием с металлами, кислотами, щелочами и солями.

Соли взаимодействуют с металлами: более активный металл вытесняет менее активные из растворов их солей:



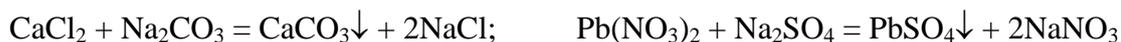
Соли взаимодействуют с кислотами:



Соли взаимодействуют со щелочами:



Соли взаимодействуют между собой:



Все эти реакции протекают в растворах потому, что один из образующихся продуктов нерастворим, улетучивается в виде газа или представляет собой слабый электролит.

Многие соли разлагаются при нагревании с образованием двух оксидов – основного и кислотного:



а соли аммония с образованием аммиака и хлороводорода:



Важнейшим химическим свойством солей является их гидролиз. Он рассматривается в главе 4.

#### 4.4. Получение солей

Способы получения солей многочисленны и уже встречались при описании свойств оксидов, оснований и кислот. Тем не менее, рассмотрим их снова с примерами.

Соли образуются при взаимодействии.

1. Металлов с неметаллами:  $2\text{Na} + \text{Cl}_2 = 2\text{NaCl}$ ;  $\text{Zn} + \text{S} = \text{ZnS}$
2. Основных оксидов с кислотами:  $\text{CaO} + 2\text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
3. Кислотных оксидов со щелочами:  $\text{CO}_2 + \text{Ba}(\text{OH})_2 = \text{BaCO}_3\downarrow + \text{H}_2\text{O}$
4. Амфотерных оксидов с кислотами:  $\text{SnO} + 2\text{HCl} = \text{SnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
5. Амфотерных оксидов со щелочами:  $\text{SnO} + 2\text{KOH} = \text{K}_2\text{SnO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
6. Основных оксидов с кислотными:  $\text{BaO} + \text{CO}_2 = \text{BaCO}_3$
7. Амфотерных оксидов с кислотными оксидами:  $\text{ZnO} + \text{SO}_3 = \text{ZnSO}_4$
8. Амфотерных оксидов с основными оксидами:  $\text{ZnO} + \text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{ZnO}_2$
9. Кислот со щелочами (реакция нейтрализации):  $\text{HCl} + \text{NaOH} = \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$
10. Оснований с кислотами:  $2\text{Bi}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O}$
11. Амфотерных оснований со щелочами:  $\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{KOH} = \text{K}_3\text{CrO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$
12. Металлов с кислотами:  $\text{Zn} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2\uparrow$
13. Металлов с солями:  $\text{Zn} + \text{CuSO}_4 = \text{ZnSO}_4 + \text{Cu}\downarrow$
14. Щелочей с солями:  $2\text{NaOH} + \text{FeCl}_2 = \text{Fe}(\text{OH})_2\downarrow + 2\text{NaCl}$
15. Кислот с солями:  $2\text{HCl} + \text{K}_2\text{SiO}_3 = \text{H}_2\text{SiO}_3\downarrow + 2\text{KCl}$
16. Солей с солями:  $\text{AgNO}_3 + \text{KBr} = \text{AgBr}\downarrow + \text{KNO}_3$

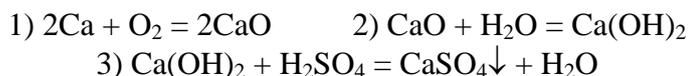
#### 5. Взаимосвязь между классами веществ

Между классами веществ существует возможность их взаимного превращения: из простых веществ получают оксиды, из оксидов – основания или кислоты, из кислот – соли. Возможен и обратный переход от солей к основаниям или кислотам, от оснований или кислот к оксидам, а от оксидов к простым веществам.

**Пример** . Напишите уравнения реакций для осуществления цепочки превращений:



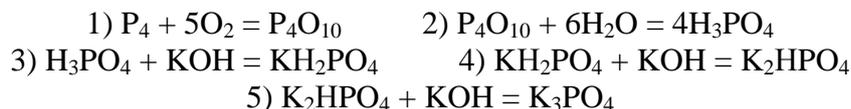
*Решение.*



**Пример** . Напишите уравнения реакций для осуществления цепочки превращений:



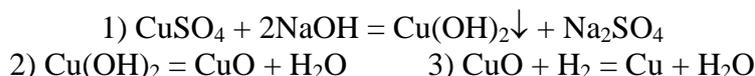
*Решение.*



**Пример** . Напишите уравнения реакций для осуществления цепочки превращений:

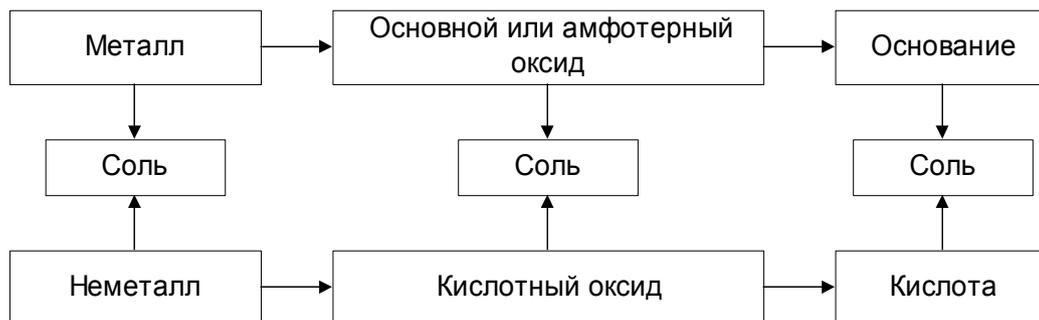


*Решение.*



Подобная связь классами соединений, позволяющая получать вещество одного класса из вещества другого класса, называется генетической. Но необходимо иметь в виду, что не всегда одно вещество из другого можно получить напрямую. Например, гидроксид меди  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  нельзя получить взаимодействием оксида меди (II) с водой. Тогда применяют косвенный путь: на оксид меди (II) действуют кислотой и получают соль, а из соли действием щелочи получают гидроксид меди.

Генетическую связь между основными классами неорганических соединений можно показать схематически:



## 6. Современный подход к классификации оснований и кислот

Химия, как и вся наука, быстро развивается. По мере её развития пересматриваются многие понятия. Пересматриваются взгляды и на классификацию неорганических соединений.

В настоящее время основания и кислоты рассматриваются как соединения одного класса – гидроксиды, т.е. продукты присоединения воды к оксидам (дословно: наводнённые оксиды). Все гидроксиды имеют в своём составе один или несколько атомов кислорода, которые одновременно связаны с атомами водорода и элемента. Общая формула простейших гидроксидов ЭОН.

Деление гидроксидов на основания и кислоты определяется их диссоциацией при растворении в воде. Характер диссоциации зависит от сравнительной прочности и полярности связей Э–О и О–Н и может протекать по двум типам:

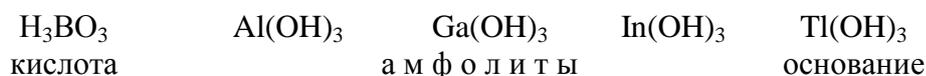
- 1)  $\text{ЭОН} = \text{Э}^+ + \text{ОН}^-$  – по типу оснований
- 2)  $\text{ЭОН} = \text{Н}^+ + \text{ЭО}^-$  – по типу кислот

Гидроксиды, в которых связь Э–О сильно полярна и имеет небольшую прочность, диссоциируют по первому типу – это типичные основания. Гидроксиды, в которых связь Э–О обладает небольшой полярностью, но большей, чем связь О–Н, прочностью, диссоциируют как кислоты. Но у многих гидроксидов обе связи мало отличаются по степени полярности и по прочности, поэтому они диссоциируют одновременно по обоим типам – это амфотерные основания или амфолиты.

Тип диссоциации гидроксида зависит от валентности (степени окисления) элемента. С увеличением валентности связь Э–О упрочняется, а связь О–Н ослабевает. Поэтому кислотные свойства гидроксидов усиливаются в периодах:



ослабевают в группах:



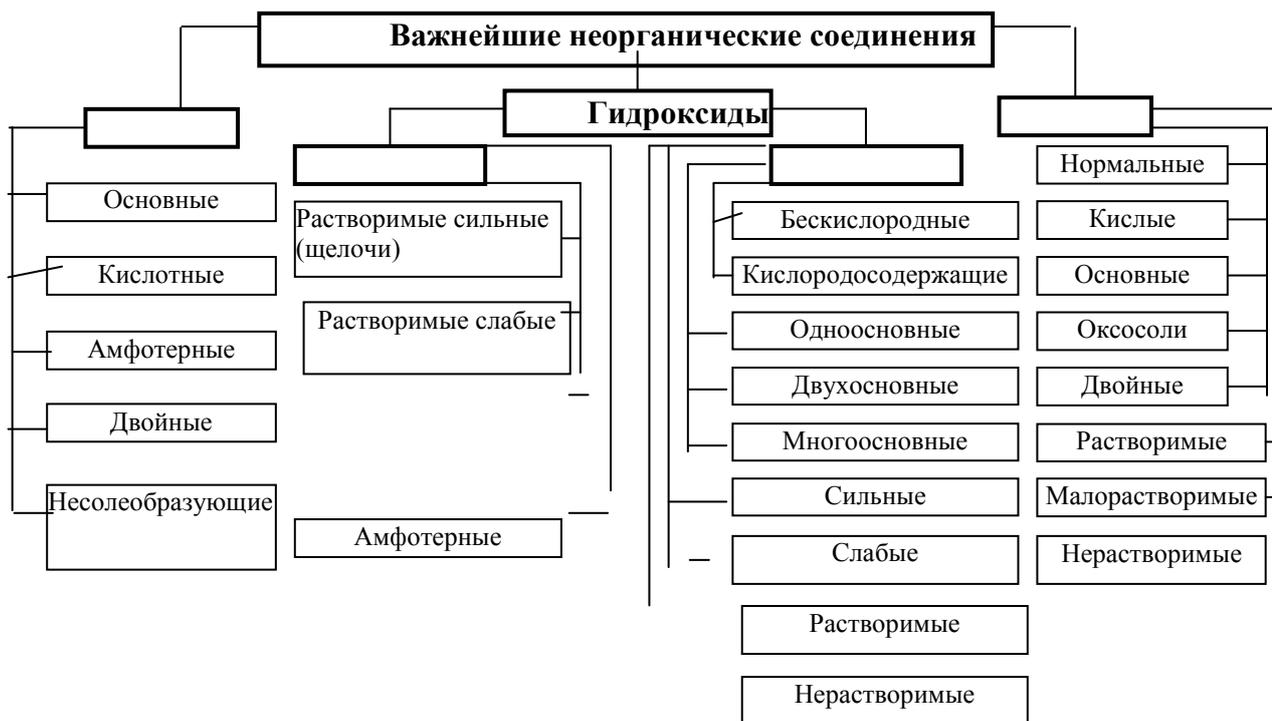
а у гидроксидов одного элемента усиливаются при увеличении его валентности:



С учетом современного подхода к гидроксидам классификацию неорганических соединений иллюстрирует схема:

## 7. Тривиальные названия неорганических соединений

На практике, в технической и учебной литературе применяются исторически сложившиеся названия (тривиальные), к которым все привыкли и от которых пока нет смысла отказываться, например: углекислый газ (CO<sub>2</sub>), бертолетова соль (KClO<sub>3</sub>), поваренная соль (NaCl) и т.д. В справочнике приведены наиболее часто встречающиеся тривиальные **названия неорганических** веществ.



### 8. Тест для самоконтроля

Из приведённых после каждого вопроса ответов необходимо найти только один правильный ответ. Составленную таблицу ответов можно сверить с ответами в приложении 2.

1. Какое название соответствует соли  $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ ?
  - 1) гидрокарбонат меди (II)
  - 2) карбонат гидроксомеди (II)
  - 3) карбонат дигидроксомеди (II)
  - 4)
2. Какое вещество имеет название гидрофосфат кальция?
  - 1)  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
  - 2)  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
  - 3)  $(\text{CaOH})_3\text{PO}_4$
  - 4)  $\text{CaHPO}_4$
3. Какая из кислот может образовывать кислые соли?
  - 1)  $\text{HCl}$
  - 2)  $\text{HNO}_3$
  - 3)  $\text{H}_2\text{S}$
  - 4)  $\text{HClO}_4$
4. Какое из оснований может образовывать основные соли?
  - 1)  $\text{NaOH}$
  - 2)  $\text{KOH}$
  - 3)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
  - 4)  $\text{CuOH}$
5. В каком списке содержатся только кислотные оксиды?
  - 1)  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{SO}_2$
  - 2)  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}_2$
  - 3)  $\text{CO}_2$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{SiO}_2$
6. Какое основание обладает амфотерными свойствами?
  - 1)  $\text{La}(\text{OH})_3$
  - 2)  $\text{Mg}(\text{OH})_2$
  - 3)  $\text{Al}(\text{OH})_3$
  - 4)  $\text{LiOH}$
7. Какое основание относится к щелочам?
  - 1)  $\text{Al}(\text{OH})_3$
  - 2)  $\text{Mg}(\text{OH})_2$
  - 3)  $\text{Zn}(\text{OH})_2$
  - 4)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
8. С каким веществом будет реагировать гидроксид натрия?
  - 1)  $\text{CaO}$
  - 2)  $\text{Na}_2\text{O}$
  - 3)  $\text{CO}_2$
  - 4)  $\text{CaCO}_3$
9. Какое взаимодействие является реакцией нейтрализации?
  - 1)  $\text{BaCl}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$
  - 2)  $\text{Na} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$
  - 3)  $\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow$
  - 4)  $\text{KOH} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$
10. В какой паре вещества могут химически взаимодействовать между собой?
  - 1)  $\text{SO}_3$  и  $\text{HNO}_3$
  - 2)  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_2$
  - 3)  $\text{CaO}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$
  - 4)  $\text{CaO}$  и  $\text{BaO}$

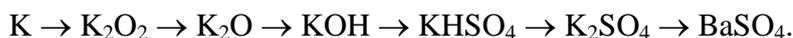
## 9. Упражнения для самостоятельной работы

Для закрепления знаний по данной теме рекомендуется самостоятельно выполнить пять упражнений. Выполненные решения можно сверить с **приложением IV**.

1. Распределите по классам и напишите названия соединений:  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ .

2. Какие из 10 оксидов непосредственно взаимодействуют с водой:  $\text{BaO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ? Напишите уравнения реакций.

3. Напишите уравнения реакций для цепочки превращений:



4. Напишите уравнения реакций для цепочки превращений: железо  $\rightarrow$  нитрат железа (III)  $\rightarrow$  гидроксид железа (III)  $\rightarrow$  оксид железа (III)  $\rightarrow$  железо  $\rightarrow$  сульфат железа (II)  $\rightarrow$  гидроксид железа (II)  $\rightarrow$  гидроксид железа(III)  $\rightarrow$  феррит калия.

5. Концентрированная серная кислота, твёрдый гидроксид натрия и фосфорный ангидрид применяются для осушки газов. Какие из них можно, а какой нельзя использовать для осушки углекислого газа?

### Глава 3. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периодическая система элементов Д.И. Менделеева – это естественная систематизация и классификация химических элементов, разработанная выдающимся русским химиком Д.И. Менделеевым на основе открытого им периодического закона. Периодическая система является графическим отображением периодического закона, его наглядным выражением.

Периодический закон был открыт Д.И. Менделеевым (1869) в результате анализа и сопоставления химических и физических свойств 63-х известных в то время элементов. Его первоначальная формулировка: **свойства элементов и образованных ими простых и сложных веществ находятся в периодической зависимости от атомной массы элементов.**

Разрабатывая Периодическую систему, Д.И. Менделеев уточнил или исправил валентность и атомные массы некоторых известных, но плохо изученных элементов, предсказал существование девяти еще не открытых элементов, а для трёх из них (галлий, германий, скандий) описал ожидаемые свойства. С открытием этих элементов (1875 – 1886) периодический закон и Периодическая система получили всеобщее признание и легли в основу всего последующего развития химии.

На протяжении почти 50 лет после открытия периодического закона и создания Периодической системы сама причина периодичности свойств элементов была неизвестна. Было неясно, почему элементы одной группы имеют одинаковую валентность и образуют соединения с кислородом и водородом одинакового состава, почему число элементов в периодах не одинаковое, почему в некоторых местах периодической системы расположение элементов не соответствует возрастанию атомной массы ( $\text{Ar} - \text{K}$ ,  $\text{Co} - \text{Ni}$ ,  $\text{Te} - \text{I}$ ). Ответы на все эти вопросы были получены при изучении строения атомов. В 1914 г. были определены заряды атомных ядер (Г. Мозли) и было установлено, что **свойства элементов находятся в периодической зависимости не от атомной массы элементов, а от положительного заряда ядер их атомов.** Но после изменения формулировки периодического закона форма периодической системы принципиально не изменилась, так как атомные массы элементов увеличиваются в той же последовательности, что и заряды их атомов. В этом пособии мы не касаемся закономерностей строения атомов, поэтому закономерности изменения свойств атомов, элементов и соединений приводятся без теоретического обоснования

#### 1. Основные формы Периодической системы

Существует около 500 вариантов Периодической системы, но наиболее распространены две: 18-клеточная 8-клеточная

В 18-клеточной форме системе элементы размещены согласно строению электронных оболочек их атомов, но часть элементов (f-элементы) вынесены из таблицы и приведены внизу в виде приложения, а их место в системе обозначено звездочками. Эта форма Периодической системы **приведена в справочнике на рис**

В 8-клеточной форме большие периоды (4-й, 5-й, 6-й и 7-й), содержащие по 18 элементов, разделены в соотношении 10 : 8, и вторая часть размещена под первой. Таким образом, большие периоды состоят из двух рядов (строк) каждый. В этом варианте в Периодической системе имеется восемь групп, и каждая из них состоит из главной и побочной подгрупп. Главные подгруппы содержат по 5–6 элементов, а побочные – по 3–4 элемента, кроме восьмой группы, в которой побочная подгруппа состоит из девяти элементов – трех «триад». Эта форма Периодической системы **приведена в справочнике на рис**. Она компактна и потому более удобна для пользования, однако в ней нет того однозначного соответствия между формой и электронным строением атомов, которое присуще 18-клеточной форме.

## 2. Периодические свойства элементов

С периодическим законом лучше всего согласуются свойства и характеристики атомов: атомные и ионные радиусы, энергия ионизации, сродство к электрону, электроотрицательность и валентность элементов. Но с периодическим законом согласуются также многие свойства простых веществ и химических соединений.

### 2.1. Атомные и ионные радиусы химических элементов

Радиусы атомов и ионов в периодах уменьшаются, т.к. электронная оболочка атома или иона каждого последующего элемента в периоде по сравнению с предшествующим уплотняется из-за увеличения заряда ядра и увеличения притяжения электронов к ядру.

Радиусы в группах увеличиваются, т.к. атом (ион) каждого элемента отличается от вышестоящего появлением нового электронного слоя.

Изменение атомных радиусов показано на рис. 4а, из которого видно, что зависимость имеет характерный для периодического закона «пилообразный» вид. Но в периодах уменьшение размеров атомов и ионов происходит не монотонно: у отдельных элементов наблюдаются небольшие «всплески» и «провалы». Они объясняются особенностями строения электронных оболочек атомов и изучаются в университетском курсе химии.

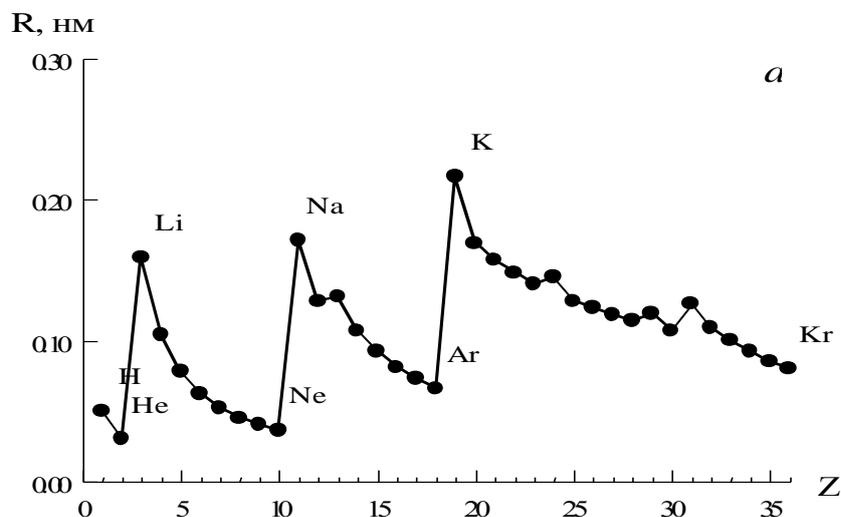


Рис. 1. Зависимость радиуса от атомного номера элементов первого – четвертого периодов.

Простые положительно заряженные ионы (катионы) возникают при отрыве электронов от атомов, а простые отрицательно заряженные (анионы) – при их присоединении. В табл. 1 приведены радиусы атомов и ионов щелочных элементов и галогенов,

Таблица 1. Радиусы некоторых атомов и ионов

Атом	$r$ , нм	Катион	$r$ , нм	Атом	$r$ , нм	Катион	$r$ , нм
Li	0,157	$\text{Li}^+$	0,019	F	0,039	$\text{F}^-$	0,040
Na	0,180	$\text{Na}^+$	0,028	Cl	0,073	$\text{Cl}^-$	0,074
K	0,216	$\text{K}^+$	0,059	Br	0,087	$\text{Br}^-$	0,089
Rb	0,229	$\text{Rb}^+$	0,073	I	0,107	$\text{I}^-$	0,109

Из таблицы следует, что превращение атомов в катионы сопровождается резким уменьшением радиуса, тогда как превращение в анионы почти не изменяет орбитального радиуса. Объясняется это тем, что образование анионов не связано с образованием новых электронных слоев и оболочек, а образование катионов сопровождается исчезновением (как правило) всего внешнего энергетического уровня.

## 2.2. Энергия и потенциал ионизации атомов

Энергия, затрачиваемая на отрыв электрона от атома и превращение атома в положительно заряженный ион, называется *энергией ионизации* ( $E_{\text{ион}}$ ). Экспериментально ионизацию атомов проводят в электрическом поле, измеряя разность потенциалов, при которой происходит ионизация. Эта разность потенциалов называется *ионизационным потенциалом* (J). Единицей измерения ионизационного потенциала является эВ/атом, а энергии ионизации – кДж/моль; переход от одной величины к другой осуществляется по соотношению:  $E_{\text{ион}} = 96,5 \cdot J$

Отрыв от атома первого электрона характеризуется первым ионизационным потенциалом ( $J_1$ ), второго – вторым ( $J_2$ ) и т.д. Последовательные потенциалы ионизации возрастают (табл. 2), т.к. каждый следующий электрон необходимо отрывать от иона с возрастающим на единицу положительным зарядом. Из табл. 2 видно, что у лития резкое увеличение ионизационного потенциала наблюдается для  $J_2$ , у бериллия – для  $J_3$ , у бора – для  $J_4$  и т.д. Резкое увеличение J происходит тогда, когда заканчивается отрыв внешних электронов и следующий электрон находится на предвнешнем энергетическом уровне.

Таблица 2. Потенциалы ионизации атомов (эВ/атом) элементов второго периода

Элемент	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$
Литий	5,39	75,6	122,4	–	–	–	–	–
Бериллий	9,32	18,2	158,3	217,7	–	–	–	–
Бор	8,30	25,1	37,9	259,3	340,1	–	–	–
Углерод	11,26	24,4	47,9	64,5	392,0	489,8	–	–
Азот	14,53	29,6	47,5	77,4	97,9	551,9	666,8	–
Кислород	13,60	35,1	54,9	77,4	113,9	138,1	739,1	871,1
Фтор	17,40	35,0	62,7	87,2	114,2	157,1	185,1	953,6
Неон	21,60	41,1	63,0	97,0	126,3	157,9		

Ионизационный потенциал может служить показателем «металличности» элемента: чем он меньше, тем легче отрывается электрон от атома и тем сильнее должны быть выражены металлические свойства элемента. Для элементов, с которых начинаются периоды (литий, натрий, калий и др.), первый ионизационный потенциал равен 4–5 эВ/атом, и эти элементы являются типичными металлами. У других металлов значения  $J_1$  больше, но не более 10 эВ/атом, а у неметаллов обычно больше 10 эВ/атом: у азота 14,53 эВ/атом, кислорода 13,60 эВ/атом и т.д.

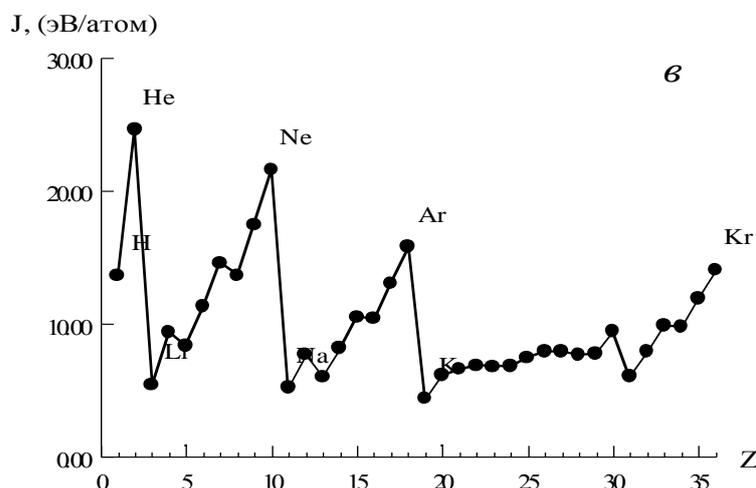


Рис. 2. Зависимость ионизационного потенциала от атомного номера элементов

Первые ионизационные потенциалы в периодах увеличиваются, а в группах уменьшаются (рис. 4в), что свидетельствует об увеличении неметаллических свойств в периодах и металлических в группах. Поэтому неметаллы находятся в правой верхней части, а металлы – в левой нижней части **Периодической системы**. **Граница между металлами и неметаллами показана на рис. 1 и 2.**

**Пример 1.** Ионизационный потенциал натрия равен 5,14 эВ/атом, а углерода 11,26 эВ/атом. Чему равна их энергия ионизации?

*Решение.*

$$1) E_{\text{ион}}(\text{Na}) = 5,14 \cdot 96,5 = 496,0 \text{ кДж/моль}$$

$$2) E_{\text{ион}}(\text{C}) = 11,26 \cdot 96,5 = 1086,6 \text{ кДж/моль}$$

### 2.3. Сродство к электрону

*Сродство к электрону* – это энергия, выделяющаяся при захвате электрона атомом или энергия, затрачиваемая на присоединение электрона к атому. Эта характеристика обозначается символом  $F$ . Методика определения сродства к электрону пока не совершенна, поэтому данные об этой величине противоречивы. Наиболее достоверные значения сродства к электрону для элементов трех первых периодов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сродство к электрону элементов первого, второго и третьего периодов

Эле- мент	Сродство к электрону		Эле- мент	Сродство к электрону		Эле- мент	Сродство к электрону	
	эВ/атом	кДж/моль		эВ/атом	кДж/моль		эВ/атом	кДж/моль
H	0,75	72,4	Li	0,59	59,8	Na	0,34	32,8
He	-0,22	-21,2	Be	-0,19	-18,3	Mg	-0,32	-30,9
			B	0,33	31,8	Al	0,46	44,4
			C	1,24	119,7	Si	1,24	119,6
			N	0,05	4,8	P	0,77	74,3
			O	1,47	141,8	S	2,08	200,7
			F	3,50	337,8	Cl	3,61	348,3
			Ne	-0,30	-28,9	Ar	-0,36	-34,7

Из табл. 3 видно, что отрицательные значения сродства к электрону имеют благородные газы (He, Ne, Ar) и атомы с внешними электронами  $ns^2$  (Be, Mg), поэтому отрицательно заряженные ионы этих атомов неустойчивы. Присоединение электрона к атомам других элементов сопровождается выделением энергии. Это свидетельствует о том, что имеющиеся у нейтральных атомов электроны не компенсируют полностью сил притяжения противоположно заряженного ядра и что анионы  $\text{H}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}^-$  и т.п. устойчивы. Однако присоединение двух и более электронов никаким атомом невозможно и, следовательно, ионы  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{N}^{3-}$  и т.п. не существуют. Из табл. 3 видно, что сродство к электрону у атомов азота и фосфора меньше, чем у соседних р-элементов периода, что свидетельствует о большей стабильности наполовину заполненного р-подуровня.

### 2.4. Электроотрицательность

*Электроотрицательностью* называется свойство химического элемента притягивать к своему атому электроны от атомов других элементов, с которыми данный элемент образует химическую связь в соединениях.

При образовании химической связи между атомами разных элементов общее электронное облако смещается к более электроотрицательному атому, из-за чего связь становится ковалентно-полярной, а при большой разности электроотрицательностей – ионной.

Электроотрицательность учитывается при написании химических формул: в бинарных соединениях первым записывается символ менее электроотрицательного, а вторым – более электроотрицательного элемента. Знак степени окисления элемента в соединении (но не численное значение!) также определяется электроотрицательностью: для менее электроотрицательных элементов он положительный, а для более электроотрицательных – отрицательный.

Электроотрицательность определяли многие ученые. Полинг выразил электроотрицательность в условных относительных единицах; по такому же пути пошли Олред и Рохов, которые предлагают более точные, чем Полинг, значения электроотрицательности. В табл. 4 приведены их данные для элементов трех первых периодов.

Таблица 4. Относительная электроотрицательность (ЭО) элементов первого, второго и третьего периодов

Элемент	ЭО		Элемент	ЭО		Элемент	ЭО	
	по Полингу	по Олреду-Рохову		по Полингу	по Олреду-Рохову		по Полингу	по Олреду-Рохову
H	2,1	2,20	Li	1,0	0,97	Na	0,9	1,01
			Be	1,5	1,17	Mg	1,2	1,23
			B	2,0	2,07	Al	1,5	1,47
			C	2,5	2,50	Si	1,8	1,74
			N	3,0	3,07	P	2,1	2,06
			O	3,5	3,50	S	2,5	2,44
			F	4,0	4,10	Cl	3,0	2,83

Из таблицы видно, что наибольшие значения электроотрицательности имеют неметаллы (фтор, хлор, кислород, азот), а наименьшие – щелочные металлы (литий, натрий). В таблице отсутствуют данные об электроотрицательности последних элементов периодов – гелия, неона и аргона, т.к. эти элементы не образуют соединений.

Электроотрицательность является периодическим свойством: в периодах она увеличивается, а в группах уменьшается (рис. 5б).

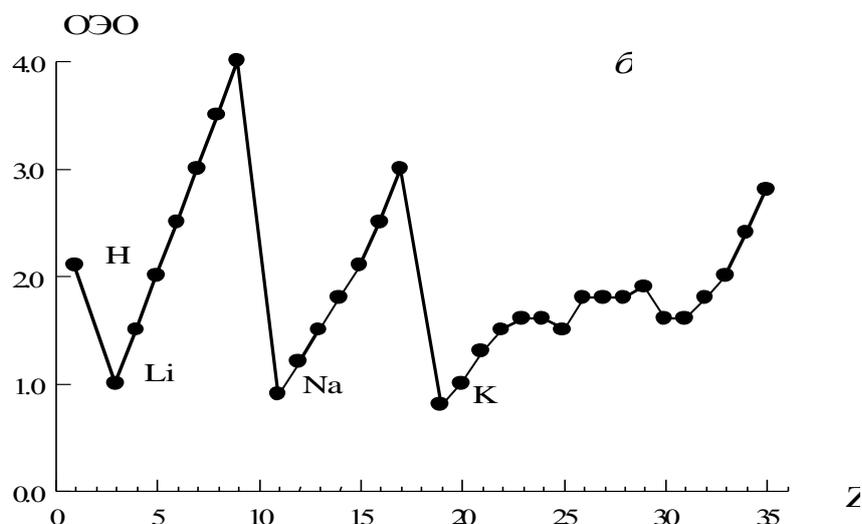


Рис 5. Зависимость электроотрицательности от атомного номера элемента.

**Пример 2.** Исходя из электроотрицательности элементов, установите правильное написание формул водородных соединений р-элементов пятой группы.

*Решение.* Электроотрицательность водорода и р-элементов пятой группы по Полингу равна: водород – 2,1, азот – 3,0, фосфор – 2,1, мышьяк – 2,0, сурьма – 1,9, висмут – 1,9. В формулах бинарных соединений символ менее электроотрицательного элемента записывается первым, а более электроотрицательного – вторым. Следовательно, правильная запись формулы аммиака  $\text{H}_3\text{N}$ , но химики пользуются исторически сложившейся формулой  $\text{NH}_3$ . У соединений мышьяка, сурьмы и висмута с водородом формулы очевидны:  $\text{AsH}_3$ ,  $\text{SbH}_3$ ,  $\text{BiH}_3$ . Фосфор имеет такую же электроотрицательность, что и водород, поэтому формулу соединения этих элементов можно записывать как  $\text{PH}_3$ , так и  $\text{H}_3\text{P}$ ; обычно пользуются первой записью.

## 2.5. Валентность

Для стехиометрических расчетов, а также для составления химических формул и уравнений необходимо знание количественных соотношений атомов различных элементов, в которых они соеди-

няются или взаимодействуют. Такая информация передаётся стехиометрической валентностью. *Стехиометрическая валентность элемента* показывает, со сколькими атомами одновалентного элемента соединяется атом данного элемента. Примером одновалентного элемента является водород, поэтому стехиометрическая валентность указывает на то, со сколькими атомами водорода соединяется атом рассматриваемого элемента. Так, в HCl хлор одновалентен, в H<sub>2</sub>O кислород двухвалентен, в NH<sub>3</sub> азот трехвалентен и т.д.

Водородные соединения известны не для всех элементов, но почти все элементы образуют соединения с кислородом, который всегда стехиометрически двухвалентен. Поэтому валентность элементов можно определять по составу их кислородных соединений. Например, калий одновалентен (K<sub>2</sub>O), барий двухвалентен (BaO), алюминий трехвалентен (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Многие элементы проявляют несколько стехиометрических валентностей, т.е. они могут образовывать с другим элементом несколько соединений разного стехиометрического состава. Например, азот в соединениях с кислородом может быть одновалентным (N<sub>2</sub>O), двухвалентным (NO), трехвалентным (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), четырехвалентным (NO<sub>2</sub>) и пятивалентным (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Понятие о стехиометрической валентности было введено в химию задолго до того, как стало известно строение атомов (Франкланд, 1853). При изучении строения атомов было установлено, что валентность элементов связана с числом внешних электронов в их атомах.

Для всех элементов главных подгрупп число внешних электронов у их атомов равно номеру группы. Внешние электроны одновременно являются валентными электронами, поэтому высшая валентность элементов главных подгрупп равна номеру группы. Исключением из этого правила является кислород, который всегда двухвалентен, хотя находится в шестой группе, и фтор, который находится в седьмой группе, но всегда одновалентен. В табл. 5 приведены значения максимальной валентности элементов трех первых периодов.

Таблица 5. Максимальная валентность элементов первого, второго и третьего периодов

Элемент	Валентность	Элемент	Валентность	Элемент	Валентность
H	1	Li	1	Na	1
		Be	2	Mg	2
		B	3	Al	3
		C	4	Si	4
		N	5	P	5
		O	2	S	6
		F	1	Cl	7

Максимальная валентность химических элементов главных подгрупп является периодическим свойством (рис. 5в): в периодах она увеличивается, а в группах постоянна и равна номеру группы (кроме кислорода и фтора). Для элементов побочных подгрупп валентность также является периодическим свойством, но зависимость их валентности от положения в периодической системе является более сложной.

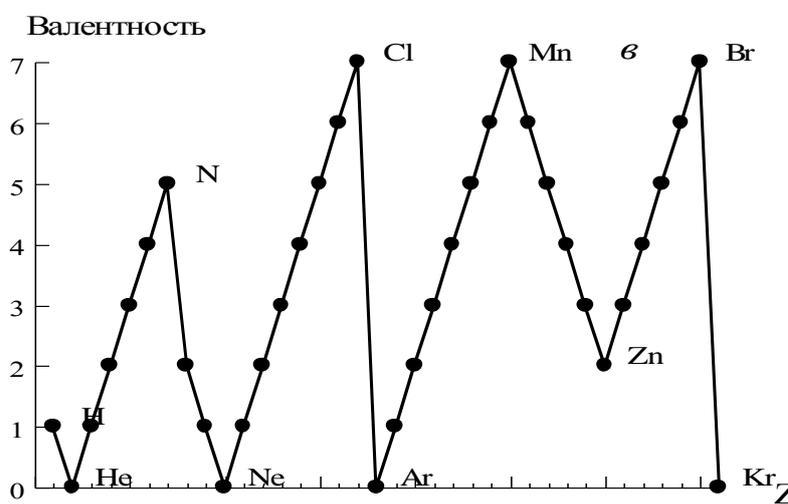


Рис 5. Зависимость валентности от атомного номера элемента.

**Пример 3.** Руководствуясь положением элементов в периодической системе, напишите формулы соединения алюминия с водородом, кислородом, азотом, углеродом, серой и фтором.

*Ответ.*  $\text{AlH}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{S}_3$ ,  $\text{AlF}_3$

### 3. Периодические свойства соединений

Периодический закон распространяется на свойства одновалентных соединений. Закономерно изменяются *основно-кислотные свойства оксидов и гидроксидов*: в периодах уменьшаются основные свойства, но увеличиваются кислотные свойства этих соединений, а в группах основные свойства увеличиваются, а кислотные уменьшаются. Например, элементы третьего периода образуют следующие оксиды: Na и Mg – основные, Al – амфотерный, а Si, P, S и Cl – кислотные. Элементы IIIA группы образуют такие оксиды: B – кислотный, Al, Ga, In – амфотерные, Tl – основной.

В периодах, как правило, увеличивается, а в группах уменьшается *окислительная способность* простых веществ и одновалентных соединений.

У одновалентных солей в периодах уменьшается *термическая устойчивость* и возрастает их склонность к *гидролизу*, а в группах наблюдается обратное.

Периодическими являются многие другие свойства соединений: энергия химической связи, энтальпия и энергия Гиббса образования и др. Из этого следует, что *место химического элемента в периодической системе определяет его свойства и свойства его многих соединений*.

По мере усвоения химии глубина понимания периодического закона возрастает и возможность предсказания состава и свойств соединений увеличивается.

Таким образом, периодический закон и Периодическая система Д.И. Менделеева позволяют по атомному номеру дать общую характеристику химических свойств элемента, состав и свойства его важнейших соединений. Поистине «...периодическая система – это краткая физико-химическая энциклопедия» (акад. В.И. Гольданский).

Периодический закон и Периодическая система элементов сыграли огромную роль в развитии науки и техники, и эта роль в настоящее время не уменьшается. На их основе проводятся исследования по открытию элементов, поиску их в природе, синтезу новых веществ.

**Пример 4.** Пользуясь периодической системой элементов, написать формулы высших оксидов хрома, марганца и олова и кислот, соответствующих этим оксидам

*Решение.* Хром расположен в шестой группе периодической системы, марганец в седьмой, а олово в четвертой. Номер группы указывает их максимальную валентность, следовательно, требуемые формулы таковы:

Элементы:	Cr	Mn	Sn
Оксиды:	$\text{CrO}_3$	$\text{Mn}_2\text{O}_7$	$\text{SnO}_2$
Кислоты:	$\text{H}_2\text{CrO}_4$	$\text{HMnO}_4$	$\text{H}_2\text{SnO}_3$

**Пример 5.** Назвать элемент пятого периода, высший оксид которого  $\text{Э}_2\text{O}_7$ , а с водородом этот элемент образует соединение HЭ.

*Решение.* Формула соединения данного элемента с кислородом свидетельствует о том, что он расположен в седьмой группе, следовательно, это может быть или технеций, или иод. Но газообразное соединение с водородом состава HЭ технеций (металл, d-элемент) не образует, следовательно, данный элемент – йод.

### 4. Тест для самоконтроля

(ответы приведены в приложении 2)

1. Как расположены элементы в Периодической системе?

- |   |                                |
|---|--------------------------------|
| 1) В афавитном порядке                  | 2) По увеличению атомной массы |
| 3) По возрастанию заряда ядра их атомов | 4) В хронологическом порядке   |

2. Существование и свойства каких элементов предсказал Д.И. Менделеев при открытии Периодического закона?

- |               |               |             |               |
|---------------|---------------|-------------|---------------|
| 1) Fe, Co, Ni | 2) Ag, Au, Pt | 3) Al, B, F | 4) Ga, Sc, Ge |
|---------------|---------------|-------------|---------------|

3. Как называется химический элемент, обозначение (символ) которого Md?

- |           |             |             |               |              |
|-----------|-------------|-------------|---------------|--------------|
| 1) Магний | 2) Марганец | 3) Молибден | 4) Менделевий | 5) Мейтнерий |
|-----------|-------------|-------------|---------------|--------------|

4. Расположите элементы 1) кислород, 2) алюминий, 3) сера, 4) магний по увеличению энергии ионизации. Ответ приведите последовательностью символов элементов без запятых и пробелов.

5. Как называется свойство химических элементов, которое во периодах увеличивается, а в группах остаётся постоянным?

1) Ионизационный потенциал

2) Атомный радиус

3) Электроотрицательность

4) Максимальная валентность

### 5. Задачи и упражнения для самостоятельной работы

(ответы приведены в приложении 2)

**Пример 1.** Самое большое значение ионизационного потенциала имеет гелий (24,68 эВ/атом). Вычислите его энергию ионизации.

**Пример 2.** Исходя из электроотрицательности элементов, напишите формулы водородных соединений элементов главной подгруппы четвёртой группы.

**Пример 3.** Руководствуясь положением элементов в Периодической системе, напишите формулы соединений кальция с водородом, кислородом, азотом, углеродом, серой и фтором.

**Пример 4.** Пользуясь Периодической системой элементов, напишите формулы высших оксидов сурьмы, ванадия, рения хрома и гидроксидов, соответствующих этим оксидам.

**Пример 5.** Назовите элемент четвёртого периода, высший оксид которого  $\text{ЭO}_3$ , а с водородом этот элемент образует соединение  $\text{H}_2\text{Э}$ .

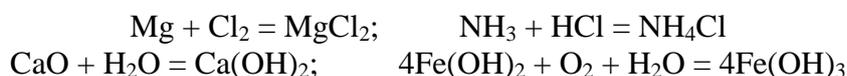
## Глава 4. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Химические превращения одних веществ в другие называется химическими реакциями. Химические реакции классифицируются по разным признакам. В каждом разделе химии используется своя классификация реакций, необходимая при изучении тех или иных закономерностей их протекания. Например, в термохимии реакции подразделяются на экзотермические (с выделением теплоты) и эндотермические (с поглощением теплоты), в химической термодинамике – на самопроизвольные и не самопроизвольные, обратимые и необратимые, в химической кинетике – на простые и сложные, гомогенные и гетерогенные. При изучении растворов выделяются и рассматриваются отдельно ионообменные реакции, реакции гидролиза и образования комплексных соединений, а при изучении электрохимических процессов – токообразующие реакции в химических источниках электроэнергии и реакции электролиза.

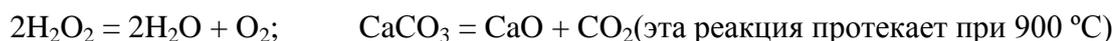
В начале изучения химии необходимо усвоить две самые общие классификации химических реакций: 1) по изменению состава продуктов по сравнению с составом реагентов и 2) по изменению степени окисления элементов в составе реагентов.

По первому признаку они подразделяются на реакции соединения, разложения, замещения и обмена.

В реакциях *соединения* из двух или нескольких веществ образуется одно новое вещество:



В реакциях *разложения*, наоборот, из одного вещества образуются несколько новых веществ, например:



В реакциях *замещения* атомы простого вещества замещают атомы одного из элементов сложного вещества, например:



В реакциях *обмена* два вещества обмениваются своими составными частями, образуя два новых вещества, например:



2. По признаку изменения степени окисления элементов (атомов), входящих в состав реагентов, различают реакции, протекающие без изменения и с изменением степеней окисления.

К реакциям без изменения степеней окисления атомов относятся все реакции обмена и гидролиза, многие реакции разложения и некоторые реакции соединения.

Реакции, протекающие с изменением степеней окисления атомов, называются *окислительно-восстановительными реакциями*. Рассмотрим их подробно.

### 3.1. Степень окисления и валентность

В окислительно-восстановительных реакциях происходит изменение степени окисления некоторых (иногда всех) элементов, входящих в состав реагентов, поэтому вначале рассмотрим понятие *степень окисления*. Известно три определения этого понятия, которые раскрывают его со всех сторон.

Первое определение. **Степенью окисления элемента в веществе называется его стехиометрическая валентность, взятая со знаком плюс или минус в соответствии с общепринятым делением элементов на электроположительные (знак плюс) и электроотрицательные (знак минус)**. Это определение наиболее точно выражает сущность понятия.

Другое часто встречающееся определение: **степенью окисления элемента называется условный заряд его атома, вычисленный из предположения, что вещество состоит из ионов**. Это определение имеет тот недостаток, что, несмотря на оговорку об условности, невольно закрепляет неправильное представление об ионном строении веществ. В действительности чисто ионных связей не бывает, а реальные заряды атомов в веществах (эффективные заряды) далеко не равны их степеням окисления.

Ещё одно определение: **степенью окисления элемента в веществе называется число электронов, смещенных от атома этого элемента (при положительной степени окисления), или к атому этого элемента (при отрицательной степени окисления), вследствие поляризации химической связи**. Для уяснения этого понятия необходимо иметь знания об электронном строении атомов и механизме образования и поляризации химических связей.

Степень окисления элемента формально определяется по правилам, которые являются следствием рассмотренных определений этого понятия.

1. В простых веществах степень окисления элементов равна нулю.

2. Водород в большинстве соединений имеет степень окисления +1, но в соединениях с металлами (гидридах) она равна -1.

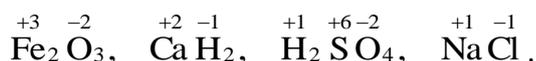
3. Кислород в большинстве соединений находится в степени окисления -2, но в пероксидах его степень окисления равна -1.

4. Фтор во всех соединениях имеет степень окисления -1.

5. Металлы в соединениях имеют положительную степень окисления, причем, щелочные металлы всегда +1, металлы второй группы (кроме ртути) всегда +2, алюминий всегда +3.

6. Алгебраическая сумма степеней окисления всех атомов в молекуле или формульной единице вещества равна нулю, а в ионе – заряду иона.

Степень окисления указывается над символом атома арабской цифрой со знаком плюс или минус впереди, например:



Степень окисления следует отличать от заряда иона, который указывается вверху справа цифрой со знаком позади (но цифра 1 не ставится), например:  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ .

Встречаются соединения, в которых трудно определить знак степени окисления элемента, например, соединения двух неметаллов. В таких случаях сравнивают электроотрицательность элементов, входящих в состав данного соединения. Электроотрицательность характеризует свойство атомов притягивать валентные электроны. Она выражается относительным числом в шкале, где за единицу принята электроотрицательность лития. В соединениях элемент с большей электроотрицательностью имеет отрицательное значение степени окисления, а его партнер по химической связи – положительное.

Электроотрицательность является периодическим свойством. Электроотрицательность элементов главных подгрупп в периодах увеличивается, например:  $\text{Li}(1,0) - \text{Be}(1,5) - \text{B}(2,0) - \text{C}(2,5) - \text{N}(3,0) - \text{O}(3,5) - \text{F}(4,0)$ , а в группах уменьшается, например:  $\text{F}(4,0) - \text{Cl}(3,0) - \text{Br}(2,8) - \text{I}(2,5)$ . У элементов

побочных подгрупп (все они являются металлами) электроотрицательность равна 1,5 – 1,8. Электроотрицательность водорода равна 2,1.

**Пример 1.** Определите степень окисления серы в соединениях  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{S}$ .

Вставка

**Пример 2.** Определите степень окисления марганца в в соединениях  $\text{MnO}_2$  и  $\text{KMnO}_4$ .

Вставка

**Пример 3.** Определите степень окисления хрома в в соединениях  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  и  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ .

Вставка

**Пример 4.** Определите степень окисления элементов в соединениях  $\text{CS}_2$ ,  $\text{PCl}_5$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{PH}_3$ .

Вставка

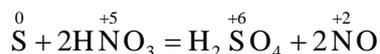
**Пример 5.** Определите степень окисления азота в соединениях  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_2$ ,  $\text{AsH}_3$ .

Вставка

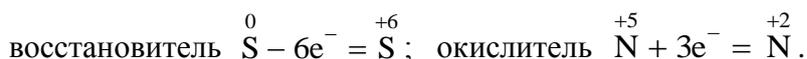
### 3.2. Окислительно-восстановительные реакции

Почему происходит изменение степени окисления элементов в окислительно-восстановительных реакциях?

Принято считать, что в таких реакциях одни атомы (восстановители) отдают электроны, а другие атомы (окислители) их принимают. Так, например, для реакции

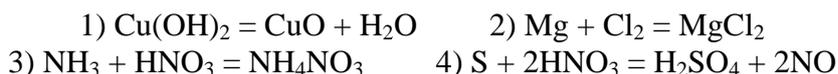


процессы отдачи и присоединения электронов можно записать следующими электронными схемами:



Но следует заметить, что такие схемы условны, так как в большинстве окислительно-восстановительных реакций отдельные атомы электронов не отдают и не присоединяют. Изменение степени окисления элементов является результатом изменения состава и строения всех веществ, участвующих в реакции.

**Пример 6.** Среди данных уравнений укажите уравнения окислительно-восстановительных реакций:



Вставка

### 3.3. Окислители и восстановители

*Восстановителем* называется вещество, в состав которого входит элемент, *повышающий* степень окисления. *Окислителем* называется вещество, в состав которого входит элемент, *понижающий* степень окисления при протекании окислительно-восстановительной реакции.

С точки зрения электронной теории, окислением называют процесс *отдачи* электронов. Вещество, присоединяющее электроны и вызывающее таким образом окисление другого вещества, называется окислителем. Окислителями являются большинство неметаллов (галогены, кислород, сера и др.), многие кислородосодержащие кислоты ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{HClO}_3$ ,  $\text{HClO}_2$ ,  $\text{HClO}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SeO}_4$ ) и их соли ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{NaClO}_2$ ,  $\text{NaClO}$ ); соединения металлов в высших положительных степенях окисления ( $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ,  $\text{NaBiO}_3$ ).

Восстановлением, согласно электронной теории, называют процесс *присоединения* электронов. Вещество, отдающее электроны (и этим вызывающее восстановление другого вещества), называется восстановителем. Восстановителями являются металлы, соединения металлов в низших степенях окисления ( $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{CrCl}_3$ ,  $\text{MnSO}_4$  и др.), некоторые неметаллы ( $\text{H}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{Si}$ ), соединения неметаллов в отрицательных степенях окисления ( $\text{NaH}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{H}_4$ ,  $\text{NH}_2\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{KI}$ ); соединения неметаллов в немаксимальных положительных степенях окисления ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_2$ ).

Многие вещества в зависимости от партнёра по реакции и условий её проведения могут быть как восстановителями, так и окислителями. Способность многих веществ быть как восстановителями, так и окислителями, называется их окислительно-восстановительной двойственностью.

Например, в ряду соединений, расположенных по возрастанию степени окисления азота



аммиак обладает только восстановительными свойствами, так как в его составе азот находится в крайней отрицательной степени окисления, которая может только повышаться. Азотная кислота, наоборот, обладает только окислительными свойствами, так как азот в ней находится в крайней положительной степени окисления, которая может только понижаться. Остальные вещества, в которых азот находится в промежуточных степенях окисления, обладают окислительно-восстановительной двойственностью.

Таким образом, окислительно-восстановительной двойственностью обладают вещества, в состав которых входят элементы в промежуточных степенях окисления.

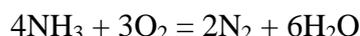
**Пример 4.** Среди данных соединений укажите окислители, восстановители и вещества с окислительно-восстановительной двойственностью: а)  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ,  $\text{Fe}$ ; б)  $\text{K}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; в)  $\text{CH}_4$ ,  $\text{K}_3\text{VO}_4$ ,  $\text{SnCl}_2$ .

#### Вставка

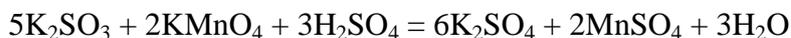
### 3.4. Классификация окислительно-восстановительных реакций

Окислительно-восстановительные реакции обычно подразделяются на четыре типа: межмолекулярные, внутримолекулярные, диспропорционирование и конпропорционирование.

В *межмолекулярных* окислительно-восстановительных реакциях окислитель и восстановитель – различные вещества. Например, в реакции



окислителем является кислород  $\text{O}_2$ , а восстановителем аммиак  $\text{NH}_3$ , а в реакции



окислитель – перманганат калия  $\text{KMnO}_4$ , а восстановителем – сульфит калия  $\text{K}_2\text{SO}_3$ .

*Внутримолекулярные* окислительно-восстановительные реакции отличаются тем, что элементы окислитель и восстановитель (разные элементы) содержатся в составе одного и того же соединения. Например, в реакции



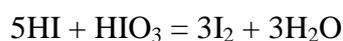
восстановителем являются атомы азота, а окислителем атомы хрома в составе разлагающегося дихромата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ .

*Диспропорционирование* (дисмутация) отличается тем, что окисляются и восстанавливаются атомы одного и того же элемента. Например, в реакции

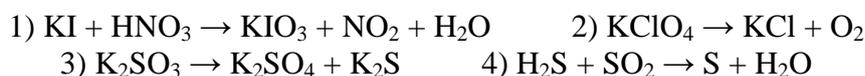


окисляются и восстанавливаются атомы хлора.

Реакции *конпропорционирования* – это реакции, обратные реакциям диспропорционирования. В таких реакциях атомы одного и того же элемента в разных соединениях и в различных степенях окисления выступают в качестве окислителя и восстановителя друг друга; обычно продуктом этих реакций является простое вещество, в котором атомы этого элемента имеют нулевую степень окисления:



**Пример 5.** Определите тип каждой из данных окислительно-восстановительных реакций:

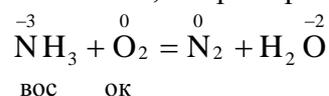


#### Вставка

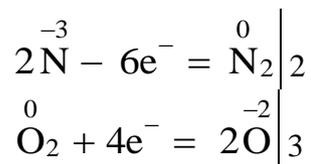
### 3.5. Метод электронного баланса

Определение стехиометрических коэффициентов в уравнениях окислительно-восстановительных реакций проводят двумя методами: электронного баланса и полуреакций.

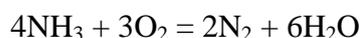
По методу электронного баланса сначала находят окислитель, восстановитель и элементы в их составе, у которых изменяется степень окисления, например:



После этого записывают электронные схемы отдачи электронов восстановителем и их присоединения окислителем:



Цифры справа от вертикальной черты показывают, какими должны быть наименьшие числа атомов восстановителя и окислителя, чтобы число отданных и присоединенных электронов было одинаковым. Они являются стехиометрическими коэффициентами в уравнении реакции:



Метод электронного баланса не согласуется с современными данными, полученными при исследовании механизма реакций. В большинстве окислительно-восстановительных реакций перехода электронов от атома к атому не происходит, а причиной изменения степени окисления элементов является изменение состава и строения веществ. Поэтому электронные схемы в методе электронного баланса не отражают реального механизма окислительно-восстановительных реакций. Но подбирать стехиометрические коэффициенты этим методом можно, если схема реакции дана полностью, если известны исходные вещества и продукты реакции.

Пример. Определите стехиометрические коэффициенты в уравнениях реакций, которые приведены в п. 3.4. Классификация окислительно-восстановительных реакций.

#### Вставка

### 3.6. Метод полуреакций

Метод полуреакций студенты общетехнических направлений не изучают. Но этим методом должны владеть студенты химических направлений и специальностей, поэтому он приводится в данном пособии. Метод полуреакций сложнее метода электронного баланса, но с его помощью не только находят стехиометрические коэффициенты, но и определяют направление протекания окислительно-восстановительных реакций. При уверенном владении методом полуреакций с его помощью можно записывать продукты реакций, даже если они не известны.

Метод полуреакций относится к реакциям в растворах, где многие вещества диссоциируют на ионы. Поэтому сначала реакцию записывают в ионном виде: диссоциирующие вещества записывают в виде ионов, а слабые электролиты, газы и нерастворимые вещества – в молекулярном. Затем находят ионы (молекулы) – восстановители и ионы (молекулы) – окислители. После этого реакцию записывают в виде двух полуреакций: одну с участием восстановителя, другую – окислителя, при этом в полуреакции входят молекулы и ионы среды раствора ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ). В полуреакциях уравнивают атомы (закон сохранения массы) и заряды ионов (закон сохранения энергии); для уравнивания зарядов в полуреакции вводятся электроны.

Следующее действие по методу полуреакций напоминает метод электронного баланса: для полуреакций подбирают множители таким образом, чтобы число электронов в обеих полуреакциях стало одинаковым. С учетом этих множителей полуреакции складывают и получают ионное уравнение окислительно-восстановительной реакции с коэффициентами; от него переходят к молекулярному уравнению.

Таким образом, главное отличие метода полуреакций от метода электронного баланса заключается в полуреакциях, запись которых без тренировки представляет определенные трудности.

Полуреакции можно найти в справочниках. Но студенты предпочитают составлять их самостоятельно, так как написать полуреакции часто самому быстрее, чем найти в справочнике. К тому же умение записывать полуреакции повышает общий уровень химических знаний.

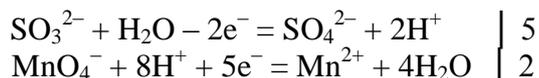
Полезно заучить два правила, которые в большинстве случаев (но не всегда!) помогают составить полуреакции.

*Правило 1.* В кислой среде восстановитель присоединяет атомы кислорода от воды, образуя ионы водорода, а окислитель, наоборот, отдает кислород катионам водорода, образуя воду.

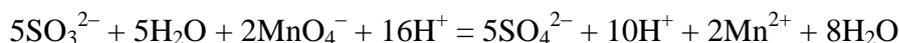
Например, в реакции:



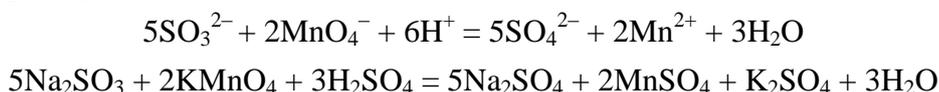
восстановителем являются  $\text{SO}_3^{2-}$ -ионы, а окислителем  $\text{MnO}_4^-$ -ионы. В соответствии с правилом 1, полуреакции имеют вид:



Для того чтобы число электронов в полуреакциях было одинаковым, подбирают множители 5 и 2 и складывают полуреакции, предварительно умноженные на эти множители:



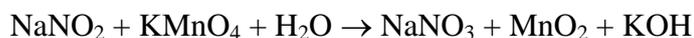
После сокращения подобных получают окончательное ионное уравнение, от которого легко перейти к молекулярному:



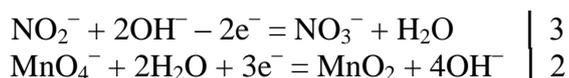
При переходе от ионного к молекулярному уравнению в правую часть вписывают сульфат калия, который в ионное уравнение не входит, поскольку не принимает участия в окислительно-восстановительных процессах.

*Правило 2.* В нейтральной и щелочной среде восстановитель присоединяет кислород от  $\text{OH}^-$ -ионов с образованием воды, а окислитель, наоборот, отдает кислород воде, образуя  $\text{OH}^-$ -ионы.

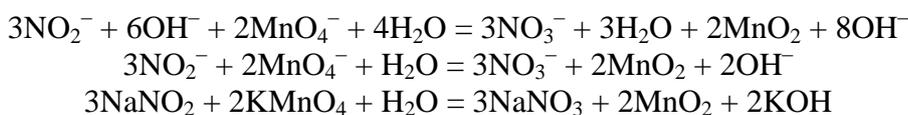
В качестве примера рассмотрим реакцию:



Полуреакции, составленные по правилу 2, имеют вид:



Суммируя полуреакции, помноженные на числа 3 и 2, получаем полное ионное уравнение, от него переходим к краткому ионному, а затем к молекулярному уравнению:



В некоторых случаях молекулы и ионы среды раствора ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ) в полуреакции не вводятся. Это бывает в тех случаях, когда состав частиц не изменяется, а изменяется только их заряд, например:



**Пример.**

Вставка

### 3.7. Реакции с участием пероксидов

В пероксидах ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{CaO}_2$  и др.) кислород находится в промежуточной степени окисления (-1), поэтому пероксиды проявляют окислительно-восстановительную двойственность.

Вставка

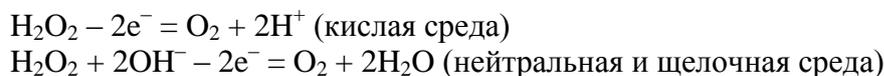
При использовании метода электронного баланса

### Вставка

При использовании метода полуреакций в тех случаях, когда пероксид водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  является окислителем, его полуреакции имеют вид:



а в тех случаях, когда восстановителем:



**Пример 7.** Уравняйте методом полуреакций окислительно-восстановительные реакции с участием пероксидов:



### Вставка

### 3.8. Эквиваленты окислителей и восстановителей

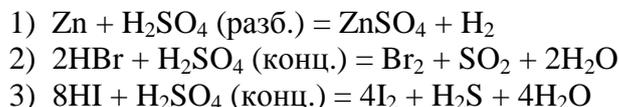
Эквивалентом окислителя (восстановителя) называется частица этого вещества, которая присоединяет (отдает) один электрон в данной окислительно-восстановительной реакции. Относительная масса этой частицы называется эквивалентной массой, а масса одного моля этих частиц – молярной массой эквивалента окислителя (восстановителя).

Эквивалентная масса окислителя (восстановителя) рассчитывается делением его молекулярной массы на число принимаемых (отдаваемых) электронов.

**Пример 8.** Определите эквивалентную массу широко известного окислителя – перманганата калия при его максимальном восстановлении.

### Вставка

**Пример 9.** Определите эквивалентную массу серной кислоты в реакциях:



### Вставка

### 3.9. Тест для самоконтроля

(ответы приведены в приложении 2)

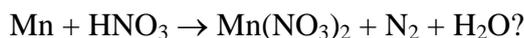
1. Укажите формулу вещества, которое в окислительно-восстановительных реакциях может проявлять и окислительные, и восстановительные свойства:



2. Какую функцию выполняет хлор в реакции  $\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$ ?



3. Какой коэффициент должен стоять перед восстановителем в реакции



4. Укажите сумму стехиометрических коэффициентов перед формулами всех веществ в уравнении реакции



5. Укажите тип окислительно-восстановительной реакции, приведенной в вопросе №3:

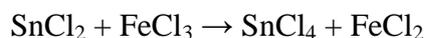


### 3.10. Упражнения для самостоятельной работы

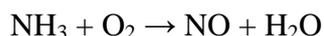
(ответы приведены в приложении 2)

Для самостоятельно работы подобрано десять окислительно-восстановительных реакций, начиная с одной из самых простых. Далее уравнения реакций постепенно усложняются. Во всех реакциях необходимо определить стехиометрические коэффициенты. В ответах (приложение 2) приведены суммы коэффициентов перед всеми веществами.

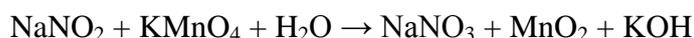
1. Первая реакция практического значения не имеет; она используется в обучении как самая простая окислительно-восстановительная реакция:



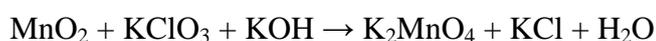
2. Вторая реакция – это окисление аммиака на платиновом катализаторе; образующийся оксид азота (II) далее перерабатывается в азотную кислоту:



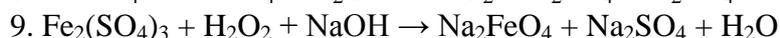
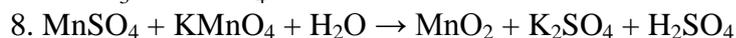
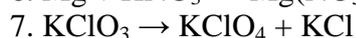
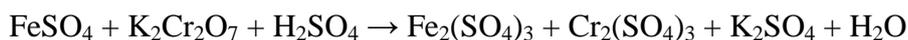
3. Третья реакция демонстрирует окислительные свойства перманганата калия в нейтральной среде:



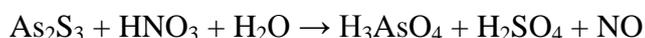
4. Четвертая реакция используется для получения соединений марганца из природного соединения пиролюзита ():



5. Пятая и следующие реакции большого практического значения не имеют, но они используются в учебных целях при изучении темы «Окислительно-восстановительные реакции».



10. Десятую реакцию студенты называют «самой сложной в мире ОВР».



## Глава 5. РАСТВОРЫ

В главе рассматриваются основные способы выражения концентрации растворов, растворимость веществ, электролитическая диссоциация, ионообменные реакции в растворах и гидролиз солей. Материал сопровождается решением задач и упражнений, которые способствуют усвоению теоретического материала.

Смешивание двух веществ может сопровождаться: 1) химической реакцией между ними с образованием совершенно новых веществ; 2) образованием механической неоднородной смеси, которая легко разделяется на исходные вещества; 3) образованием раствора, который занимает промежуточное положение между химическими соединениями и механическими смесями.

В отличие от механической смеси, раствор однороден, то есть его состав по всему объему одинаков, так как за счет диффузии концентрация его компонентов по всему объему одинаковая. Таким образом, **раствор – это однородная система из двух или более компонентов, состав которой можно изменять в определенных пределах без нарушения однородности.**

В 19 столетии растворы считались физическими смесями, в которых отсутствуют какие-либо взаимодействия между растворителем и растворенным веществом. Д.И. Менделеев разработал (1887) *химическую теорию растворов*, которая рассматривает процесс образования растворов как химическое взаимодействие растворителя с растворяемым веществом. Продуктами этого взаимодействия являются особые соединения – *гидраты* (для водных растворов) или *сольваты* (для неводных растворов), которые отличаются от обычных соединений неопределенностью своего состава. Менделеев дал следующее определение раствора, которое сохраняет свое значение и в настоящее время: **растворы представляют жидкие диссоционные системы, образованные частицами растворителя и растворенного вещества и тех неопределенных, но экзотермических соединений, которые образуются между ними.**

## 1. Концентрация растворов

Важнейшей характеристикой раствора является содержание в нем растворенного вещества, которое называется *концентрацией раствора*. Концентрацию раствора выражают многими способами, но чаще всего применяются два способа.

1. *Массовая доля* растворенного вещества ( $\omega$ ). Это отношение массы растворённого вещества к массе раствора. Например, 20%-й раствор гидроксида натрия – это такой раствор, в 100 кг (или г) которого содержится 20 кг (или 20 г) NaOH и 80 кг (или 80 г) воды.

Если растворенное вещество является жидким, то состав такого раствора может быть выражен не только в массовых, но и в объемных долях или объемных процентах. Объемная доля растворенного вещества ( $\varphi$ ) – это отношение объема этого вещества к объему всего раствора. Например, если в 0,5 л раствора содержится 200 мл этанола, то его объемная доля равна 0,4, или 40 %.

2. *Молярная концентрация* ( $C_M$ ) – это количество растворенного вещества в одном литре раствора. Например, в одном литре двумолярной (2 М) серной кислоты содержится 2 моль, то есть 196 г  $H_2SO_4$ , а в таком же объеме децимолярной (0,1 М) кислоты – 9,8 г  $H_2SO_4$ .

Плотность раствора отличается от плотности растворителя. Растворы неорганических соединений, молярная масса которых больше молярной массы воды (18 г/моль), имеют плотность больше плотности воды, причем с увеличением концентрации растворов их плотность увеличивается.

Взаимосвязь плотности и концентрации раствора выражается в виде таблиц; такая таблица имеется в справочнике, которым пользуются студенты (таблица ).

С концентрацией растворов связано много различных расчётов, которые проводятся не только в химии и химической технологии, но и в других областях техники, в которых применяются растворы.

**Пример 1.** В 1 л воды растворено 160 г NaOH. Выразите двумя способами концентрацию раствора, плотность которого равна 1150 кг/м<sup>3</sup>.

*Решение.* При решении имеем в виду, что молярная масса NaOH равна 40 г/моль, объем 1 л – это 1000 мл, масса одного литра воды равна 1 кг (или 1000 г), а плотность 1150 кг/м<sup>3</sup> – это 1,15 г/мл.

1) Определяем массу полученного раствора:

$$m = m(H_2O) + m(NaOH) = 1000 + 160 = 1160 = 11,16 \text{ кг}$$

2) Находим объем раствора:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1160}{1,15} = 1008,7 \text{ мл}$$

3) Вычисляем количество гидроксида натрия в растворе:

$$n(NaOH) = \frac{m(NaOH)}{M(NaOH)} = \frac{160}{40} = 4,00 \text{ моль}$$

4) Определяем массовую долю растворенного вещества:

$$\omega(NaOH) = \frac{m(NaOH)}{m} \cdot 100 = \frac{160}{1160} \cdot 100 = 13,8 \%$$

5) Находим молярную концентрацию раствора:

$$C_M = \frac{n(NaOH)}{V} = \frac{4,00}{1,0087} = 3,9655 \text{ моль/л}$$

**Пример 2.** В 900 г воды растворили 100 г медного купороса  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ . Определите массовую долю сульфата меди в растворе.

*Решение.* 1) Молярная масса безводного сульфата меди равна 160 г/моль, а кристаллогидрата – 250 г/моль. Находим массу  $CuSO_4$  в чистом виде в 100 г кристаллогидрата:

$$m(CuSO_4) = \frac{160 \cdot 100}{250} = 64 \text{ г}$$

2) Находим массу раствора:

$$m = 900 + 100 = 1000 \text{ г}$$

3) Определяем массовую долю сульфата меди в растворе:

$$\omega(\text{CuSO}_4) = \frac{64 \cdot 100}{1000} = 6,4 \%$$

**Пример 3.** Какие объемы воды и 40%-го раствора гидроксида натрия плотностью 1430 кг/м<sup>3</sup> потребуются для приготовления 400 мл двумолярного раствора этой щелочи?

*Решение.* 1) Вычисляем массу NaOH, которая должна содержаться в 400 мл двумолярного раствора этой щелочи:

$$m(\text{NaOH}) = \frac{2 \cdot 40 \cdot 400}{1000} = 32 \text{ г}$$

2) Находим массу 40%-го раствора, содержащего 32 г NaOH:

$$m = \frac{32}{0,4} = 80 \text{ г}$$

3) Вычисляем объем раствора:

$$V(\text{NaOH}) = \frac{80}{1,43} = 56 \text{ мл}$$

4) Находим объем воды:

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 400 - 56 = 344 \text{ мл}$$

## 2. Стехиометрические расчёты по уравнениям реакций в растворах

### Вставка

**Пример 4.** Какой объем 10%-й серной кислоты ( $\rho = 1066 \text{ кг/м}^3$ ) потребуется для взаимодействия со 100 мл 13,7%-го раствора карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  плотностью 1145 кг/м<sup>3</sup>?

*Решение.* 1) Масса 100 мл раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  равна 114,5 г. Определяем массу карбоната натрия в этом растворе:

$$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 114,5 \cdot 0,137 = 15,68 \text{ г}$$

2) Записываем уравнение реакции и рассчитываем массу серной кислоты, взаимодействующую с 15,68 г карбоната натрия:



$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{106 \cdot 98}{15,68} = 662,5 \text{ г}$$

3) Вычисляем массу и объем 10%-й серной кислоты:

$$m = \frac{662,5 \cdot 100}{10} = 662,5 \text{ г}; \quad V = \frac{662,5}{1,066} = 621,5 \text{ мл}$$

## 3. Растворимость веществ

Растворимостью называется свойство вещества растворяться в том или ином растворителе. Мера растворимости является концентрация его насыщенного раствора. Поэтому растворимость может быть выражена теми же способами, что и концентрация, т.е. массовой долей растворенного вещества в насыщенном растворе, молярной и эквивалентной концентрацией насыщенного раствора. При этом растворимость любого вещества (твёрдого, жидкого, газообразного) обозначается символом *s*.

Вместе с тем растворимость твёрдых веществ часто выражают в граммах растворённого вещества, приходящегося на 100 г воды в насыщенном растворе. Эта величина – *коэффициент растворимости* (массовый); её обозначение –  $k_m$ . Коэффициент растворимости наиболее распространенных соединений при 273 К (0 °С) равен: NaCl – 35,7,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 4,5,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 7,0,  $\text{NaNO}_3$  – 72,7, KCl – 28,0,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – 29,4,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  – 37,9,  $\text{KMnO}_4$  – 6,38 и т.д.

Растворимость газов выражают в миллилитрах газа, растворяющихся в 100 г воды до образования насыщенного раствора при нормальном давлении газа (101325 Па). Эта величина называется

объемным коэффициентом растворимости газа; его обозначение –  $k_v$ . Для наиболее распространенных газов объемный коэффициент растворимости при 0 °С (273 К) равен:  $O_2$  – 4,89,  $N_2$  – 2,35,  $CO_2$  – 71,3,  $Cl_2$  – 460,  $NH_3$  – 114250.

**Пример 7.** При растворении 360 г хлорида натрия в одном литре воды при 20 °С образовался насыщенный раствор плотностью 1,2 кг/л. Вычислите коэффициент растворимости хлорида натрия, его массовую долю в насыщенном растворе и молярную концентрацию насыщенного раствора.

*Решение.* 1) Масса одного литра воды равна 1 кг (или 1000 г). Если в одном литре воды растворяется 360 г вещества, то в 100 г – 36,0 г. Следовательно, коэффициент растворимости NaCl в воде при температуре 20 °С равен 36,0.

2) Масса насыщенного раствора равна 1360 г, масса соли в нем 360 г, поэтому массовая доля хлорида натрия в насыщенном растворе равна:

$$\omega = \frac{360}{1360} \cdot 100 = 26,5 \%$$

3) Объем получаемого насыщенного раствора составляет  $1,36 : 1,2 = 1,13$  л. Молярная масса NaCl равна 58,5 г/моль, следовательно, количество хлорида натрия в растворе равно  $360 : 58,5 = 6,15$  моль. Вычисляем молярную концентрацию раствора:

$$C = \frac{6,15}{1,13} = 5,44 \text{ моль / л}$$

**Пример 8.** Коэффициент растворимости нитрата калия при 60 °С равен 110. Какая масса этого вещества растворяется при данной температуре в 500 мл воды и чему равна масса получаемого насыщенного раствора?

*Решение.* Масса 500 мл воды составляет 500 г. Коэффициент растворимости (110) показывает массу вещества, которая растворяется в 100 г воды, следовательно, в 500 г воды растворяется 550 г  $KNO_3$ . Масса полученного насыщенного раствора будет равна 1050 г (или 1,05 кг).

**Пример 9.** Растворимость хлора в воде при 20 °С равна 300 мл газа в 100 г воды ( $k_v = 300$ ). Чему равна массовая доля хлора в насыщенной при этой температуре хлорной воде?

*Решение.* 1) Растворимость газа выражается объемом, приведенным к нормальным условиям. Поэтому вначале вычисляем массу хлора в растворе, имея в виду, что его молярная масса равна 71 г/моль:

$$m = n \cdot M = \frac{V \cdot M}{V_m} = \frac{300 \cdot 71}{22400} = 0,95 \text{ г}$$

2) Масса раствора составляет  $100 + 0,95 = 100,95$  г, следовательно, массовая доля хлора в нем равна:

$$\omega = \frac{0,95}{100,95} \cdot 100 = 0,94 \%$$

Растворимость вещества зависит от его состава, строения и свойств, а также от состава, строения и свойств растворителя.

Вещество считается хорошо *растворимым* при концентрации его насыщенного раствора  $>0,1$  моль/л, *малорастворимым* при концентрации от 0,001 до 0,1 моль/л и практически *нерастворимым* при концентрации его насыщенного раствора менее 0,001 моль/л. Соответствующие данные приведены в справочнике (таблица ), в котором хорошо растворимые вещества обозначены, как принято в химии, буквой **р**, малорастворимые – **м** и практически нерастворимые – **н**. Символ  $\infty$  обозначает неограниченную нерастворимость, а прочерк – невозможность получения вещества в водном растворе вследствие его неустойчивости или гидролиза.

Из таблицы справочника следует, что в воде растворимы все нитраты, нитриты и ацетаты. Растворимы все хлориды, бромиды и йодиды, кроме соответствующих соединений серебра и свинца. Все сульфаты растворимы, кроме сульфатов кальция, стронция, бария, серебра и свинца. Растворимы все соли натрия, калия и аммония. В воде растворимы все кислоты, кроме кремниевой и сероводородной.

К нерастворимым веществам относятся все основания, кроме щелочей и  $\text{NH}_4\text{OH}$ , а из солей – карбонаты, сульфиды, фосфаты и силикаты, за исключением соответствующих солей щелочных металлов.

На растворимость веществ влияет температура.

У большинства твёрдых и жидких веществ растворимость при повышении температуры увеличивается, а у всех газообразных – уменьшается. Поэтому при кипячении воды из неё можно удалить все растворённые газы.

На растворимость газообразных веществ влияет давление, причём, **растворимость газа пропорциональна его давлению**. Растворимость твердых и жидких веществ от давления практически не зависит.

#### 4. Электролитическая диссоциация

*Электролитами* называются вещества, которые в растворах проводят электрический ток. К электролитам относятся кислоты, основания и соли. При растворении в воде они распадаются на ионы, движение которых обеспечивает электропроводность растворов этих веществ. Распад электролитов на ионы при растворении их в воде называется *электролитической диссоциацией*.

Основные положения теории электролитической диссоциации были разработаны Аррениусом (1887) и сводятся к следующему.

1. Электролиты при растворении в воде диссоциируют на ионы – частицы с положительным (катионы) и отрицательным (анионы) зарядом. Ионы могут быть простыми ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  и т.д.) и сложными ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и т.д.). Название «ион» в переводе с греческого означает «странствующий»: в растворе ионы беспорядочно передвигаются («странствуют») в различных направлениях.

2. Под действием электрического тока движение ионов становится направленным: катионы движутся к катоду, анионы – к аноду.

3. Диссоциация – обратимый процесс, поэтому в схемах диссоциации вместо знака равенства ставится знак обратимости. Схема диссоциации электролита, состоящего из катионов (К) и анионов (А), в кратком виде записывается так:



Позднее было установлено, что многие электролиты (они называются сильными электролитами) диссоциируют необратимо. В схемах электролитической диссоциации сильных электролитов ставится знак равенства.

Теория электролитической диссоциации согласуется с атомно-молекулярным учением, строением атомов и результатами экспериментальных исследований.

Теория Аррениуса не объясняет механизма электролитической диссоциации. Причину и механизм электролитической диссоциации объяснили российские химики И.А. Каблуков и В.А. Кистяковский (1890–1891), которые опирались на химическую теорию растворов Менделеева.

Легче всего и нацело (необратимо) диссоциируют вещества, состоящие из ионов. При их растворении полярные молекулы воды (диполи) притягиваются к поверхностным ионам вещества, ориентируясь по отношению к ним противоположно заряженными полюсами. Из-за этого взаимодействие между ионами ослабляется, происходит разрыв химических связей между ними, и ионы переходят в раствор в гидратированном состоянии (рис. 1).

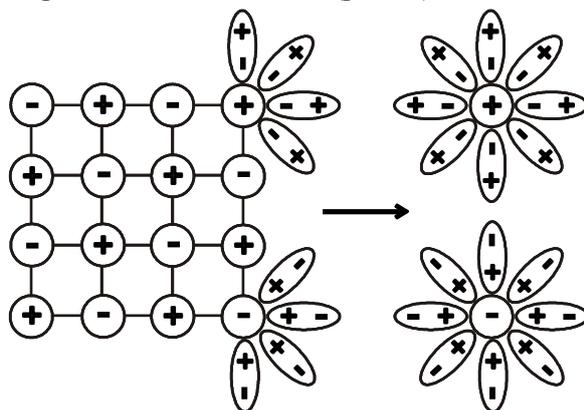


Рис. 1. Схема электролитической диссоциации ионного соединения в водном растворе

Ослабление химической связи между ионами определяется диэлектрической проницаемостью растворителя. *Диэлектрическая проницаемость* показывает, во сколько раз взаимодействие между зарядами в данной среде меньше, чем в вакууме. Для воды значение диэлектрической проницаемости очень велико ( $\epsilon = 81$ ), поэтому ослабление связи происходит настолько, что для распада на отдельные ионы достаточно энергии теплового движения молекул.

Несколько иной механизм диссоциации электролитов, молекулы которых образованы ковалентно-полярными связями. В этом случае диполи воды ориентируются вокруг каждой полярной молекулы растворимого вещества. В результате происходит дополнительная поляризация связи, полярная молекула превращается в ионную, которая легко распадается на гидратированные ионы (рис. 2).

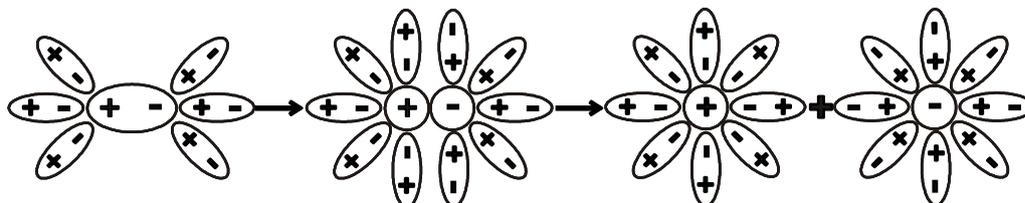


Рис. 2. Схема электролитической диссоциации полярных молекул в водном растворе

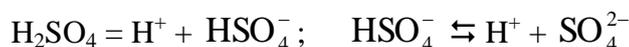
Доказано, что в водных растворах электролитов существуют только гидратированные ионы, свободных ионов нет. Совокупность молекул воды, окружающих ион, называется его гидратной оболочкой. Наличие гидратных оболочек у ионов затрудняет их обратное соединение – ассоциацию.

**Пример 24.** Напишите схемы диссоциации: 1) кислот  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 2) щелочей  $\text{KOH}$  и  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , 3) нормальных солей  $\text{K}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CaCl}_2$ , 4) кислой соли  $\text{NaHCO}_3$  и основной соли  $\text{ZnOHCl}$ .

Решение. 1) Азотная кислота является одноосновной кислотой и относится к сильным электролитам, поэтому она диссоциирует в одну ступень необратимо:



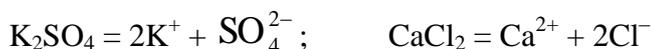
Серная кислота тоже является сильным электролитом, но, в отличие от азотной, она двухосновная, поэтому её диссоциация идёт в две ступени, причём первая ступень необратима, а вторая – обратима:



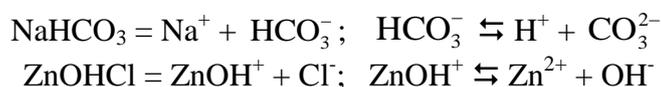
2) Аналогично диссоциируют щёлочи: гидроксид калия – в одну ступень, а гидроксид бария – в две:



3) Нормальные соли – сильные электролиты, они диссоциируют в одну ступень независимо от состава, поэтому



4) Кислые и основные соли диссоциируют ступенчато – необратимо на первой ступени и обратимо на последующих:



## 5. Степень электролитической диссоциации

Для количественной характеристики обратимого процесса электролитической диссоциации используются несколько показателей; мы рассмотрим один из них: степень диссоциации.

*Степень электролитической диссоциации* ( $\alpha$ ) показывает, какая доля от общего количества электролита распадается на ионы. Её выражают в долях от единицы или в процентах. Численное значение  $\alpha$  варьируется в широких пределах от нуля (неэлектролиты) до 1 (или 100 %) в случае полной диссоциации электролита.

Степень диссоциации зависит от природы электролита и растворителя, от концентрации и температуры раствора. Существует классификация электролитов по степени электролитической диссоциации, которую ввёл Аррениус.

Электролиты, у которых в децимолярном растворе при 25 °С степень диссоциации  $\alpha > 0,03$  ( $> 3\%$ ), называются *сильными*. К ним относятся почти все растворимые соли, все щелочи и ряд кислот: HCl, HBr, HI, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HClO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub>, HMnO<sub>4</sub> и др.

Электролиты, для которых в тех же условиях  $\alpha < 0,03$  ( $< 3\%$ ), называются *слабыми*. Это гидроксид аммония NH<sub>4</sub>OH, пероксид водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, кислоты H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, HCN, HClO, HBrO, HIO, CH<sub>3</sub>COOH и некоторые растворимые соли: HgCl<sub>2</sub>, Hg(CN)<sub>2</sub>, Fe(SCN)<sub>3</sub>.

Иногда в особую группу выделяют электролиты средней силы со степенью диссоциации в тех же условиях от 0,03 до 0,3 (3–30%). Это кислоты HNO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, HF, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, HCOOH, H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, HClO<sub>2</sub>.

Эта классификация является условной по следующим причинам.

1. Степень диссоциации зависит от природы растворителя. Например, соли (сильные электролиты в водных растворах) в органических растворителях бывают слабыми электролитами и даже неэлектролитами.

2. Степень диссоциации слабого электролита зависит от концентрации. Например, степень диссоциации азотистой кислоты равна 2,3% (1 М), 7,1% (0,1 М), 22,6% (0,01 М), 71,4% (10<sup>-3</sup> М) и т.д. вплоть до 100%. Иными словами, слабые электролиты в очень разбавленных растворах становятся сильными.

Поэтому электролиты сравнивают по степени их электролитической диссоциации при одинаковой концентрации раствора – 0,1 М.

## 6. Ионная теория кислот и оснований

Представление о кислотах как о своеобразном типе химических соединений возникло ещё во времена алхимии: термин «кислота» происходит от лат. «acidum» (кислый вкус) или «acetum» (уксус). Так же давно было установлено существование соединений, обладающих противоположными свойствами; их получали из коры растений (арабск. «alcali») и называли щелочами.

Автором первой теории кислот был Лавуазье, согласно которой кислота – это кислородсодержащее соединение, и общие свойства кислот объясняются присутствием в них кислорода. Теория Лавуазье была признана неверной после изучения соляной (HCl) и других кислот (HI, HCN), которые не содержат кислорода.

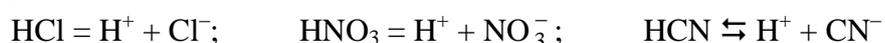
В результате многочисленных исследований, проведенных Дэви, Гей-Люсаком, Либихом и др., химики пришли к выводу, который чётко сформулировал Либих, что кислотой следует считать соединение, содержащее водород, который может быть замещён на металл.

Представления о кислотах и основаниях изменились с появлением теории электролитической диссоциации Аррениуса. Сформулированные в ней понятия кислоты и основания используются до настоящего времени в виде ионной теории кислот и оснований.

**Кислоты.** Характерные свойства кислот, которые проявляются в водных растворах (кислый вкус, изменение цвета индикаторов, взаимодействие с основаниями с образованием соли и воды и т.д.), в ионной теории объясняются присутствием в растворах *катионов водорода*. Если их нет, то и кислотные свойства не проявляются. Например, сухой хлороводород на лакмус и на металлы не действует. Поэтому в ионной теории **кислоты** определяются как **электролиты, диссоциирующие с образованием катионов водорода и анионов кислотных остатков**.

Кислоты подразделяются на сильные и слабые. Сильные диссоциируют необратимо, слабые – обратимо. Среди бескислородных кислот сильными являются хлороводородная (соляная) HCl, бромоводородная HBr и иодоводородная HI. Другие бескислородные кислоты – слабые: HF, H<sub>2</sub>S, HCN. Среди кислородосодержащих кислот сильными являются азотная HNO<sub>3</sub>, серная H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, хлорная HClO<sub>4</sub>, хлорноватая HClO<sub>3</sub>, хромовая H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> и марганцевая HMnO<sub>4</sub>. Остальные кислородосодержащие кислоты – слабые; приводим их формулы без названий: HNO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, HClO<sub>2</sub>, HClO, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH.

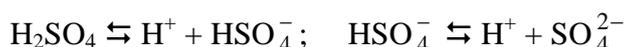
Одноосновные кислоты диссоциируют в одну ступень, причём, сильные необратимо, а слабые – обратимо, например:



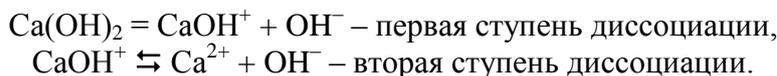
Двухосновные и многоосновные слабые кислоты диссоциируют обратимо по всем ступеням, причём, степень диссоциации на каждой последующей степени резко уменьшается по сравнению с предыдущей:



Сильная двухосновная серная кислота диссоциирует в две ступени: по первой – необратимо, а по второй – обратимо:

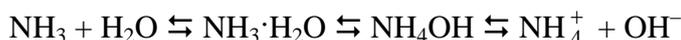


**Основания.** Характерные свойства оснований в водных растворах (своеобразный «мыльный» вкус, взаимодействие с кислотами с образованием солей, способность изменять цвета индикаторов иначе, чем изменяют кислоты) объясняется присутствием в них гидроксид-ионов. Поэтому в ионной теории **основания – это электролиты, диссоциирующие в растворах с отщеплением гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$** , например:



Сила оснований определяется их растворимостью и полнотой электролитической диссоциации. Имеется точное число (11) сильных оснований, которые хорошо растворяются в воде и диссоциируют практически нацело. Это гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов: LiOH, NaOH, KOH, RbOH, CsOH, FrOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, Sr(OH)<sub>2</sub>, Ba(OH)<sub>2</sub>, Ra(OH)<sub>2</sub>, а также гидроксид талия (I) TlOH. Они называются *щелочами*.

Растворимое основание гидроксид аммония – слабое. Гидроксид аммония образуется и диссоциирует при растворении аммиака в воде в результате протекания, как считалось раньше, следующих обратимых процессов:



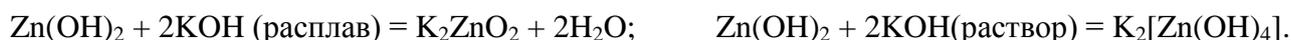
Но в последние годы экспериментально установлено, что молекул  $\text{NH}_4\text{OH}$  не существуют, а ионы  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{OH}^-$  образуются в результате электролитической диссоциации непосредственно гидрата аммиака  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Все остальные основания – малорастворимые или практически нерастворимые в воде вещества – являются слабыми электролитами.

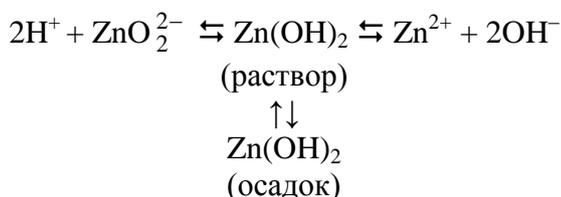
**Амфотерные основания.** Многие малорастворимые и практически нерастворимые основания взаимодействуют с образованием соли и воды не только с кислотами, но и со щелочами (именно со щелочами, а не с любыми основаниями). Такие основания называются *амфотерными* (двойственными). Например, гидроксид цинка, взаимодействующий с кислотами:



взаимодействует и со щелочами: с расплавленными щелочами он образует оксоцинкаты, а с растворами щелочей – комплексные гидроксоцинкаты:



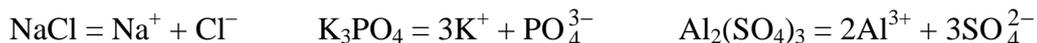
Двойственная природа амфотерных оснований связана с тем, что в водных растворах они диссоциируют одновременно по типу основания и по типу кислоты. Например, схема равновесия (суммарного, учитывающего две ступени диссоциации) в растворе гидроксида цинка такова:



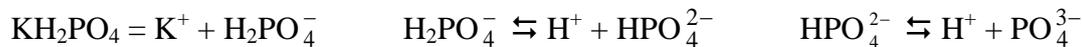
Существует разделение оснований на сильноамфотерные и слабоамфотерные. К сильноамфотерным обычно относят те основания, которые взаимодействуют с разбавленными растворами щелочей. Это Be(OH)<sub>2</sub>, Zn(OH)<sub>2</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>, Ga(OH)<sub>3</sub>, Sn(OH)<sub>2</sub>, Pb(OH)<sub>2</sub>, Cr(OH)<sub>3</sub>, Sb(OH)<sub>3</sub> и др. К слабоамфотерным относят те основания, которые взаимодействуют с концентрированными растворами и расплавами щелочей: Cu(OH)<sub>2</sub>, Mn(OH)<sub>2</sub>, Fe(OH)<sub>2</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub>, Mn(OH)<sub>3</sub>, Au(OH)<sub>3</sub> и др.

**Соли.** В ионной теории соли рассматриваются как **электролиты, которые в водных растворах диссоциируют на катионы металлов (или аммония) и анионы – кислотные остатки.**

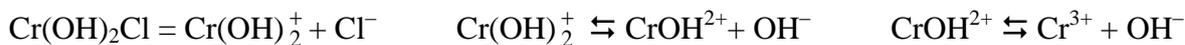
Средние (нормальные) соли, как правило, являются сильными электролитами и диссоциируют в одну ступень независимо от числа ионов, входящих в формальную единицу вещества:



Кислые соли диссоциируют ступенчато. На первой (необратимой) ступени образуются катионы металла и гидроанионы, а на последующих ступенях гидроанионы диссоциируют с отрывом катионов водорода, например:



Также ступенчато диссоциируют основные соли, например:



Первая ступень диссоциации кислых и основных солей протекает практически необратимо, а последующие – обратимо. Поэтому концентрация  $\text{H}^+$ -ионов в растворах кислых солей и  $\text{OH}^-$ -ионов в растворах основных солей невелика. В некоторых случаях, например при написании ионных уравнений (см. п. 5), диссоциация гидроанионов и гидроксокатионов не учитывается.

Ионная теория применима для водных растворов, а в связи с тем, что водные растворы широко применяются в химии и химической технологии, эта теория сохраняет своё первостепенное значение.

На основе ионной теории разработана классификация неорганических соединений.

Большим достижением ионной теории является объяснение постоянства теплового эффекта реакций нейтрализации. Это явление объясняется тем, что все процессы нейтрализации сводятся к одной реакции:

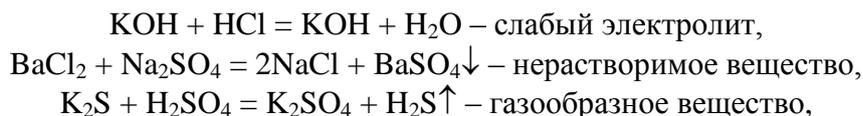


Многие кислоты используются в качестве катализаторов. Каталитические свойства кислот ионная теория кислот и оснований объясняет высокой подвижностью катионов водорода.

## 7. Ионообменные реакции

В растворах электролитов реакции осуществляются между ионами. Если такие реакции сопровождаются изменением степени окисления элементов, то они называются окислительно-восстановительными, а если степени окисления не изменяются, то *ионообменными* или, для краткости, *ионными*. К таким реакциям относятся взаимодействия кислот с основаниями (основно-кислотные реакции), кислот и щелочей с солями, солей с солями, реакции гидролиза.

Практически необратимо идут такие ионообменные реакции, в которых образуются слабые электролиты, осадки малорастворимых и практически нерастворимых веществ и газообразные соединения:

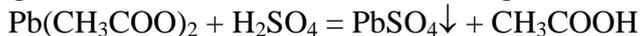


Кроме этих простых ионообменных реакций, часто встречаются более сложные реакции:

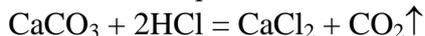
– образование слабого электролита и газообразного соединения одновременно:



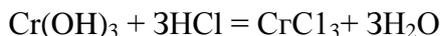
– образование нерастворимого соединения и слабого электролита одновременно:



– разложение нерастворимого вещества с образованием газа:



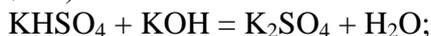
– взаимодействие амфотерных оснований с кислотами:



– взаимодействие амфотерных оснований со щелочами:



– получение нормальных (средних) солей из кислых:



– получение нормальных (средних) солей из основных:



К ионообменным относятся также реакции гидролиза солей, которые рассматриваются в п 14.

Уравнения ионообменных реакций, кроме обычного вида, записываются в ионном виде, в котором из него исключаются ионы, которые не связываются в молекулы слабых электролитов, нерастворимых и газообразных веществ. Ионные уравнения ценны тем, что точнее отображают сущность реакций. Обычно одно такое уравнение соответствует нескольким молекулярным.

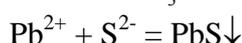
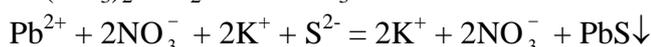
Рекомендуется следующая последовательность составления ионных уравнений:

1. Записывается уравнение реакции в молекулярном виде.
2. Уравнение повторяется, но сильные электролиты записываются в виде тех ионов, на которые они диссоциируют с учётом их числа в формуле и коэффициента перед формулой вещества.
3. Из уравнения исключаются (сокращаются) «неработающие» ионы, после чего записывается ионное уравнение в окончательном, кратком виде.

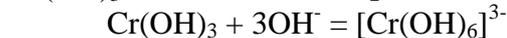
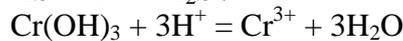
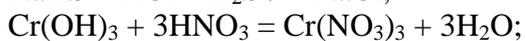
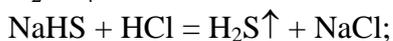
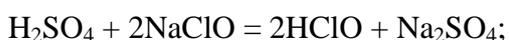
При составлении ионных уравнений необходимо уметь отличать сильные электролиты от слабых и знать, какие вещества при условиях протекания реакций являются газами. Необходимо также иметь «под рукой» таблицу растворимости веществ. При наличии опыта второй этап составления ионного уравнения выполняется «в уме», то есть после молекулярного сразу же записывается краткое ионное.

**Пример 35.** Напишите молекулярные и ионные уравнения следующих реакций: 1) нитрата свинца (II) с сульфидом калия; 2) гидросульфида натрия с соляной кислотой 3) гидроксида хрома (III) с азотной кислотой. 54 гидроксида хрома (III) с гидроксидом калия.

*Решение.* Для первой реакции показываем всю последовательность составления ионного уравнения:



Для остальных реакций второй этап выполняем «в уме» и окончательное краткое уравнение реакции записываем сразу же после молекулярного:



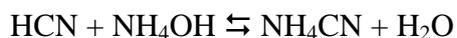
## 8. Гидролиз солей

Гидролизом («гидро» – вода, «лиз» – разложение) называются реакции ионообменного разложения веществ водой. Гидролиз возможен для различных неорганических и органических соединений, однако в неорганической химии он наиболее характерен для солей.

Гидролиз соли является результатом взаимодействия ионов соли с молекулами воды. Некоторые катионы разрывают молекулы воды по связи Н–ОН, присоединяют гидроксид-анионы, а катионы водорода остаются при этом в растворе. Анионы, наоборот, присоединяют катионы водорода, а в растворе остаются ОН<sup>-</sup>-ионы. Появление в растворе ионов Н<sup>+</sup> или ОН<sup>-</sup> приводит к изменению среды раствора.

Реакции гидролиза солей обратны реакциям нейтрализации слабых кислот и оснований.

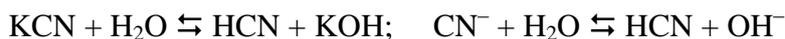
При взаимодействии сильных кислот со щелочами происходит полная нейтрализация этих веществ и среда становится нейтральной. Но при взаимодействии слабых электролитов полная нейтрализация невозможна. Например, взаимодействие циановодородной кислоты с гидроксидом аммония (см. гл. 5) обратимо; обратная реакция цианида аммония с водой как раз и является реакцией гидролиза этой соли:



По типу гидролиза соли подразделяются на четыре группы.

1. Соли образованы сильными основаниями (щелочами) и сильными кислотами: NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и т.д. Катионы и анионы этих солей с водой практически не взаимодействуют. Следовательно, такие соли гидролизу не подвергаются и растворы таких солей имеют нейтральную среду.

2. Соли образованы сильными основаниями (щелочами) и слабыми кислотами:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KCN}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  и т.д. Гидролиз этих солей идёт *по аниону* с образованием слабых кислот, и среда раствора становится щелочной:



3. Соли образованы слабыми основаниями и сильными кислотами:  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  и т.д. Гидролиз таких солей идёт *по катиону* с образованием слабого основания, а среда раствора становится кислой:



4. Соли образованы слабыми основаниями и слабыми кислотами:  $\text{NH}_4\text{CN}$ ,  $\text{Al}(\text{CH}_3\text{COO})_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{S}_3$  и т.д. Такие соли гидролизуются *по катиону и по аниону* одновременно с образованием слабого основания и слабой кислоты, например:

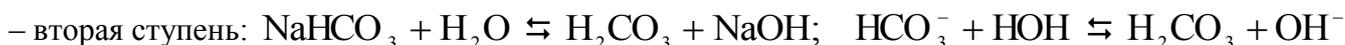


Среда растворов этих солей зависит от силы образующихся основания и кислоты: если основание имеет большее значение константы диссоциации, то среда будет щелочной, а если кислота – то кислотной.

У солей, заряды ионов которых больше единицы, гидролиз протекает ступенчато. При этом на первой ступени образуются кислые (при гидролизе по аниону) или основные (при гидролизе по катиону) соли, которые могут подвергаться дальнейшему взаимодействию с водой. Однако вторая и последующие ступени гидролиза при обычных условиях выражены настолько слабо, что их можно не принимать во внимание.

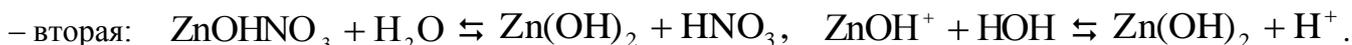
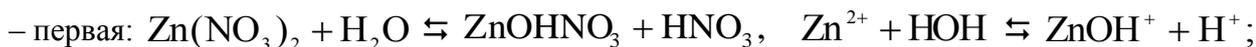
**Пример 36.** Опишите ступенчатый гидролиз карбоната натрия, нитрата цинка и хлорида алюминия.

*Решение.* 1) Гидролиз карбоната натрия теоретически может протекать в две ступени:



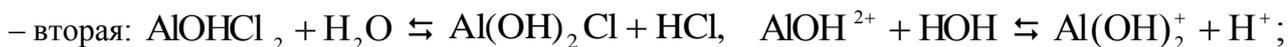
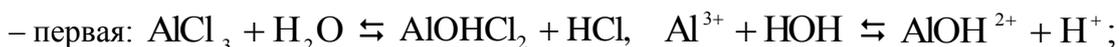
Но вторая ступень гидролиза при обычных условиях практически не идёт и её можно не учитывать. Отсутствие второй ступени гидролиза можно объяснить тем, что накопление в растворе  $\text{OH}^-$ -ионов при гидролизе по первой ступени препятствует их образованию по второй.

2) Гидролиз нитрата цинка также идёт в две ступени:



Но вторая ступень гидролиза практически не идёт. Отсутствие второй ступени гидролиза можно объяснить тем, что накопление в растворе  $\text{H}^+$ -ионов при гидролизе по первой ступени препятствует их образованию по второй.

3) При гидролизе хлорида алюминия возможны три ступени:

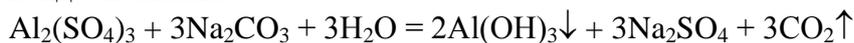


Реально при обычных условиях почти нацело проходит гидролиз по первой ступени и частично по второй, а по третьей ступени гидролиз практически не идёт.

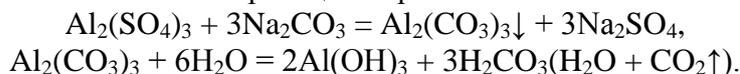
Гидролиз некоторых солей может протекать необратимо. Гидролиз соли протекает необратимо, когда один или оба продукта гидролиза выводятся из реакции: выпадают в осадок или улетучиваются в виде газа, например:



Такие соли невозможно синтезировать в водном растворе. Например, при попытке получения карбоната алюминия взаимодействием растворов сульфата алюминия и карбоната натрия образуется не карбонат, а гидроксид алюминия:



Эту и другие подобные ей реакции можно объяснить протеканием необратимого гидролиза образующегося в результате ионообменной реакции карбоната алюминия:



### 9. Тест для самоконтроля

(ответы приведены в приложении 2)

1. Для реакции, схема которой приведена в молекулярном виде  $\text{NaHCO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$  напишите на черновике краткое ионно-молекулярное уравнение. В ответе укажите округлённую суммарную молекулярную массу ионов в левой части этого уравнения.
2. Напишите на черновике уравнение гидролиза сульфита натрия. В ответе укажите округлённую молекулярную массу соли, образующейся на первой ступени гидролиза.
3. Напишите на черновике уравнение гидролиза сульфата алюминия. В ответе укажите округлённую молекулярную массу соли, образующейся на первой ступени гидролиза.
4. Для реакции совместного гидролиза двух солей  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} =$  напишите формулу вещества, выпадающего в осадок.
5. Установите соответствие между формулой соли и средой её раствора:

*Формула* *Среда*

- |                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| А. $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ | 1) кислая      |
| Б. $\text{NH}_4\text{Cl}$     | 2) щелочная    |
| В. $\text{K}_2\text{S}$       | 3) нейтральная |
| Г. $\text{NaNO}_3$            |                |

Ответ приведите набором четырёх цифр без запятых и пробелов между ними.

### 10. Задачи и упражнения для самостоятельной работы

(ответы приведены в приложении 2)

1. Для насыщения 250 мл воды поваренной солью при 20 °С требуется 87,5 г этой соли. Определите коэффициент растворимости  $\text{NaCl}$  в воде при этой температуре.
2. Растворимость сульфата аммония при 20 °С равна 75,4 г в 100 г воды. Определите массовую долю  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  в насыщенном растворе.
3. Какой объем серной кислоты с массовой долей  $\text{H}_2\text{SO}_4$  50,5% и плотностью 1,40 потребуется для приготовления 1,5 л децимолярного раствора этой кислоты?
4. Укажите, какие вещества из числа  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  в водных растворах являются неэлектролитами, слабыми электролитами и сильными электролитами.
5. Напишите схемы электролитической диссоциации сульфата алюминия, гидросульфата кальция, нитрата гидроксицинка.
6. Напишите молекулярные и ионные уравнения реакций гидроксида хрома (III) с серной кислотой и гидроксидом калия.
7. К раствору карбоната натрия прилили раствор: а) хлорида натрия; б) гидроксида натрия; в) хлороводородной кислоты; г) хлорида кальция. Напишите молекулярные и ионные уравнения возможных реакций.
8. Укажите вещества из числа  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{SiCl}_4$ , у которых происходит гидролиз при их растворении в воде. Напишите уравнения реакций гидролиза в молекулярном и ионном виде и укажите среду растворов.
9. Укажите соли из числа  $\text{KCl}$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ , при гидролизе которых образуются основные соли. Напишите уравнения реакций гидролиза в молекулярном и ионном виде и укажите среду растворов.
10. Укажите соли из числа  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , при гидролизе которых образуются кислые соли. Напишите уравнения реакций гидролиза в молекулярном и ионном виде и укажите среду растворов.

## ПРИЛОЖЕНИЕ К ПОСОБИЮ «ВВЕДЕНИЕ В ХИМИЮ»

### Дополнительные упражнения

1. Приведите названия и напишите структурные формулы оксидов  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Покажите уравнениями реакций основные свойства первого оксида, кислотные – второго и амфотерные – третьего.
  2. Напишите обычные и структурные формулы гидроксидов кальция и хрома (III). Какой из них относится к основным, а какой – к амфотерным? Ответ иллюстрировать уравнениями реакций.
  3. Напишите обычные и структурные формулы фтороводородной, сероводородной, серной, сернистой и ортофосфорной кислот. Указать их основность и написать схемы их электролитической диссоциации.
  4. Напишите формулы солей, имеющих названия: а) хлорат натрия; б) гидросульфит аммония; в) нитрат дигидрохрома (III); г) сульфат оксотитана (IV); д) декагидрат карбоната натрия.
  5. Напишите уравнения реакций, с помощью которых можно перевести: а) кислую соль  $\text{Ba}(\text{HSO}_4)_2$  в нормальную соль  $\text{BaSO}_4$ ; б) основную соль  $\text{Fe}(\text{OH})\text{Cl}$  в нормальную соль  $\text{FeCl}_2$ .
- Напишите уравнения реакций для осуществления следующих цепочек превращений:
- а)  $\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$
  - б)  $\text{S} \rightarrow \text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{K}_2\text{ZnO}_2 \rightarrow \text{ZnCl}_2$

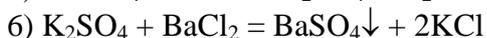
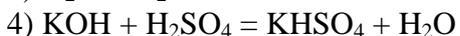
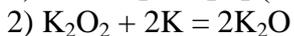
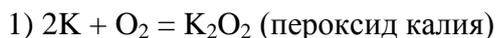
### Ответы к тесту для самоконтроля

Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номер ответа	2	4	3	3	2	3	4	3	4	3

### Ответы к упражнениям

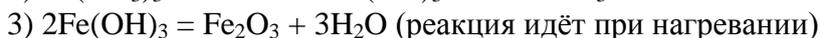
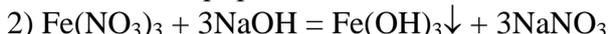
1. Оксиды:  $\text{MgO}$  – оксид магния;  $\text{N}_2\text{O}_5$  – оксид азота (V), азотный ангидрид. Основания:  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  – гидроксид свинца (II),  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – гидроксид железа (III). Кислоты:  $\text{H}_2\text{CO}_3$  – угольная кислота,  $\text{H}_2\text{S}$  – сероводородная кислота. Соли:  $\text{CaSO}_4$  – сульфат кальция,  $\text{CaCl}_2$  – хлорид кальция,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  – гидрофосфат натрия,  $\text{KHCO}_3$  – гидрокарбонат калия,  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  – хлорид гидроксимагния.

2.

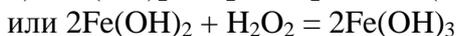
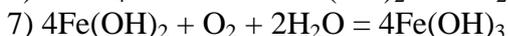
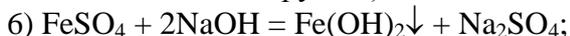


3.

1)  $\text{Fe} + 4\text{HNO}_3 = \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$  (используется азотная кислота с массовой долей  $\text{HNO}_3$  25 %, т.к. в концентрированной кислоте железо пассивируется)

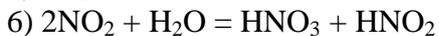


5)  $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{разб}) = \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\uparrow$  (используется разбавленная серная кислота, т.к. в концентрированной железо пассивируется)



8)  $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{KOH}(\text{конц}) = \text{KFeO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  (гидроксид железа (III) – слабоамфотерное основание, поэтому избытка щёлочи не должно быть).

4.



5. Осушитель должен поглощать пары воды и не взаимодействовать с осушаемым газом. Углекислый газ  $\text{CO}_2$  – кислотный оксид (кислотные оксиды взаимодействуют со щелочами, но не взаимодействуют с кислотами и кислотными оксидами), поэтому для сушки углекислого газа серную кислоту и фосфорный ангидрид можно использовать, а гидроксид натрия – нельзя.