

Часть 1

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ**



# ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ХИМИИ

Изучив материал этой главы, студенты должны:

- **Знать** общие принципы структуры вещества, количественный смысл уравнений химических реакций, понятие «количество вещества», законы идеальных газов.
- **Уметь** рассчитывать относительные молекулярные массы веществ, состав газовых смесей и количество вещества газов; проводить расчеты по уравнениям химических реакций.

## § 1.1. ВЕЩЕСТВО. МАТЕРИАЛЫ. ВЕЩЕСТВА В ЛЕКАРСТВАХ

Понятие «вещество» охватывает все, что составляет объекты, которые человек может видеть, обрабатывать, исследовать, использовать в повседневной жизни. В целенаправленно произведенных изделиях (одежда, посуда, мебель, детали машин, инструменты, стены домов, печатные издания и т.д.) вещество называют материалом. Кроме обобщающего понятия «вещество», есть и конкретные вещества, различающиеся составом, строением и производными от этого свойствами. Материал очень часто представляет собой сочетание (смесь, сплав, композицию) нескольких веществ. Металл лопаты состоит из железа и углерода, металл колокола — из меди и олова, пряжа — из определенных разновидностей волокон, кирпич — из песка и

глины, таблетки кардиомагния — из ацетилсалициловой кислоты и гидроксида магния и т.д.

Ткани животных и растений тоже образованы материалами с разными разнообразными свойствами: прочный материал костей, стекловидное тело глаза, шерстяной покров, береста. Ближе к абстрактному понятию «вещество» относятся объекты, которым не придано конкретной формы изделия: вода в чайнике; поваренная соль, питьевая сода, крахмал в стеклянных банках; растительное масло в бутылки, моющий порошок в коробке; слиток золота; кубики льда; кислород в баллоне; порошок лекарства в ампуле и т.д.

**Веществами называются твердые, жидкие и газообразные тела с постоянным составом и свойствами, образующие конкретные предметы или не имеющие определенной формы.**

Поскольку слово «вещество» может употребляться с различными смысловыми оттенками, в химии часто приходится применять термин *«индивидуальное вещество»*, которым подчеркивается, что конкретный образец вещества действительно состоит только из одного вещества и не является смесью. В фармации действующее начало лекарственного средства часто называют *субстанцией*. Отдельно взятая субстанция представляет собой индивидуальное вещество.

Вещества можно включать во всевозможные смеси, простейшей разновидностью которых являются *механические смеси*. Внеся случайно какое-то количество соли в банку с сахаром, мы получим механическую смесь, которую придется выбросить (ложка дегтя испортит бочку меда). Это не означает, что смеси всегда вредны. Часто их готовят специально в качестве того или иного материала (смесь цемента, песка и воды для строительства). Однако для изучения свойств вещества необходимо его получить в индивидуальном состоянии.

Другой разновидностью смесей являются растворы или однородные смеси. От индивидуального вещества раствор отличается переменным составом, что влечет за собой и переменные свойства. Растворив в двух одинаковых порциях воды 1 и 4 ложки сахара (сахарозы), получим два раствора, различающихся по целому ряду свойств, из которых наиболее легко определяемое в данном случае — вкус.

С научной точки зрения не следует подменять понятие «индивидуальное вещество» понятием «чистое вещество», хотя в разговоре это допустимо. Одна из химических истин состоит в том, что любой реальный образец вещества содержит примеси. Получить абсолютно чистое вещество невозможно.

Это утверждение можно рассматривать в качестве закона химии. Даже наиболее тщательно очищенные высококачественные продукты химической промышленности все же содержат примеси, т.е. малые количества разных посторонних веществ. Они случайным образом распределяются в объеме жидкого вещества, кристаллов или газа, образуя по существу растворы. Содержат примеси и те образцы вещества, которые называют индивидуальным веществом. В этом случае содержание примесей настолько низкое, что они не проявляют себя в большинстве свойств вещества. Однако высокие технологии (электроника, ядерная техника, биотехнология) могут предъявлять столь высокие требования к чистоте вещества, реализовать которые еще не удалось.

Вещества, выпускаемые химической промышленностью, называются *химическими реактивами*. По содержанию примесей их подразделяют на несколько сортов, или *квалификаций* (табл. 1.1). На рисунке 1.1 представлен реактив в заводской упаковке. Обратим внимание на то, что на этикетке, кроме названия реактива и характеристик качества, есть указание: ядовит.

Все вещества в той или иной мере ядовиты и могут представлять опасность для здоровья и жизни. Безвредными можно считать лишь немногие вещества, — например, воду и поваренную соль. Если вещество вызывает отравление в количестве менее 1 г или действует не только после приема внутрь, но и попадая на кожу, оно представляет собой серьезную опасность, о чем есть предупреждение на этикетке.

**Таблица 1.1.** Качество химических реактивов

| Квалификация       | Обозначение | Содержание основного вещества, количество частей на 1000 частей по массе |
|--------------------|-------------|--|
| Технический        | т           | —  |
| Чистый             | ч           | Не менее 980   |
| Чистый для анализа | чда         | Не менее 990   |
| Химически чистый   | хч          | Более 990  |
| Особо чистый       | осч         | Более 999  |

Каждое индивидуальное вещество характеризуется постоянным составом и комплексом свойств, которые можно подразделить на физические и химические. Под физическими свойствами подразумевается внешний вид вещества, условия его перехода в различные агрегатные состояния (кристаллическое, жидкое, газообразное) и многочисленные константы, которые поддаются измерению прибо-



Калий двуххромовоокислый хч  
 $K_2Cr_2O_7$  0,25 кг  
 Показатели качества, %

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Содержание $K_2Cr_2O_7$ | 99,9  |
| Нерастворимые примеси   | 0,002 |
| Хлориды (Cl)            | 0,002 |
| Сульфаты ( $SO_4$ )     | 0,01  |
| Кальций (Ca)            | 0,002 |
| Натрий (Na)             | 0,02  |

**ядовит**

Рис. 1.1. Химический реактив в склянке с надписью на этикетке

рами: плотность, электрическая проводимость, магнетизм, спектры поглощения света, температуры плавления и кипения, вязкость, твердость и т.д.

Под химическими свойствами вещества подразумевается его способность превращаться в новые вещества при взаимодействии с другими веществами, а также при изменении условий нахождения вещества (температура, давление, воздействие излучений). Особой разновидностью химических свойств веществ является их биологическое действие. Сюда относятся ядовитость в отношении разных видов организмов, мутагенность, терапевтическое действие.

Получение новых веществ в результате химических превращений, всестороннее изучение их свойств, отбор веществ, перспективных для практического применения, в том числе и в виде лекарственных средств, являются главнейшими задачами химии.

## Вопросы и упражнения

1. Что называется веществами?
2. Приведите 2–3 названия неорганических веществ, применяемых в качестве лекарств.
3. Как, не используя никаких приспособлений, кроме обычного стекла, установить наличие примесей в водопроводной воде?
4. Приведите примеры: а) механических смесей; б) растворов; в) индивидуальных веществ.
5. Что называется химическим реактивом?
6. Что подразумевается под физическими и химическими свойствами вещества?

## § 1.2. АТОМЫ И ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Вещество характеризуется многоуровневой структурой, которую можно представить в виде следующей пирамиды:

### Субатомные частицы:

протон —  $p^+$ , нейтрон —  $n^0$ , электрон —  $e^-$



### Атомы:

водород — H, гелий — He, литий — Li, бериллий — Be, бор — B,  
углерод — C, азот — N, кислород — O, фтор — F, натрий — Na,  
магний — Mg, алюминий — Al, кремний — Si, фосфор — P,  
сера — S, хлор — Cl, аргон — Ar, калий — K, кальций — Ca,  
скандий — Sc, титан — Ti, ванадий — V, хром — Cr,  
марганец — Mn, железо — Fe

и т.д. — **всего около 118 химических элементов**



### Вещества (молекулы и другие многоатомные структуры):

Водород (диводород) —  $H_2$ , кислород (дискислород) —  $O_2$ ,  
озон (трикислород) —  $O_3$ , фосфор (тетрафосфор) —  $P_4$ ,  
сера (октасера) —  $S_8$ , хлор (дихлор) —  $Cl_2$ , хлороводород — HCl,  
хлорид натрия — NaCl, оксид углерода (II) — CO,  
вода —  $H_2O$ , гидроксид натрия — NaOH, аммиак —  $NH_3$ ,  
оксид углерода (IV) —  $CO_2$ , оксид азота (I) —  $N_2O$ ,  
метан —  $CH_4$ , этилен —  $C_2H_4$ , сульфат магния —  $MgSO_4$ ,  
перманганат калия —  $KMnO_4$ , глюкоза —  $C_6H_{12}O_6$ ,  
фосфат кальция —  $Ca_3(PO_4)_2$ , этанол —  $C_2H_5OH$ ,  
цитрат натрия —  $C_6H_5O_7Na_3$ ,  
сульфат тетраамминмеди (II) —  $[Cu(NH_3)_4]SO_4$ ,  
*o*-ацетилсалициловая кислота (аспирин) —  $C_9H_8O_4$ ,  
новокаин —  $C_{13}H_{21}N_2O_2Cl$ , сахароза —  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ,  
витамин  $B_{12}$  —  $C_{63}H_{90}O_{14}N_{14}PCo$ , гемоглобин —  $C_{3032}H_{4816}O_{872}N_{780}S_8Fe_4$   
и т.д. — **практически неограниченное число.**

Особое значение в химии имеет средний уровень этой пирамиды, т.е. атомы, — сохраняющееся начало всех простых и сложных веществ.

**Атом — электронейтральная микрочастица вещества, состоящая из протонно-нейтронного ядра и электронов, движущихся в поле его притяжения.**

В таблице 1.2. приведены свойства частиц, из которых стоят атомы.

Таблица 1.2. Субатомные частицы

| Частица  | Символ | Заряд | Масса, Да | Спин $s$ (вращение) |
|----------|--------|-------|-----------|---------------------|
| Нейтрон  | $n^0$  | 0     | 1,0087    | 1/2                 |
| Протон   | $p^+$  | +1    | 1,0073    | 1/2                 |
| Электрон | $e^-$  | -1    | 0,00055   | 1/2                 |

Главнейшими отличительными характеристиками атома являются заряд ядра и масса. Заряд ядра выражается в единицах заряда протона (+1) и равен числу протонов в ядре. Такое же число электронов с зарядом  $-1$  движется вокруг ядра, так что атом как единая частица электронейтрален. Заряд ядра атома совпадает с атомным номером элемента в таблице Менделеева.

Масса атома определяется главным образом числом тяжелых частиц, каковыми являются протоны и нейтроны. Их массы очень близки между собой.

**Суммарное число протонов и нейтронов в ядре атома называется массовым числом. Оно совпадает с округленной до целого числа атомной массой.**

Удобная единица для выражения массы атома была предложена не сразу. В начале XIX в. Дж. Дальтон принял за единицу массу водорода, самого легкого атома, позднее употреблялась кислородная единица ( $1/16$  массы атома кислорода). С 1961 г. принята *атомная единица массы Дальтон* (Да, международное обозначение — Да), равная  $1/12$  массы атома углерода, содержащего 6 протонов и 6 нейтронов. Соответствующий атом углерода имеет массу — 12 Да. Атом — это микрочастица, и естественно, что его масса в граммах имела бы крайне малое числовое значение. Приведем коэффициенты перехода от атомных единиц массы к граммам и наоборот:

$$6,02 \cdot 10^{23} \text{ Да} = 1 \text{ г, или } 1 \text{ Да} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Эти соотношения можно представить в форме, удобной для подстановки в уравнения при переходе от одних единиц измерения к другим:

$$\begin{aligned} 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Да/г} &= 1; \\ 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г/Да} &= 1. \end{aligned}$$

Практически используется, как правило, относительная атомная масса ( $A_r$ ).

**Относительная атомная масса — это отношение массы данного атома к атомной единице массы.**



Относительная атомная масса (далее в тексте эта величина для краткости называется атомной массой) характеризует как отдельный атом, так и химический элемент, поэтому она приводится в таблице Менделеева.

В учебных расчетах при изучении химии принято использовать значения атомных масс, округленные до ближайших целых чисел.

*Пример 1.1.* Выпишем из таблицы Менделеева атомные массы азота и фтора:  $A_r(\text{N}) = 14,0067$ ;  $A_r(\text{F}) = 18,998403$ . Очевидно, что данные числовые значения можно округлить до 14 и 19; эти значения следует использовать в расчетах.

Зарядом ядра определяется, в конечном счете, химическое поведение атома. Атомы с одинаковым зарядом ядра объединяются под научным понятием *химический элемент*. В процессе развития химии элементы были открыты как не разложимые на составные части вещества, т.е. **простые вещества**. Этим объясняется совпадение названий всех химических элементов (кроме углерода) и простых веществ.

**Химическим элементом называется вид атомов с одинаковым зарядом ядра.**

Атомы с одинаковым зарядом ядра могут различаться между собой по массе, так как число нейтронов в их ядрах может быть разным. Если мысленно взять совершенно одинаковые атомы, как по заряду ядра, так и по массе, они составят особую совокупность — нуклид. Химические элементы в природе чаще представляют собой смесь двух или нескольких нуклидов.

**Разные нуклиды одного и того же химического элемента называются изотопами.**

Изотопы обозначаются символами элементов с нижним индексом слева — атомным номером и верхним индексом — массовым числом.

*Пример 1.2.* Хлор в природе состоит из двух изотопов:  $^{35}_{17}\text{Cl}$  и  $^{37}_{17}\text{Cl}$ . Сколько протонов и нейтронов в ядрах изотопов хлора?

*Решение.* Ядра этих атомов содержат по 17 протонов. Для нахождения числа нейтронов, в соответствии с определением массового числа, следует вычесть нижний индекс из верхнего. Следовательно, в ядре первого изотопа 18 нейтронов, а в ядре второго — 20.

Лишь 19 химических элемента представлены в природе одним нуклидом. К их числу относятся такие широко известные элементы,

как фтор, натрий, алюминий, фосфор, золото. Большинство химических элементов в природе представляют собой смеси изотопов. Например, поваренная соль — NaCl образована атомами натрия, не имеющими изотопов, и двумя природными изотопами атомов хлора.

Сохранение атомов при химических реакциях обусловлено устойчивостью атомных ядер. Однако существуют и неустойчивые ядра, способные самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с одновременным возникновением излучений высокой энергии. Соответствующие изотопы химических элементов называются радиоактивными. Такие изотопы существуют в природе. Тяжелые химические элементы начиная с полония состоят только из радиоактивных изотопов. Для всех остальных элементов радиоактивные изотопы могут быть получены искусственно методами ядерной физики.

Атомы каждого химического элемента могут входить в состав множества разных веществ. Только из кислорода как элемента состоят обычный кислород воздуха  $O_2$  (дискислород) и озон  $O_3$  (трикислород). Кислород наряду с другими элементами входит в состав воды и всех остальных оксидов, гидроксида натрия и прочих гидроксидов, перманганата калия, фосфата кальция, глюкозы, серной кислоты, *o*-ацетилсалициловой кислоты (аспирина) и т.д.

Разнообразию и изменчивости окружающей природы и неисчерпаемые возможности целенаправленного получения не встречающихся в природе и неизвестных ранее веществ связаны с переходами атомов между разными многоатомными структурами и перестройками атомов внутри структур. В этом сущность всех химических превращений. Сами же атомы при этом строго сохраняются и могут лишь изменять свое состояние. Ни при каких химических превращениях атомы не делятся на части и не сливаются в один атом, атом одного элемента не может превратиться в атом другого элемента, не изменяется число атомов каждого элемента. Следствием этого является закон сохранения массы:

**Суммарная масса веществ до химической реакции равна суммарной массе веществ после реакции.**

На факте сохранения атомов основано написание уравнений химических реакций, в которых строго соблюдается равенство числа атомов каждого химического элемента в левой и правой частях уравнения.

Рассмотрим вопрос о причине устойчивости атомных ядер. Начнем с простого примера. Прочность каната можно охарактеризовать силой, необходимой для его разрыва. Под действием силы канат сначала

ла растягивается, и совершается работа против силы сопротивления каната. Таким образом, на разрыв каната затрачивается энергия. С аналогичной ситуацией мы встречаемся, рассматривая атомное ядро. Устойчивость атомного ядра обусловлена особой силой притяжения между частицами — сильным ядерным взаимодействием. Для удаления частицы из ядра необходимо затратить энергию на преодоление данной силы. Эта энергия необычайно велика, ни при каких химических реакциях такое количество энергии не выделяется, так что химические реакции не могут нарушить устойчивость атомных ядер.

Энергия, необходимая для удаления частиц из ядра, когда-то выделилась при образовании этого ядра из свободных протонов и нейтронов. Результат выделения энергии непосредственно проявляется в атомных массах. Атомные массы ряда элементов (кислорода, фтора, натрия, алюминия и др.) немного не дотягивают до ближайшего целого числа. Как это получается, если протоны и нейтроны имеют массы, превышающие 1 Да? Объяснение этого факта сводится к тому, что огромная энергия, выделяющаяся при образовании атомного ядра, уносит заметную долю массы в соответствии с формулой Эйнштейна:

$$E = mc^2.$$

*Пример 1.3.* Алюминий в природе представлен одним нуклидом с массовым числом 27. Но точное значение его атомной массы  $A_r = 26,98154$ . Вычислите *недостаток* атомной массы алюминия.

*Решение.* Атомные массы как протонов, так и нейтронов превышают 1, поэтому суммарная масса 13 протонов и 14 нейтронов заведомо будет больше 27. Найдем суммарную атомную массу частиц, учитывая и массу электронов (данные в табл. 1.2):

$$\Sigma A_r = 13 \cdot 1,0073 + 14 \cdot 1,0087 + 13 \cdot 0,00055 = 27,22385.$$

Недостаток атомной массы  $\Delta A_r = 27,22385 - 26,98154 = 0,24231$ .

На 1 моль (26,98154 г) алюминия, образовавшегося из протонов, нейтронов и электронов, недостаток массы составляет более 242 мг! Эта масса теряется за счет выделения *энергии связи* в образующемся устойчивом атомном ядре.

Величина энергии, выделяющейся при химических реакциях, намного меньше и не может вызвать поддающееся обнаружению изменение массы реагирующих веществ. Поэтому в химии действует эмпирический (установленный на основе эксперимента) закон сохранения массы. Однако если бы, например, практически можно было взвесить 665 т угля с точностью до 0,1 г, сжечь его в соот-

ветствующей точно взвешенной массе кислорода и точно взвесить образовавшийся углекислый газ, то была бы обнаружена такая же убыль массы, как вычислено для 1 моль алюминия.

### Вопросы и упражнения

1. Из каких частиц состоят атомы?
2. Что называется массовым числом?
3. Что происходит с атомами при химических реакциях?
4. В каких единицах измеряется атомная масса?
5. Объясните различие железа как металла и железа как химического элемента.
6. Какая масса серы содержит такое же число атомов, как 7 г кислорода?
7. При электроискровом распылении золота образуются частицы со средним диаметром 0,05 мкм. Сколько атомов золота содержится в такой частице? Плотность золота  $19,3 \text{ г/см}^3$ .

### § 1.3. МОЛЕКУЛЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Самым важным свойством атомов следует считать их способность соединяться между собой с образованием многоатомных структур с неограниченными возможностями усложнения — начиная от двухатомных молекул и до молекул, состоящих из тысяч атомов, а также кристаллических структур, в которых число атомов зависит от величины кристалла и достигает огромных величин. Не соединяются между собой и с атомами почти всех других элементов только атомы благородных газов — элементов группы VIIIА таблицы Менделеева.

**Молекула — частица вещества, состоящая из связанных между собой атомов.**

Между молекулами также действует некоторое притяжение, но сильное притяжение, называемое химической связью, имеется только между атомами внутри молекулы. Из молекул могут состоять как твердые вещества, так и жидкости. Газообразные вещества почти все состоят из молекул, за исключением благородных газов.

Вещества и соответствующие им молекулы изображают формулами, составленными из символов химических элементов и индексов, обозначающих число атомов каждого элемента. Индекс «1» при атомах не ставят. Для последовательности записи элементов в молекуле единого правила нет. Кислород обычно записывают на последнем месте. Водород в кислотах ставят на первое место, а в органических соединениях — после углерода.

Молекулы имеют определенную массу, зависящую от состава.

**Относительная молекулярная масса  $M_r$**  (далее в тексте — молекулярная масса) — это характеристика вещества и составляющих его молекул, представляющая собой отношение массы молекулы к 1 Да.

При соединении атомов в молекулы масса с большой степенью точности сохраняется, поэтому молекулярная масса равна сумме атомных масс:

$$M_r = \sum N A_r, \quad (1.1)$$

где  $N$  — число атомов данного элемента, т.е. индекс в химической формуле.

Молекулы, как и атомы, представляют собой микрочастицы вещества, размеры которых находятся за пределами разрешающей способности микроскопов. Но все же методом дифракции рентгеновских лучей на кристаллах (рентгеноструктурным анализом) точно определяют расположение атомов в твердом веществе, чем и доказывается наличие молекул.

На рисунке 1.2 показана структура твердой воды (льда). Хорошо видно, что к каждому атому кислорода приближены два атома водорода на расстояние 100 пм. Эти два ближайших атома водорода

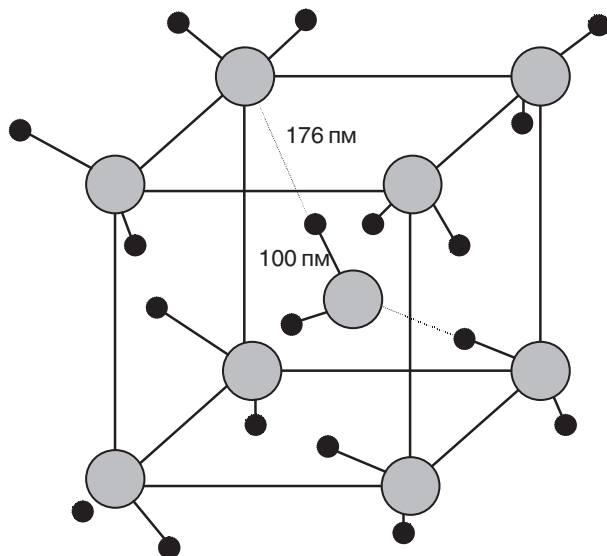


Рис. 1.2. Структура твердой воды

связаны с атомом кислорода, составляя молекулу воды. Следующее по величине расстояние Н–О составляет 176 пм. Между этими атомами прочной связи нет, и они принадлежат разным молекулам. В этом состоит прямое подтверждение существования молекул воды. Кристаллические структуры, образованные молекулами, называются *молекулярными*.

Молекулы изображают с помощью различных моделей и схем (рис. 1.3). Атомы проще всего представить в виде сферических частиц разных размеров (в соответствии с данными исследований). На модели *а* атомы кислорода и водорода изображены в виде соприкасающихся сфер. На модели *б* учтена деформация атомов при их соединении в молекулу. На модели *в* и на рисунке 1.2 радиусы атомных сфер уменьшены по отношению к расстоянию между центрами атомов. Это позволяет лучше видеть расположение атомов в объемной структуре. Линия, соединяющая атомы, означает наличие связи между ними. Схема *г* наиболее условна. Здесь атомы изображены символами элементов. Это так называемая *структурная формула* молекулы. Так изображают все молекулы. В структурной формуле молекулы воды учитывается взаимное расположение атомов кислорода и водорода: согласно результатам исследований, молекула воды *угловая*. Угол между связями О–Н составляет 104,5°.

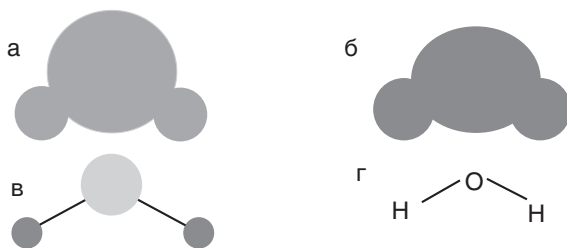


Рис. 1.3. Графическое изображение молекулы

Молекулы, а следовательно, и состоящие из них вещества, характеризуются определенным элементарным составом, который выражают в *массовых долях*. Это отношение массы данного элемента в молекуле к массе молекулы:

$$\omega_i = \frac{N_i A_i}{\sum N_i A_i} \quad (1.2)$$

Поскольку вещество состоит из множества одинаковых молекул, то очевидно, что оно имеет постоянный состав. Однако постоянство состава веществ было установлено на основе химического анализа раньше, чем доказано существование молекул, и стало одним из аргументов в пользу их реальности. Закон постоянства состава был сформулирован в 1806 г. Ж.Л. Прустом. Этот закон относится к идеальному веществу, так как случайные примеси неизбежно вносят некоторое непостоянство в состав любого вещества.

*Пример 1.4.* Рассчитайте массовые доли химических элементов в глюкозе.

*Решение.*

1. Найдем молекулярную массу глюкозы  $C_6H_{12}O_6$ :

$$M_r = 6 \cdot 12 + 12 \cdot 1 + 6 \cdot 16 = 180.$$

2. Вычислим массовые доли элементов:

$$\omega(C) = 6 \cdot 12 / 180 = 0,40 \text{ (40\%);}$$

$$\omega(H) = 12 \cdot 1 / 180 = 0,067 \text{ (6,7\%);}$$

$$\omega(O) = 6 \cdot 16 / 180 = 0,533 \text{ (53,3\%).}$$

*Пример 1.5.* В химическом соединении, состоящем из углерода и серы, массовая доля углерода — 15,8%. Установите формулу вещества.

*Решение.* Массовая доля, выраженная в процентах, равна числу массовых частей элемента на 100 массовых частей вещества. Находим массу серы, приходящуюся на 1 атом углерода:

15,8 масс.ч. углерода — (100 — 15,8) масс.ч. серы;

12 Да углерода —  $x$  Да серы;

$$x = 12 \cdot (100 - 15,8) / 15,8 = 64.$$

$A_r(S) = 32$ . Следовательно, число атомов серы  $N(S) = 64 / 32 = 2$ . Получаем формулу вещества  $CS_2$ .

*Пример 1.6.* Газ этан состоит из 20% водорода и 80% углерода по массе. Установите его формулу.

*Решение.* Поступаем, как в примере 1.5:

80 масс. ч. углерода — 20 масс.ч. водорода;

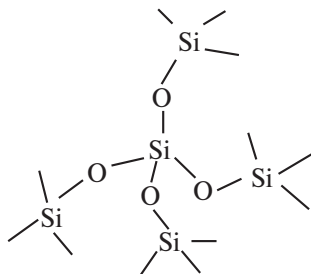
12 Да углерода —  $x$  Да водорода;

$$x = 12 \cdot 20 / 80 = 3 \text{ Да; } N(H) = 3 \text{ Да} / 1 \text{ Да} = 3.$$

Получаем простейшую формулу  $C_2H_6$ . В действительности этан состоит из молекул  $C_2H_6$ . Это молекулярная формула этана; именно ее всегда используют при решении различных вопросов, связанных с этаном и другими веществами с кратным числом атомов.

В некоторых классах простых и сложных веществ — металлах, оксидах и гидроксидах металлов и солях — молекул нет. Вещество строится из атомов и атомных групп, определенным образом чередующихся в кристаллической структуре. В качестве типичных представителей таких веществ рассмотрим оксид кремния (кварц) —  $\text{SiO}_2$  и хлорид натрия —  $\text{NaCl}$ .

В кварце каждый атом кремния симметрично окружен 4 атомами кислорода, а каждый атом кислорода находится между двумя атомами кремния, причем все расстояния в ближайшем окружении атомов одинаковы:



В такой структуре нет обособленных молекул  $\text{SiO}_2$ . Все атомы, имеющиеся в кристалле, объединены сеткой связей как бы в единую молекулу. В результате вещество оказывается твердым и тугоплавким; лучше всего оно известно нам в виде песка. Структуры, подобные оксиду кремния, называются *ковалентными* или *каркасными*. Аналогичный по составу оксид углерода(IV)  $\text{CO}_2$  действительно состоит из молекул, слабо связанных между собой, и при обычных условиях находится в газообразном состоянии.

Хлорид натрия (рис. 1.4) состоит из ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , связанных электростатическим притяжением. Каждый ион натрия в ближайшем окружении имеет 6 ионов хлора, а ион хлора — 6 ионов натрия. Все кратчайшие расстояния  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$  одинаковы. Реальных молекул  $\text{NaCl}$  в структуре вещества нет. Другие соли имеют структуры такого же типа. Эти структуры называются *ионными*.

Кроме молекулярных, каркасных и ионных кристаллических структур, существуют *металлические* структуры. Название показывает, что они характерны для металлов. Главное отличие их от каркасных структур состоит в том, что часть имеющихся у атомов электронов объединяется в единый *электронный газ*, создающий электрическую проводимость металлов.

Формулы веществ с ковалентными и ионными структурами не могут рассматриваться в качестве молекул, которых у этих веществ



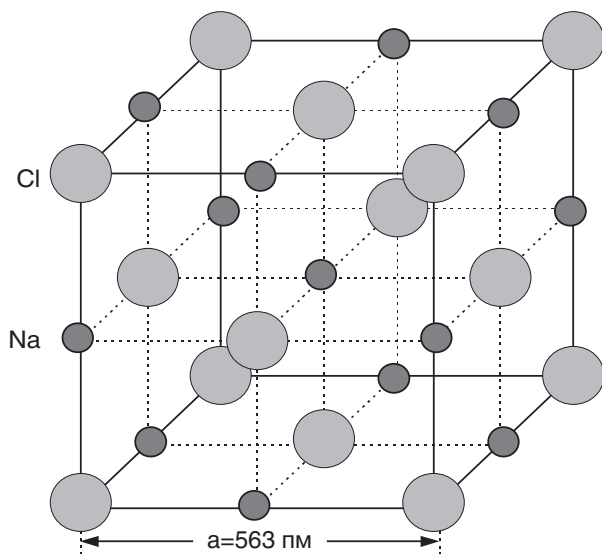


Рис 1.4. Кристаллическая структура хлорида натрия

вообще нет. Можно считать, что они обозначают условные частицы с минимальным числом атомов, соответствующим составу вещества. Для этих частиц нет общепотребительного термина, и они называются *формульными единицами*. Предложено называть такую частицу *толика*. В хлориде натрия имеется равное число атомов натрия и хлора, что дает формулу  $\text{NaCl}$ . Рассматривая структуру оксида кремния, можно понять, что на каждый атом кремния приходится 2 атома кислорода. Получается формула  $\text{SiO}_2$ . Молекулы и формульные единицы являются разновидностями *структурных единиц вещества*.

**Структурные единицы вещества — это реальные (атомы, молекулы) или условные (формульные единицы) частицы, достаточное число которых может составить любую порцию вещества.**

Масса формульной единицы рассчитывается так же, как масса молекулы. Понятие «*относительная молекулярная масса*» применяется как к молекулам, так и к формульным единицам. В таблице 1.3 показано, какие виды структурных единиц соответствуют некоторым типам веществ.

Формульные единицы веществ в отличие от молекул не всегда можно адекватно изобразить структурными формулами. Например, структурная формула  $\text{Na—Cl}$  не дает правильного представления о

Таблица 1.3. Структурные единицы веществ

| Вид структурной единицы | Типичные вещества   |
|-------------------------|---|
| Молекулы                | Большинство газов, жидкости (кроме жидких металлов), летучие твердые вещества                                 |
| Атомы                   | Металлы, благородные газы, алмаз, кремний   |
| Формульные единицы      | Вещества с ковалентными и ионными кристаллическими структурами — соли, соединения металлов с кислородом и др. |

строении хлорида натрия, так как на самом деле атомы натрия и хлора связаны с шестью соседними атомами. Эта формула приобретает смысл для газового состояния соли (температура кипения хлорида натрия 1490 °С), в котором действительно имеются молекулы NaCl. Но, как правило, при упоминании поваренной соли подразумевается твердое вещество.

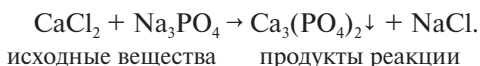
### Вопросы и упражнения

1. Сохраняются ли молекулы при химических превращениях?
2. Почему вещества с молекулярной структурой летучи и легкоплавки?
3. В природе существуют два изотопа хлора с массовыми числами 35 и 37. Сколько существует разновидностей молекул хлора?
4. Вычислите молекулярные массы дигидрофосфата кальция, оксида углерода(IV), гидроксида железа(III), перманганата калия и серы.
5. Рассчитайте массовые доли элементов в: а) карбонате кальция; б) ортофосфорной кислоте; в) аммиаке.
6. Химическое соединение  $AlX_3$  имеет молекулярную массу 267. Определите элемент X.
7. Сколько молекул содержится в 0,2 г серной кислоты?
8. Химическое соединение кремния с водородом имеет молекулярную массу 32. Определите формулу вещества.

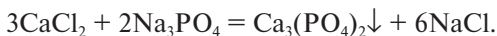
## § 1.4. УРАВНЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Превращения веществ записывают в виде *уравнений химических реакций* на основе принципа сохранения атомов.

Составим уравнение реакции для превращения хлорида кальция  $CaCl_2$  и фосфата натрия  $Na_3PO_4$  в фосфат кальция  $Ca_3(PO_4)_2$  и хлорид натрия NaCl:



В написанной схеме реакции справа от стрелки (знака превращения) имеется три атома кальция и две группы  $\text{PO}_4$ . Поэтому перед формулами веществ слева ставим коэффициенты 3 и 2. В результате в веществах слева оказывается по 6 атомов натрия и хлора. Следовательно, справа перед формулой  $\text{NaCl}$  необходим коэффициент 6. Теперь все атомы уравнены и получено уравнение реакции. Знак превращения можно заменить знаком равенства:



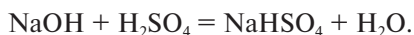
Стрелка у формулы фосфата кальция означает выпадение вещества из раствора в осадок. Вещества, записанные слева от знака равенства, называются *исходными веществами*, или *реагентами*, справа от знака равенства — *продуктами реакции*.

Коэффициенты перед формулами веществ в уравнении химической реакции называются *стехиометрическими коэффициентами*  $\nu$  (греч.: ню). Стехиометрические коэффициенты имеются у всех формул веществ, но коэффициент  $\nu = 1$  не пишется. Согласно установленным правилам написания уравнений реакций, стехиометрические коэффициенты должны быть минимальными недробными числами. Под каждой формулой в уравнении подразумевается любое одинаковое число  $N$  структурных единиц вещества. Следовательно, составленное нами уравнение реакции означает:  $3N$  структурных единиц  $\text{CaCl}_2$  реагируют с  $2N$  структурными единицами  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , образуя  $N$  структурных единиц  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  и  $6N$  структурных единиц  $\text{NaCl}$ .

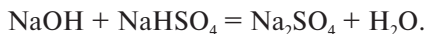
Химические реакции могут идти последовательно в две или несколько стадий. В таких реакциях продукт предшествующей стадии играет роль исходного вещества в последующей. В случае последовательно протекающих реакций можно составлять уравнения как для отдельных стадий, так и для суммарного процесса.

**Уравнения последовательных химических реакций можно складывать и вычитать по обычным алгебраическим правилам.**

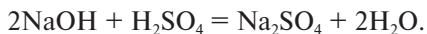
*Пример 1.7.* При постепенном добавлении раствора гидроксида натрия к разбавленной серной кислоте образуется гидросульфат натрия:



При дальнейшем добавлении гидроксида натрия идет нейтрализация гидросульфата натрия:



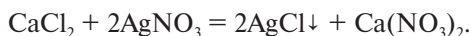
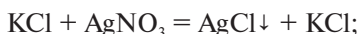
Сложив эти два уравнения, получим суммарное уравнение нейтрализации серной кислоты гидроксидом натрия:



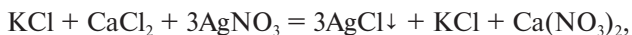
**Внимание!** Если в смеси веществ протекают две или более не связанные между собой реакции, то сложение их уравнений приводит к ложным результатам.

*Пример 1.8.* К раствору, содержащему хлориды калия и кальция, добавили нитрат серебра в избытке. Напишите уравнения реакций.

*Решение.* Пишем два уравнения:



Складывать эти уравнения нельзя, так как, написав суммарное уравнение:



мы пришли бы к ошибочному представлению, что в растворе содержались равные количества вещества KCl и CaCl<sub>2</sub>, но в условии этого не сказано.

## Вопросы и упражнения

1. На основании каких законов составляются уравнения химических реакций?
2. В чем количественный смысл уравнений химических реакций?
3. Можно ли складывать уравнения химических реакций?
4. Составьте уравнения реакций:
  - а)  $\text{Al} + \text{HCl} \rightarrow \text{AlCl}_3 + \text{H}_2$ ;
  - б)  $\text{AlCl}_3 + \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{S} + \text{NaCl}$ ;
  - в)  $\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Mn}$ ;
  - г)  $\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CuOH})_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CO}_2$ .

## § 1.5. КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА

Выше была рассмотрена химическая реакция между хлоридом кальция и фосфатом натрия, в результате которой получается раствор поваренной соли. Теперь обратим внимание на то, что раствор после осаждения Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> может содержать не только NaCl, но и не вступивший в реакцию *избыток* одного из взятых веществ — CaCl<sub>2</sub> или Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Это приводит к следующему выводу: при осуществлении