

В истории химии можно выделить, прежде всего, четыре возникшие последовательно в разное время концептуальные системы – химические картины мира: химического состава индивидуальных веществ, химической структуры индивидуальных веществ, химической реакции и химической эволюции. Появление очередной химической картины мира открывало новое видение химической реальности, показывало, что химический мир более сложный, чем представлялся до тех пор, обогащало химическое познание мира новыми установками, идеалами. Но не следует думать, что очередная химическая картина мира отменяла предыдущие, отвергала их. Прежние химические картины мира конечно же оставались, но что-то в них устаревало, теряло свою значимость, т. к. противоречило новым химическим знаниям, но что-то важное сохранялось, не утратив своей ценности. Данную мысль можно выразить по-другому: в ходе развития химии происходит не полная замена одной концептуальной системы другой, а наблюдается последовательное ступенчатое усложнение концептуальной системы. Таким образом, современная химическая картина мира закономерно представляет собой иерархию (что-то наподобие слоеного пирога) из, главным образом, четырех концепций химии:

1) концепции химического состава индивидуальных веществ, не теряющей своей значимости благодаря объективному существованию атомов химических элементов, а также их различных соединений в молекулы, макромолекулы или супрамолекулярные ансамбли;

2) концепции химической структуры индивидуальных веществ, не теряющей своей значимости благодаря объективному существованию структуры у молекул, макромолекул, супрамолекулярных ансамблей, а также у индивидуальных веществ в целом;

3) концепции химической реакции, не теряющей своей значимости благодаря объективному существованию химической формы движения материи;

4) эволюционной концепции, не теряющей своей значимости благодаря объективному существованию эволюции химических систем.

1. Концепция химического состава индивидуальных веществ

- о химическом составе индивидуальных веществ;*
- о химических элементах, периодической зависимости их химических свойств и естественной периодической системе химических элементов;*
- о валентности, природе химической связи и химическом соединении;*
- о качественном и количественном составе простых и сложных индивидуальных веществ;*
- о полимерах, макромолекулах и мономерах;*
- о супрамолекулярных ансамблях*

Представления о химическом составе индивидуальных веществ, определяющем их разнообразие и свойства, формировались благодаря теоретическим воззрениям, в первую очередь, таких ученых, как английский физик, химик, философ и богослов Роберт Бойль (вторая половина XVII в.), российский ученый-натуралист, поэт, художник, историк Михаил Васильевич Ломоносов (середина XVIII в.), французский химик Антуан Лоран Лавуазье (вторая половина XVIII в.), французские химики Клод Луи Бертолле и Жозеф Луи Пруст (конец XVIII в. – начало XIX в.), британский физик, химик и метеоролог Джон Дальтон, российский химик и физик Дмитрий Иванович Менделеев (вторая половина XIX в.), германский химик Герман Штудингер (первая половина XX в.), французский химик Жан Марк Лен (вторая половина XX в.). Они до сих пор в определенной степени сохраняют свою актуальность и не утратили не только своей научной, но и культурной ценности.

Свойства любого чистого индивидуального вещества (очищенного от других индивидуальных веществ) определяются, прежде всего, его химическим составом (если атомы соединены в молекулы, то и составом его молекул), т. е. тем, какие химические элементы и в каком соотношении входят в его состав (если есть

молекулы, то в состав молекул).

Наименьшими частицами любого химического элемента, определяющими его природу, его свойства, являются атомы. Совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра и является тем или иным химическим элементом. Следовательно, химические элементы различаются, в первую очередь, зарядом ядра их атомов. Всего известно 118 химических элементов, соответственно с зарядом ядра от 1 до 118, 94 из них обнаружены в природе, остальные получены искусственно. Заряд атомного ядра положительный и определяется количеством положительно заряженных протонов. При этом количество нейтронов в ядре может быть различным. Следовательно, химический элемент представляет собой совокупность разных изотопов, различающихся количеством нейтронов в ядре, а, следовательно, массой ядра и атома. Например, химический элемент водород, имеющий в ядре один протон, встречается в природе в виде трех изотопов: протия без нейтронов (больше 99,9 %), дейтерия с одним нейтроном и трития с двумя нейтронами (содержание дейтерия и трития незначительное) (рис. 1). В подавляющем

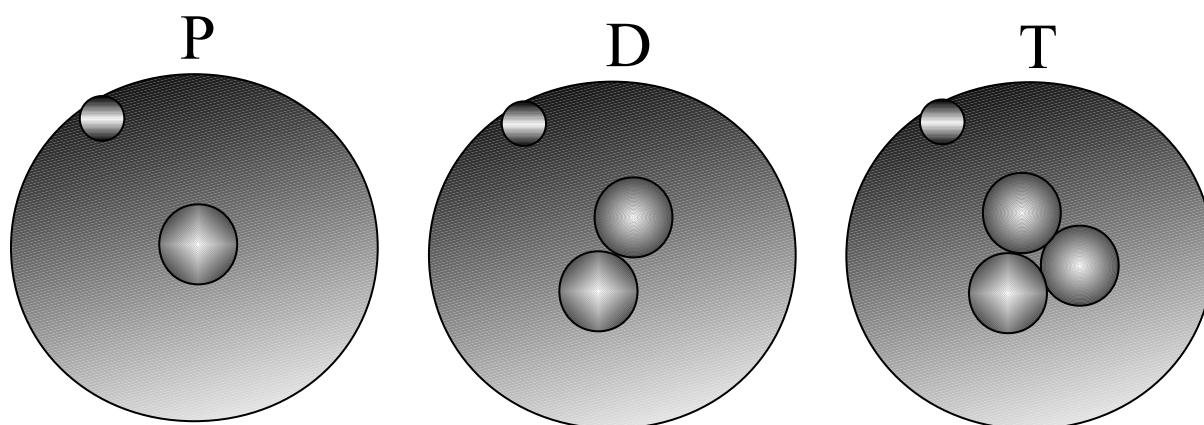


Рис. 1 Структура атома изотопов водорода: протия (P), дейтерия (D) и трития (T)

большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими свойствами (исключение составляют изотопы лишь некоторых химических элементов, например, изотопы водорода). Заряд атомного ядра определяет специфику атома химического элемента, в т. ч. количество отри-

цательно заряженных электронов в атоме, структуру электронных оболочек и слоев, заполненность их электронами.

Каждому химическому элементу присвоен атомный, или порядковый, номер (от 1 до 118), соответствующий заряду ядра его атомов. У первых 112 химических элементов имеется постоянное название. Атом каждого химического элемента с порядковым номером на единицу больше отличается от атома предыдущего химического элемента прибавлением одного протона в ядре и подобающим образом прибавлением одного электрона в электронных оболочках. Между химическими элементами существует закономерная связь: их химические свойства периодически (через какое-то количество химических элементов) повторяются в возрастающем ряду их порядковых номеров. Например, неоднократно повторяются в ряду химических элементов щелочные металлы, щелочно-земельные металлы, галогены, инертные газы (рис. 2). Получается, что качественные свойства химических

Химические элементы

H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	...	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		

Порядковые номера химических элементов

Рис. 2 Примеры периодического повторения химических свойств химических элементов в возрастающем ряду их порядковых номеров:

- повторение свойств инертных газов – у гелия (He №2), неона (Ne № 10), аргона (Ar № 18),
- повторение свойств щелочных металлов – у лития (Li № 3), натрия (Na № 11), калия (K № 19),
- повторение свойств щелочно-земельных металлов – у магния (Mg № 12), кальция (Ca № 20),
- повторение свойств галогенов – у фтора (F № 9), хлора (Cl № 17)

элементов зависят от их количественных свойств, находятся в объективной зависимости от их количественных свойств. Причем эта зависимость имеет явно периодический характер, отношение качественных свойств к количественным меняется периодически, скачками.

Таким образом, все химические элементы в зависимости от их родства обра-

зуют естественную периодическую систему в виде таблицы со строками – периодами и колонками – группами.

В одном и том же периоде собраны химические элементы с одинаковым количеством электронных оболочек (энергетических уровней), и их количество совпадает с номером периода. Таким образом, от первого до седьмого периода в каждой группе (главной подгруппе) металлические свойства усиливаются, а неметаллические ослабевают, т. к. валентные электроны располагаются все дальше и дальше от ядра и им легче отрываться.

Номер группы показывает, как идет заполнение электронами валентных (внешних) электронных слоев, он совпадает с максимальным числом валентных электронов в первых двух электронных слоях внешних электронных оболочек. Поэтому от первой к седьмой группе в каждом периоде наблюдается плавный переход от типичных металлов – щелочных, с легкостью отдающих единственный валентный электрон, к типичным неметаллам – галогенам, с легкостью принимающих единственный недостающий электрон, а в восьмой группе расположились инертные газы с полностью заполненными электронными оболочками.

Заполненность валентными электронами внешних электронных слоев определяет способности атомов соединяться друг с другом, определяет возможную валентность химического элемента. Благодаря частичному или полному переходу валентных электронов между атомами возникает тот или иной вид химической связи. Валентность химического элемента как раз и определяет способность атома данного химического элемента образовывать определенное количество химических связей с атомами других химических элементов. Соединившиеся атомы химических элементов образуют молекулы химических соединений. Если индивидуальное вещество состоит из молекул, тогда именно молекулы определяют его природу, его свойства.

Различают качественный и количественный состав индивидуального вещества.

Качественный состав индивидуального вещества показывает, из каких хи-

мических элементов оно состоит (из атомов каких химических элементов состоят его молекулы). Если индивидуальное вещество (в т. ч. его молекулы) состоит из атомов одного и того же химического элемента, то такое вещество называют простым. При этом название простого вещества может совпадать с названием химического элемента, как, например, у натрия, калия, азота, кислорода, а может не совпадать, как, например, у озона, состоящего из атомов кислорода. Если индивидуальное вещество (в т. ч. каждая из его молекул) состоит из атомов разных химических элементов, тогда такое вещество называют сложным. Примеры сложных веществ: серная кислота (состоит из водорода, серы и кислорода), гидроокись натрия (состоит из натрия, кислорода и водорода), поваренная соль (состоит из натрия и хлора). Простые вещества различаются своими свойствами по той простой причине, что они состоят из разных химических элементов, а сложные вещества различаются своими свойствами потому, что состоят из разных наборов химических элементов. То, что индивидуальное вещество сложное, доказывает возможность его разложения на простые вещества, соответствующие химическим элементам.

Количественный состав индивидуального вещества показывает, в каком количестве атомы одного и того же химического элемента соединились в молекулы или же в каком соотношении атомы разных химических элементов присутствуют в химическом соединении (если они образуют молекулы, то в каком соотношении они соединились в молекулах). Например, молекулы кислорода и озона при н. у. имеют один и тот же качественный состав, т. к. они состоят из одного и того же химического элемента – кислорода, но они различаются своими свойствами по причине разного количественного состава: молекулы кислорода образованы двумя атомами кислорода, а молекулы озона – тремя атомами кислорода. Или молекулы угарного и углекислого газов также имеют один и тот же качественный состав, т. к. они состоят из одних и тех же химических элементов – углерода и кислорода, но они различаются своими свойствами по причине разного количественного состава: молекулы угарного газа образованы одним атомом углерода и од-

ним атомом кислорода, а молекулы углекислого газа – одним атомом углерода и двумя атомами кислорода. Получается, что на один атом углерода в молекуле угарного газа приходится один атом кислорода, а в молекуле углекислого газа на один атом углерода приходится два атома кислорода. Примеры угарного и углекислого газов – это примеры сложных веществ постоянного состава или дальтоновидов. Они имеют один и тот же количественный состав независимо от способа их получения. Сложные вещества бывают и переменного состава – бертоллиды, они могут иметь разное соотношение атомов образующих их химических элементов в зависимости от способа их получения. Сложные вещества переменного состава или бертоллиды имеются, например, среди металлов (сплавов металлов, а также металлов с некоторыми неметаллами), оксидов (соединений какого-либо химического элемента с кислородом), сульфидов (соединений какого-либо металла с серой), карбидов (соединений какого-либо химического элемента с углеродом), гидридов (соединений какого-либо металла, а также ряда неметаллов с водородом). Например, латунь является сплавом меди с цинком (от нескольких до 40 % цинка), чугуны и стали являются сплавами железа с углеродом, но в чугуне углерода более 2,14 %, а в стали менее 2,14 %. У одного из оксидов урана на 10 атомов урана может приходиться от 16 до 25 атомов кислорода.

Существуют индивидуальные вещества, называемые полимерами. Они состоят из гигантских макромолекул (полимерных молекул), которые, в свою очередь, состоят из большого числа повторяющихся атомных группировок – мономерных звеньев, или мономеров. Состав полимера определяется тем, из каких мономеров состоят его макромолекулы. У гомополимеров макромолекулы состоят из одинаковых мономеров. Например, макромолекулы полиэтилена состоят из радикалов этилена (рис. 3). У сополимеров, или гетерополимеров, макромолекулы состоят из нескольких типов мономеров. Например, макромолекулы акрилонитрилбутадиенстирола (АБС-пластика) состоят из трех типов мономеров: акрилонитрила, бутадиена и стирола. Поэтому у сополимеров важен не только качественный состав, но и количественный, т. к. свойства сополимера определяются

$\text{CH}_2=\text{CH}_2$ формула молекулы этилена

$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ формула радикала этилена

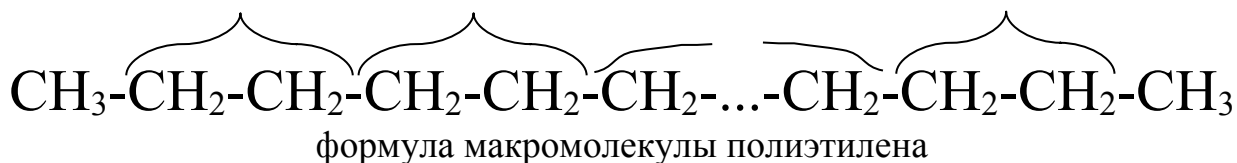


Рис. 3 Состав макромолекулы полиэтилена

не только типами мономеров, но и их количественным соотношением.

Существуют еще более сложные, чем молекулы, полимолекулярные системы в виде супрамолекулярных (надмолекулярных) ансамблей (ассоциатов), элементы которых в виде молекул связаны в единое целое с помощью межмолекулярных взаимодействий. Свойства такого супрамолекулярного ансамбля зависят, в первую очередь, от того, какие молекулы и в каком соотношении вошли в его состав. Например, известен устойчивый супрамолекулярный ансамбль типа «гость-хозяин», состоящий из одной молекулы кукурбитурила (в ее составе тридцать шесть атомов углерода, тридцать шесть атомов водорода, двадцать четыре атома азота и двенадцать атомов кислорода), одной молекулы пиридина (в ее составе пять атомов углерода, пять атомов водорода и один атом азота) и одного или двух трехъядерных кластеров молибдена или вольфрама (в их составе три атома молибдена или вольфрама, четыре атома серы и селена и девять молекул воды).

Таким образом, свойства индивидуального вещества определяются, прежде всего, его качественным и количественным составом, т. е. тем, из каких химических элементов оно образовано, из каких мономеров образованы макромолекулы полимера, из каких молекул образованы супрамолекулярные ансамбли, а также как химические элементы, мономеры или молекулы соотносятся между собой количественно.

2. Концепция химической структуры индивидуальных веществ

- о химической структуре индивидуальных веществ;*
- об аллотропии и аллотропных модификациях простых веществ;*
- об изомерии, структурной и пространственной изомерии сложных веществ;*
- о пространственной структуре макромолекул полимеров и структуре полимеров;*
- о структуре супрамолекулярных ансамблей*

Представления о химической структуре (химическом строении) индивидуальных веществ, которые определяют их разнообразие и свойства, формировались благодаря теоретическим работам, в первую очередь, таких ученых, как шведский химик Йёнс 'Якоб Берц'елиус, французские химики Жан Бат'ист Андр'е Дюм'а, Ог'юст Лор'ан, Шарль Фредер'ик Жер'ар (первая половина XIX в.), германский химик Фр'идрих 'Август К'екуле фон Штрад'ониц, британский химик Ар'чиб'альд Скотт К'упер, российский химик Алекс'андр Мих'айлович Б'утлеров, нидерландско-германский химик 'Якоб Х'ендрик Вант-Гофф, французский химик Жоз'еф Аш'иль Ле Бель, германский химик Иог'анн Фр'идрих Вильг'ельм Ад'ольф фон Б'айер (вторая половина XIX в.), швейцарский химик 'Альфред В'ернер (конец XIX в.), германский химик Эм'иль Г'ерман Ф'ишер (конец XIX в. – начало XX в.), австрийско-американский химик Г'ерман Фр'энсис Марк (первая половина XX в.), французский химик Жан Мар'и Лен (вторая половина XX в.). Они до сих пор в определенной степени сохраняют свою актуальность и не утратили не только своей научной, но и культурной ценности.

Химические свойства любого чистого индивидуального вещества (очищенного от других индивидуальных веществ) определяются не только его составом, т. е. тем, какие химические элементы и в каком соотношении входят в его состав

(если есть молекулы, то в состав молекул), или какие мономеры и в каком соотношении входят в состав макромолекул полимера, или какие молекулы и в каком соотношении входят в состав супрамолекулярного ансамбля, а и отсутствием или наличием его структуры, т. е. тем, в каком порядке атомы химических элементов расположились относительно друг друга (если есть молекулы, то в каком порядке атомы химических элементов соединились и соответственно расположились относительно друг друга в молекулах), или в каком порядке мономеры соединились в макромолекулы полимера и в каком порядке они расположились, или в каком порядке расположились молекулы, образовав супрамолекулярный ансамбль.

В случае аллотропии простые вещества могут иметь один и тот же состав, но различаются своими свойствами, в зависимости от того, расположены ли атомы одного и того же химического элемента беспорядочным образом относительно друг друга, или же они, соединяясь друг с другом, образуют ту или другую упорядоченность. Так возникают различные аллотропные видоизменения, или аллотропные модификации, или аллотропные формы, какого-либо простого вещества. Причем аллотропные модификации могут иметь и неметаллы, и металлы. Например, сера бывает трех аллотропных модификаций в виде пластической серы, ромбической кристаллической серы и моноклинной кристаллической серы. У пластической серы отсутствует дальний порядок, т. к. атомы соединяются в короткие цепи, между которыми отсутствует какая-либо упорядоченность. У кристаллической серы имеется дальний порядок, т. к. атомы соединяются с образованием объемных кристаллов: в зависимости от температуры у ромбической серы в виде октаэдров, а у моноклинной серы в виде удлиненных скошенных параллелепипедов. Олово имеет две аллотропные модификации, различающиеся формой кристаллов: белое металлическое олово с характерным металлическим блеском и серое олово в виде неблестящего серого порошка.

В случае изомерии сложные вещества могут иметь один и тот же состав, но различаться своими свойствами, в зависимости от того, в каком порядке атомы разных химических элементов соединились и соответственно расположились от-

носителем друг друга (пространственно) в молекулах. Поэтому изомеры различаются прежде всего структурой или строением своих молекул, т. е. порядком соединения атомов и их пространственным расположением. Структура молекулы определяется особенностью химических связей между ее атомами. Изменение в структуре может сопровождаться и изменением конфигурации молекул, т. е. их пространственной или геометрической формы.

Различают структурную и пространственную изомерию.

Структурные изомеры отличаются порядком атомов в молекуле. Например, цианат серебра и фульминат серебра (гремучее серебро) имеют один и тот же состав (в их молекулах соединены по одному атому серебра, углерода, азота и кислорода), но они различаются своими свойствами из-за разного порядка соединения атомов: в молекуле цианата серебра атомы соединились в одном порядке (серебро-азот-углерод-кислород), а в молекуле фульмината серебра – в другом (серебро-кислород-азот-углерод). Разный порядок атомов в молекулах структурных изомеров может привести к различной конфигурации их молекул. Например, изомеры бутан и изобутан имеют один и тот же состав (в их молекулах соединены четыре атома углерода и десять атомов водорода), но различаются своими свойствами потому, что в молекуле бутана атомы углерода соединились последовательно, а в молекуле изобутана – с разветвлением (рис. 4). Соответственно моле-

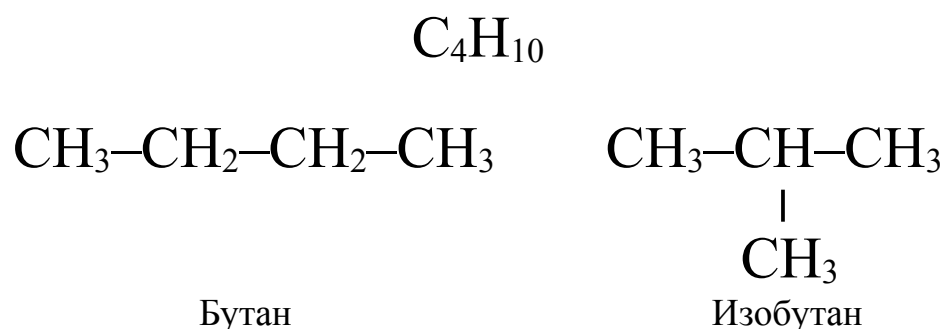


Рис. 4 Обычная (вверху) и структурные (внизу) химические формулы молекул бутана и изобутана

кула бутана имеет линейную конфигурацию, а молекула изобутана – разветвлен-

ную. Из-за разного порядка атомов в молекулах разных структурных изомеров могут формироваться и разные атомные функциональные группы. Например, изомеры этанола и диметилового эфира, имея одинаковый состав (в их молекулах соединены два атома углерода, шесть атомов водорода и один атом кислорода), различаются своими свойствами потому, что в молекуле этилового спирта имеется гидроксильная группа, а в молекуле диметилового эфира – алкоксильная группа (рис. 5).

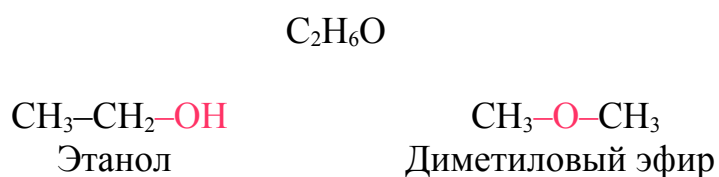


Рис. 5 Обычная (вверху) и структурные (внизу) химические формулы молекул этанола и диметилового эфира (функциональные группы выделены красным цветом)

Пространственные изомеры, или стереоизомеры, отличаются расположением атомов в пространстве при сохранении их порядка в молекулах. При этом молекулы стереоизомеров имеют различную конфигурацию, а одни и те же функциональные группы могут по-разному располагаться относительно остальной части молекулы. Например, у этилен-1,2-дикарбоновой кислоты имеется цис-изомер, или малеиновая кислота, в молекуле которой обе карбоксильные группы расположены по одну сторону плоскости двойной связи, а также транс-изомер, или фумаровая кислота, в молекуле которой две карбоксильные группы расположены по разные стороны плоскости двойной связи (рис. 6). Глюкоза имеет два зеркальных, или оптических, изомера: правую D-глюкозу и левую L-глюкозу, молекулы одной из которых подобны зеркальному отражению молекул другой.

Макромолекулы гомополимеров и сополимеров могут иметь три основные пространственные структуры (геометрические формы): линейную, разветвленную или сетчатую (рис. 7). У сополимеров это может зависеть от последовательности соединения разных типов мономеров в макромолекулах. В макромолекулах статистических сополимеров разные мономеры соединены без определенного порядка.

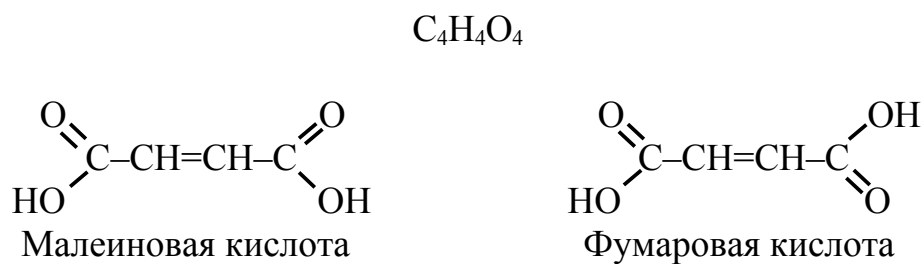


Рис. 6 Обычная (вверху) и структурные (внизу) химические формулы молекул малеиновой и фумаровой кислот, являющихся соответственно цис-изомером и транс-изомером этилен-1,2-дикарбоновой кислоты

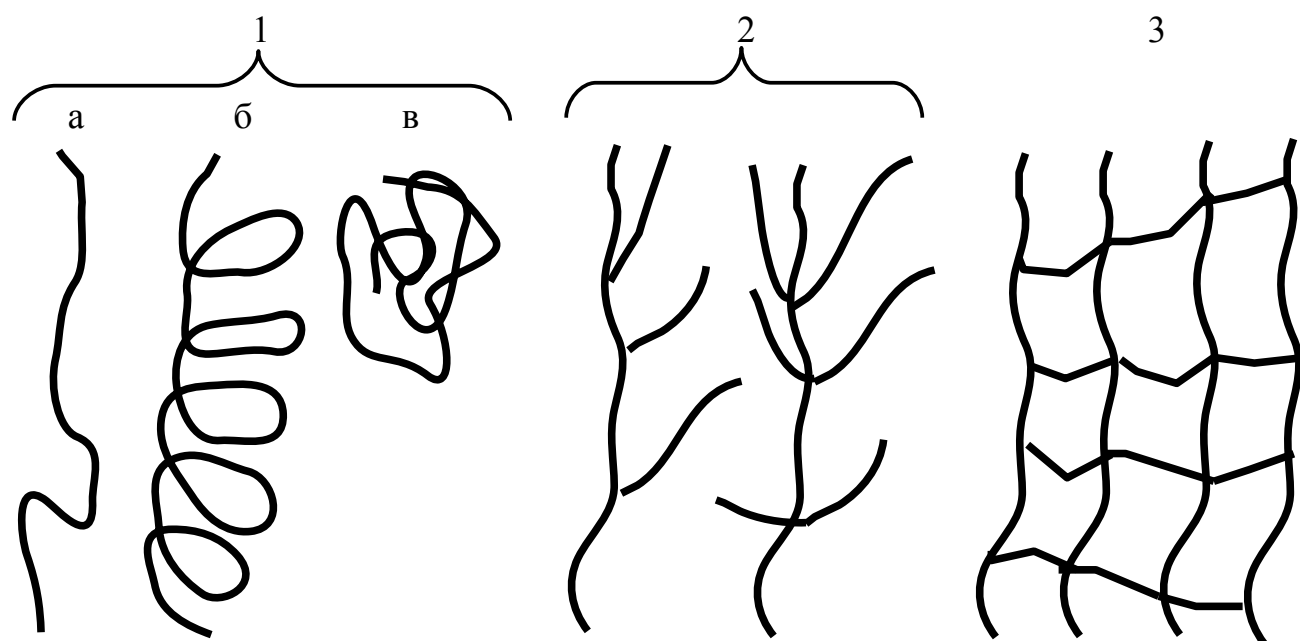


Рис. 7 Пространственные структуры (геометрические формы) макромолекул полимеров:

- 1 – линейная с разновидностями:
 - а – собственно линейная,
 - б – спиральная,
 - в – глобулярная,
- 2 – разветвленная,
- 3 – сетчатая

В макромолекулах блоксополимеров разные типы мономеров сгруппированы в отдельные чередующиеся блоки. Линейную структуру в виде открытых, линейных цепей могут иметь, например, макромолекулы полиэтилена высокой плотно-

сти (полиэтилена низкого давления). Разновидностями линейной структуры являются, во-первых, спиральная структура в виде скрученных в спирали линейных цепей макромолекул, как, например, у искусственных полипептидов (искусственно полученных цепей из аминокислот), а во-вторых, глобулярная структура в виде свернувшихся в глобулы линейных цепей макромолекул, как, например, у хлорполивинилхлорида (ХПВХ) (рис. 7). Разветвленную структуру в виде линейной цепи с ответвлениями могут иметь, например, макромолекулы полиэтилена низкой плотности (полиэтилена высокого давления). У привитого сополимера блоки одного из типов мономера присоединены в виде ветвлений к макроцепи, составленной из другого типа мономера (или разных типов мономеров). Например, у акрилонитрилбутадиенстирола (АБС-пластика) к макроцепи, составленной из мономеров акрилонитрила и стирола, присоединены ветвления из бутадиена. Сетчатую структуру в виде трехмерной сетки из сшитых цепей могут иметь, например, макромолекулы сшитого полиуретана.

Взаимное расположение макромолекул полимера определяет его структуру. Макромолекулы могут располагаться беспорядочно, образуя аморфные полимеры, а также в той или иной степени упорядоченно, образуя частично кристаллические, или кристаллизующиеся, полимеры. Упорядоченность макромолекул формирует надмолекулярную структуру кристаллизующегося полимера. Аморфным или кристаллизующимся полимером может быть, например, полиэтилен.

Входящие в состав супрамолекулярного ансамбля молекулы определяют его структуру в виде пространственного взаимного их расположения, что, в свою очередь, придает определенную форму самому супрамолекулярному ансамблю. Например, супрамолекулярный ансамбль типа «гость-хозяин», состоящий из одной молекулы кукурбитурила, одной молекулы пиридина и одного или двух трехъядерных кластеров молибдена или вольфрама, имеет форму "бочки" из молекулы кукурбитурила с одной или двумя "крышками" из одного или двух трехъядерных кластеров молибдена или вольфрама с "запертым" внутри "гостем" из пиридина.

3. Концепция химической реакции

- о химическом изменении индивидуальных веществ и сохранении принадлежности атомов химическим элементам;*
- об изменении электронных оболочек атомов и молекул;*
- о взаимодействии реагентов и образовании продуктов;*
- о простых и сложных химических реакциях;*
- о признаках химических реакций;*
- об экзо- и эндотермических химических реакциях;*
- о скорости химической реакции и ее изменении;*
- о катализаторах, катализе и каталитических реакциях;*
- о необратимых и обратимых химических реакциях;*
- о химическом равновесии и его смещении*

Представления о химической реакции (химическом процессе, химическом превращении) как химическом движении (химическом явлении) материи, от которых также зависит разнообразие и свойства индивидуальных веществ, формировались благодаря теоретическим работам, в первую очередь, таких ученых, как российский ученый-натуралист, поэт, художник, историк Миха'ил Вас'ильевич Ломон'осов (середина XVIII в.), британский химик Алекс'андер У'ильям У'ильямсон, германские физик и химик Л'юдвиг Фердин'анд Вильг'ельми, химики Г'енрих Р'озе и Р'оберт Вильг'ельм Б'унзен, российский физико-химик Никол'ай Никол'евич Бек'етов (середина XIX в.), французские физикохимик П'ьер Эж'ен Марсел'ен Бертл'о, химики Лу'и Пе'ан де Сен Жилль и Анр'и Жюль Дебр'е, норвежские физикохимик и математик Кат'о Максимили'ан Г'ульдберг, физикохимик и минералог П'етер В'ааге, нидерландско-германский химик 'Якоб Х'ендрик Вант-Гофф, французский физикохимик и металловед Анр'и Лу'и Ле Шатель'е (вторая половина XIX в.). Они до сих пор в определенной степени сохраняют свою актуальность и не утратили не только своей научной, но и культурной ценности.

Индивидуальные вещества остаются неизменными, сохраняя свои свойства, только лишь при сохранении определенных условий. В изменившихся условиях (например, температуры, давления, освещенности), в том числе при взаимодействии друг с другом индивидуальные вещества могут самопроизвольно измениться, превратившись в другие индивидуальные вещества с другими свойствами. Если такое изменение индивидуальных веществ сопровождается изменением их состава (качественного или количественного) или же структуры (строения), то такое изменение будет химическим. Химические изменения называют химическими явлениями, химическими превращениями, химическими процессами или химическими реакциями.

В химических реакциях принадлежность атомов к химическим элементам не изменяется, но они, например (рис. 8):

– могут соединиться друг с другом, образуя молекулы, как, например, атомы натрия и углерода, соединившись, образуют молекулы карбида натрия;

– могут присоединиться к молекулам, как, например, атомы магния, присоединившись к молекулам бромистого метила, образуют бромистый метилмагний, в том числе замещая другие атомы из молекул, как, например, атомы железа замещают атомы меди в молекулах сульфата меди, образуя сульфат железа;

– могут отщепиться от молекулы, как, например, от молекул перекиси водорода отщепляются атомы кислорода, причем и вплоть до полного разложения молекулы, как, например, молекулы сульфида железа разлагаются на атомы железа и серы.

Также молекулы могут обмениваться атомами или группами атомов, как, например, молекулы поваренной соли и нитрата серебра могут обмениваться атомами натрия и серебра с образованием хлорида серебра и нитрата натрия, или в молекулах может произойти такая перекомбинация атомов, что возникнут другие молекулы химических соединений взамен прежних, как, например, в результате

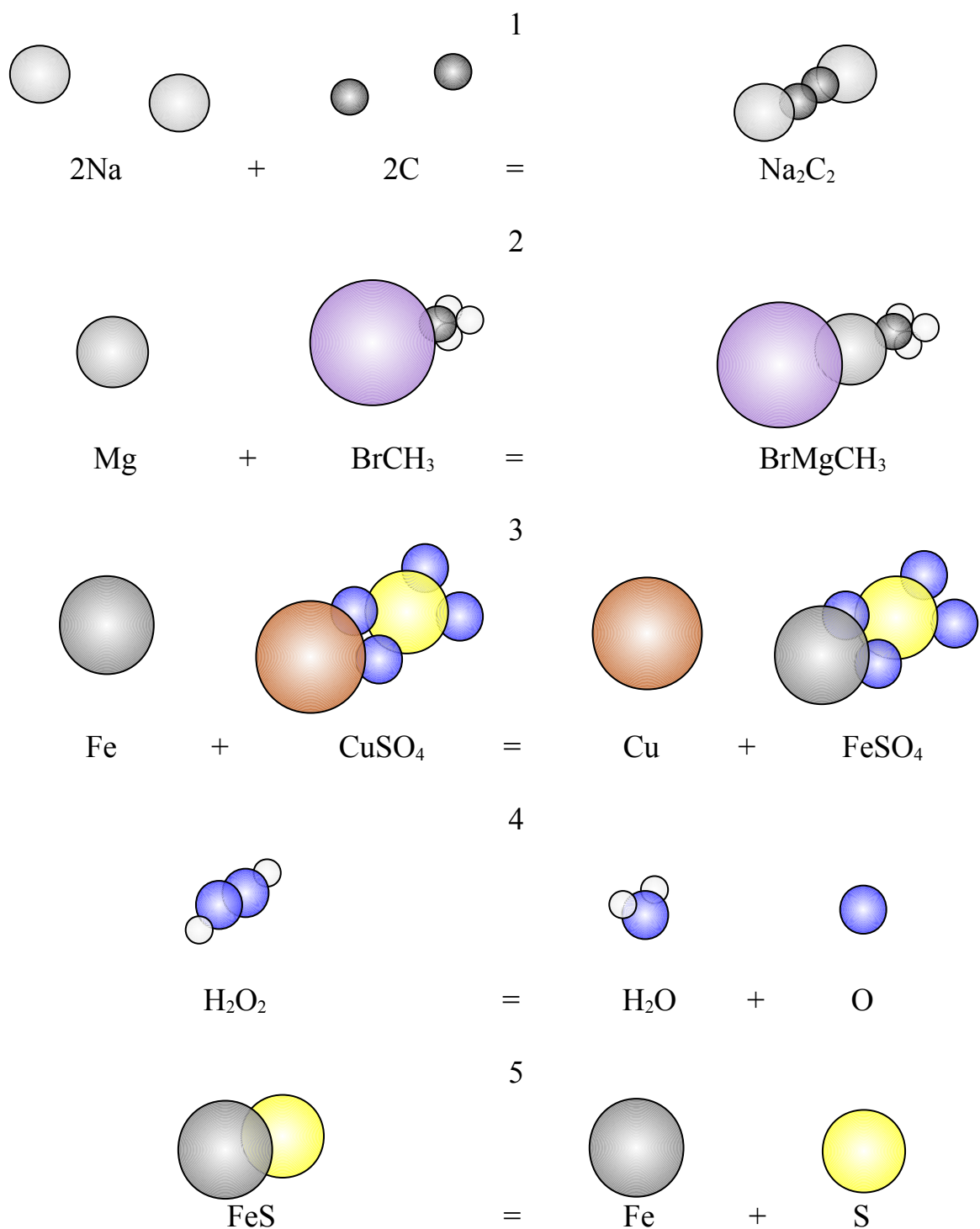


Рис. 8 Соединение атомов в молекулу (1), присоединение атома к молекуле (2), замена атома в молекуле (3), удаление атома из молекулы (4), разделение молекулы на отдельные атомы (5)

перекombинации атомов сульфита натрия и соляной кислоты образуются молекулы поваренной соли, воды и двуокиси серы (рис. 9).

Одинаковые или разные молекулы могут соединиться как мономеры в огром-

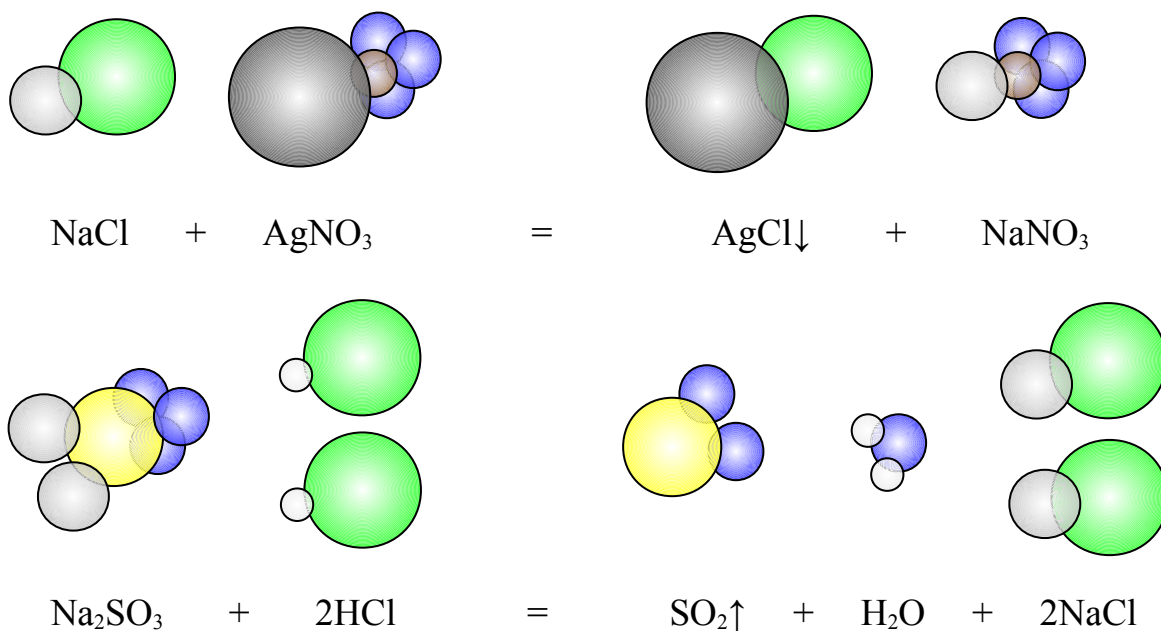


Рис. 9 Изменение молекул вследствие обмена атомами (вверху),
перегруппировки атомов (внизу)

ные макромолекулы гомогенных или гетерогенных полимеров, которые, в свою очередь, могут соединяться или разрываться. В определенных условиях макромолекулы полимеров могут изменить свою структуру, а также разрушаться.

Разные молекулы могут образовывать устойчивые супрамолекулярные ансамбли, которые, в свою очередь, в определенных условиях могут разрушаться.

Сохраняя свою принадлежность к химическим элементам, атомы в химических реакциях все же изменяются. Но при этом изменения касаются только лишь их электронных оболочек из-за возникновения, изменения или разрыва химических связей, а ядра сохраняются.

Химическая реакция начинается со смешивания одних индивидуальных веществ – исходных, называемых реагентами, и заканчивается образованием других индивидуальных веществ – конечных, называемых продуктами. Продукты химической реакции отличаются от реагентов составом или структурой, а, следовательно, своими свойствами. Взаимодействие двух реагентов сопровождается столкновениями их молекул и атомов, их химическое изменение с образованием молекул и атомов продуктов носит случайный характер и зависит от скорости

движения молекул и атомов, частоты их столкновений, взаимной ориентации при столкновениях.

Простые, или элементарные, химические реакции могут осуществляться как один элементарный акт (одна элементарная стадия) по превращению реагентов в продукты. Так, например, происходит соединение атомов углерода с молекулами кислорода с образованием углекислого газа (рис. 10). Но гораздо чаще протекают

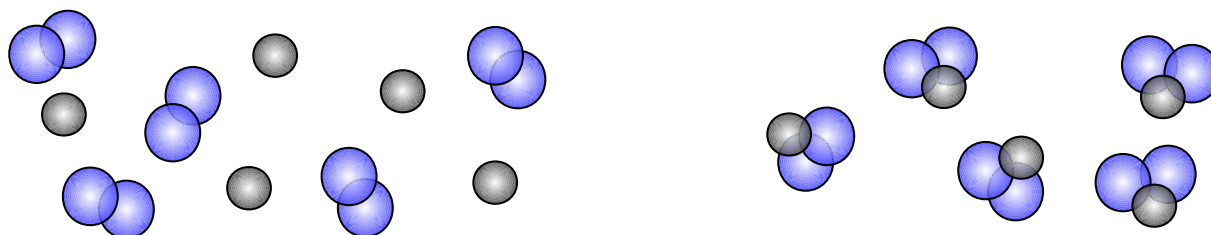


Рис. 10 Простая, или элементарная, реакция соединения атомов углерода с молекулами кислорода

сложные химические реакции, которые осуществляются через последовательность отдельных элементарных стадий, включают в себя ряд промежуточных стадий. При этом образование и изменение промежуточных веществ на каждой промежуточной стадии протекает, как правило, очень быстро. Например, реакция разложения закиси азота на азот и кислород протекает в две элементарные стадии (рис. 11). На первой стадии молекулы закиси азота разделяются на молекулы азота и атомарный кислород. На второй стадии атомы кислорода соединяются по два.

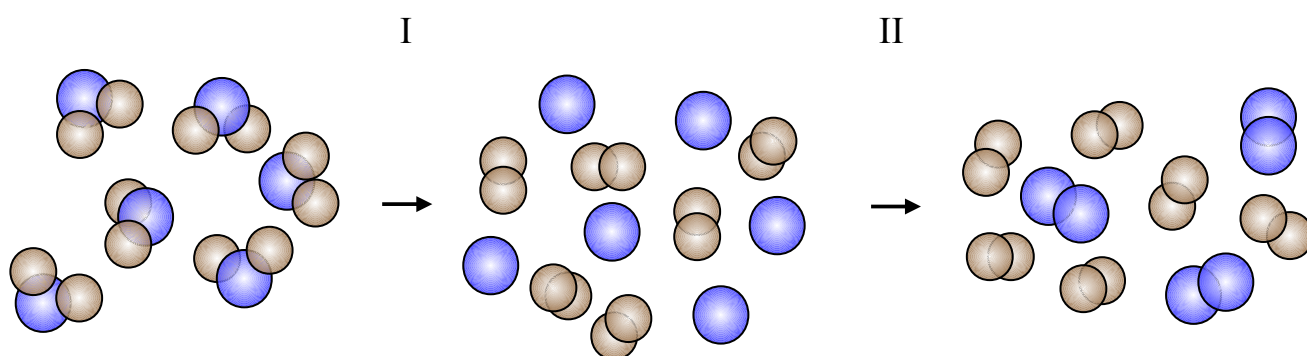


Рис. 11 Сложная химическая реакция разложения закиси азота, протекающая в две стадии

Так как химические реакции всегда осуществляются с превращением реагентов в продукты, свойства которых отличаются от свойств реагентов, химические реакции сопровождаются физическими эффектами, которые являются признаками химических реакций. О том, что протекает химическая реакция можно судить, например, по:

– выделению продукта с агрегатным состоянием, отличным от агрегатного состояния реагентов (например, разложение твердого известняка сопровождается образованием твердого оксида кальция и выделением углекислого газа);

– образованию продукта с окраской, отличной от окраски реагентов (например, на светлой поверхности стали в результате соединения атомов железа с атомами кислорода воздуха появляется бурый налет оксида железа);

– появлению свечения (например, реакция люминола с перекисью водорода в присутствии красной кровяной соли с образованием аминифталата, азота и воды сопровождается свечением);

– разогреву благодаря выделению теплоты (например, реакция соединения оксида кальция с водой с образованием гидроксида кальция сопровождается выделением теплоты – это экзотермическая реакция);

– охлаждению благодаря поглощению теплоты (например, реакция лимонной кислоты с пищевой содой с образованием цитрата натрия, углекислого газа и воды сопровождается поглощением теплоты – это эндотермическая реакция).

Химические реакции могут протекать с различной скоростью, под которой понимают изменение концентрации одного из реагентов или продуктов реакции в единицу времени. Концентрацией называют отношение числа частиц индивидуального вещества, его количества или массы к объему или массе всей химической системы или площади поверхности разделения не смешивающихся индивидуальных веществ. Таким образом, скорость химической реакции характеризует ее быстроту, т. е. быстроту химического превращения, сопровождающегося уменьшением концентрации одного из реагентов или увеличением концентрации одного из продуктов.

Скорость химической реакции зависит, прежде всего, от природы реагирующих веществ. Например, калий при н. у. реагирует с водой очень бурно и может даже воспламенить выделяющийся водород, в то время как литий реагирует с водой намного медленнее, а железо еще медленнее.

Скорость химической реакции зависит не только от природы вступивших в нее веществ, но и от условий протекания, например, от соотношения концентраций реагентов, их измельченности, характера перемешивания, температуры, давления, присутствия катализаторов. Причем, изменения условий протекания химической реакции, может привести к изменению не только скорости ее протекания, но и образования продуктов из ряда возможных для этой реакции. Например, медь реагирует с разбавленной серной кислотой в присутствии кислорода воздуха очень медленно с образованием сульфата меди и воды, а с концентрированной серной кислотой при сильном нагревании не только увеличивается скорость реакции, но и наряду с сульфатом меди и водой образуется еще диоксид серы.

Скорость химической реакции возрастает с увеличением концентраций реагентов, их измельченности, с улучшением их перемешивания, с увеличением температуры и давления в реакционной системе, т. к. все это способствует более частому и более интенсивному соударению микрочастиц реагентов. Например, взаимодействие водорода с кислородом при комнатной температуре почти не происходит, при 500 °С эта реакция протекает всего за 50 мин., а при 700 °С она протекает почти мгновенно.

Катализатор – это вещество, ускоряющее химическую реакцию посредством промежуточного химического взаимодействия с реагентами, но в реакции не расходующееся и не входящее в состав конечных продуктов. Каталитическими свойствами обладают многие простые и сложные вещества, в т. ч. органические. Например, самопроизвольное разложение перекиси водорода на воду и кислород при н. у. идет медленно, но добавление небольшого количества диоксида марганца ускоряет реакцию почти до взрыва. Или порошок алюминия с парами йода при н. у. не обнаруживает заметных признаков взаимодействия, но достаточно капли

воды, чтобы вызвать бурную реакцию. Некоторые катализаторы позволяют существенно снизить не только температуру, но и давление. Например, синтез метанола из угарного газа и водорода без катализатора осуществляется при давлении до 1000 атм. и температуре 300-400 °С, в то время как в присутствии катализатора на основе оксидов цинка и меди реализуется при давлении 50 атм. и температуре 260-290 °С. Для повышения скорости сгорания смеси бензина и воздуха в двигателях внутреннего сгорания в бензин добавляют катализатор в виде органического соединения металла, например, циклопентадиенилтрикарбонилмарганец.

Каждый катализатор обладает специфичностью действия, т. к. ускоряет одну или несколько однородных химических реакций. Поэтому при наличии одних и тех же реагентов можно получить разные продукты в зависимости от используемого катализатора. Получается, что какой-либо катализатор, ускоряя, направляет химическую реакцию на получение конкретных продуктов из ряда возможных. Например, из смеси оксида углерода и водорода, подбирая нужный катализатор, можно получить или метан, или смесь жидких углеводородов, или высокомолекулярные твердые углеводороды, или метиловый спирт, или изобутиловый спирт, или другие продукты.

Ускорение основной (базисной) химической реакции в присутствии катализатора называют катализом, а саму базисную химическую реакцию в присутствии катализатора – каталитической. Промежуточный комплекс катализатора с реагентами, образовавшийся в результате их взаимодействия, называется элементарной каталитической системой. Элементарная каталитическая система переходная, т. к. ее существование завершается образованием продуктов и восстановлением катализатора. Если в ходе реакции идет постоянный приток извне новых реагентов, отвод готовых продуктов, а также выполняются еще некоторые дополнительные условия, реакция может идти неограниченно долго, находясь на одном и том же стационарном уровне. Такие многократно возобновляемые комплексы катализатора с реагентом и являются элементарными открытыми, т. е. незамкнутыми, не изолированными от внешней среды, каталитическими системами.

Разновидностью катализа является автокатализ, когда в качестве катализатора выступает один из продуктов или реагентов химической реакции. Если катализатором является один из продуктов химической реакции, тогда эта реакция в начале протекает медленно, но по мере накопления продукта-катализатора она самоускоряется. Так, например, происходит в автокаталитической реакции взаимодействия этилацетата и воды с образованием уксусной кислоты и этилового спирта, катализатором которой является уксусная кислота.

По направлению все химические реакции можно разделить на необратимые и обратимые. Необратимыми называют химические реакции, в результате которых исходные вещества практически полностью превращаются в продукты. Таких реакций немного. Это, например, реакции горения. Гораздо более многочисленную группу составляют обратимые реакции, которыми называют химические реакции, протекающие одновременно в двух противоположных направлениях – прямом и обратном. Например, в прямом направлении водород и азот дают аммиак, а в обратном аммиак распадается на водород и азот. В обратимых процессах скорость прямой реакции вначале максимальна, а затем уменьшается из-за того, что уменьшаются концентрации исходных веществ, расходуемых на образование продуктов реакции. Скорость обратной реакции, наоборот, минимальна вначале и увеличивается по мере увеличения концентрации продуктов реакции. Наконец, наступает такой момент, когда скорости прямой и обратной реакций становятся равными. Такое состояние обратимого химического процесса, при котором скорость прямой химической реакции равна скорости обратной химической реакции, называют химическим равновесием. Параметры состояния химической системы при химическом равновесии не зависят от времени. Химическое равновесие является динамичным (подвижным), т. к. при его наступлении реакция не прекращается, но неизменными остаются концентрации компонентов, т. е. за единицу времени образуется такое же количество продуктов прямой реакции, какое превращается в исходные вещества. При неизменных условиях равновесие обратимой реакции может сохраняться неопределенно долгое время, а при их изменении химиче-

ское равновесие может сместиться в сторону либо прямой, либо обратной реакции. Если изменить одно из условий – температуру, давление или концентрацию веществ, при которых данная система находится в состоянии химического равновесия, то равновесие сместится в направлении, которое ослабляет это изменение.

4. Концепция химической эволюции

- о самосовершенствовании катализатора;*
- об изменчивости, конкуренции и химическом отборе катализаторов;*
- о химической эволюции и эволюционирующем веществе;*
- о прогрессивном усложнении открытых каталитических и автокаталитических систем, а также молекул и макромолекул и появлении гиперциклов*

Представления об эволюции материи на химическом уровне ее организации, от которой также зависит разнообразие и свойства индивидуальных веществ, формировались благодаря теоретическим работам, в первую очередь, таких ученых, как американский физикохимик 'Аллан 'Толботт Гу'отми (середина XX в.), советско-российский химик Алекс'андр Прок'офьевич Руд'енко, западногерманский физикохимик М'анфред 'Эйген и австрийский химик-теоретик П'етер К. Ш'устер (вторая половина XX в.). Они весьма актуальны, имеют не только научную, но и культурную ценность.

В ходе базисной каталитической химической реакции может наблюдаться такое перестраивание структуры катализатора, благодаря чему эффективность катализа в целом повышается. Такое явление названо самосовершенствованием катализатора.

Молекулы катализаторов, осуществляющие базисную каталитическую химическую реакцию, могут по причине каких-то внешних воздействий измениться. Любое изменение молекулы катализатора тут же отразится на ее каталитической активности, т. е. способности создавать элементарные открытые каталитические системы и осуществлять катализ. При этом активность катализатора, а соответственно и эффективность катализа и базисной каталитической химической реакции, может либо повыситься, либо понизиться. Более активные катализаторы эффективнее перерабатывают реагенты, осуществляют катализ и базисную катали-

тическую химическую реакцию, а менее активные катализаторы намного менее эффективно перерабатывают те же реагенты, уступая более активным катализаторам. Получается, что большую долю имеющихся реагентов успевают переработать более активные катализаторы, способные быстрее создавать элементарные открытые каталитические системы. В результате такой конкуренции между катализаторами за реагенты и химического отбора доминируют и преимущественно протекают те базисные каталитические химические реакции, которые идут быстрее. Механизмы конкуренции и химического отбора наиболее активных катализаторов складываются именно по параметру их абсолютной каталитической активности. Большая активность катализатора может сочетаться с их большей специфичностью и большей сложностью строения молекулы.

Таким образом, случайная изменчивость катализаторов и химический отбор наиболее активных из них в целом приводит к самопроизвольному необратимому и направленному улучшению элементарной открытой каталитической системы и базисной каталитической химической реакции, что и составляет суть необратимого процесса их саморазвития или эволюции. Эволюционирующим веществом в химической эволюции являются катализаторы. С наибольшей скоростью и вероятностью образуются те пути эволюционных изменений катализатора, на которых происходит максимальное увеличение его абсолютной активности. Химическая эволюция может идти не только благодаря самопроизвольному направленному и необратимому многократному последовательному изменению катализатора в сторону его большей активности, и, что более вероятно, специфичности и сложности, а также самопроизвольному необратимому и направленному улучшению элементарной открытой каталитической системы, но и благодаря дроблению самой базисной каталитической химической реакции на элементарные стадии и появлению новых катализаторов этих стадий, в т. ч. и с формированием сложной автокаталитической химической реакции, в которой один из продуктов предыдущего этапа является катализатором следующего этапа химического превращения вещества. Если продукт завершающего этапа целой цепи автокаталитических превращений

становится катализатором начального этапа, тогда цепь автокаталитических превращений замыкается, формируя замкнутый автокаталитический цикл. Такие автокаталитические циклы способны к осуществлению круговорота веществ.

Получается, что в процессе химической эволюции формируются и развиваются, конкурируя друг с другом за реагенты и подвергаясь химическому отбору, разнообразные открытые каталитические системы, отличающиеся от внешней среды (хотя и не отделенные от нее явно) и осуществляющие связанные друг с другом базисные химические реакции по переработке имеющихся реагентов во все более сложные и высокоорганизованные продукты, которые, обладая каталитическими свойствами, запускают новые этапы химических превращений. Эти сложные (многоэтапные) открытые каталитические системы могут развиваться и как линейные, и как разветвленные, и как циклические (менее сложные автокаталитические циклы и более сложные гиперциклы, отличающиеся тем, что продукт какого-либо их отдельного звена не только является катализатором следующего превращения, но еще способен к самокопированию, или репликации). При этом максимальное эволюционное преимущество получают открытые каталитические системы, развивающиеся на базе экзотермических реакций. Являясь химическими системами, эволюционирующие открытые каталитические системы способны приспособливаться к внешней среде, подгоняя себя под ее изменяющиеся условия. Суть химической эволюции в том, что ресурсом в виде реагентов завладевает та открытая каталитическая система, которая быстрее его использует несмотря на то, как бы много ресурса ни было. Т. к. большая активность катализатора может сопровождаться его усложнением, то и эволюция открытой каталитической системы сопряжена с прогрессивным усложнением молекул с превращением их в макромолекулы.

5. Концепция многоуровневой иерархии химических систем

Совокупности взаимодействующих между собой материальных объектов одного класса образуют химические системы одного и того же уровня. Но эти химические системы, взаимодействуя между собой как единицы, образуют более сложные и масштабные химические системы, образующие выше расположенный уровень. Так формируется иерархический ряд химических систем. Выделяют следующие уровни иерархического ряда химических систем:

1) атомов – уровень взаимодействия электронов электронных оболочек с ядром, а также между собой (валентных, остовных) в том или ином атоме, что определяет разнообразие и соответствующие свойства химических элементов, в т. ч. валентность, металличность, неметалличность или амфотерность;

2) молекул – уровень взаимодействия атомов химических элементов в той или иной молекуле, что определяет возможные состав и структуру молекулы, а также возможные ее изменения;

3) макромолекул – уровень взаимодействия мономеров в той или иной макромолекуле, что определяет возможные состав и структуру макромолекулы, а также возможные ее изменения;

4) супрамолекулярных ансамблей – уровень взаимодействия молекул в том или ином супрамолекулярном ансамбле, что определяет возможные состав и структуру супрамолекулярного ансамбля, а также возможные его изменения;

5) индивидуальных веществ – уровень взаимодействия атомов, молекул, макромолекул или супрамолекулярных ансамблей в том или ином индивидуальном веществе, что определяет возможные состав и структуру индивидуального вещества, в т. ч. полимера, а, следовательно, его свойства, а также возможные их изменения.

Литература

Бертло, П. Э. М. Классические синтезы / П. Э. М. Бертло // Успехи химии. – 1939. – Т. 8. – Вып. 5.

Бутлеров, А. М. Сочинения. Т. 2. Введение к полному изучению органических соединений / А. М. Бутлеров. – М. : АН СССР, 1953. – 624 с.

В память 50-летия учёной деятельности Николая Николаевича Бекетова. – Харьков, 1904.

Вааге, П. Исследования сил химического сродства / П. Вааге, К. М. Гульдберг. – Харьков, 1892.

Вант-Гофф, Я. Х. Расположение атомов в пространстве / J. H. van't Hoff ; авториз. пер. с 3-го перераб. нем. изд. Бориса Беркенгейма под ред. Н. Д. Зелинского, Межфакультет. Изд. Комиссия студ-ов Московского Ун-та. – М. : Т-во "Печатня С. П. Яковлева", 1911. – 203 с.

Вант-Гофф, Я. Х. Химическое равновесие в системах газов и разведённых растворов / Я. Х. Вант-Гофф. – М., 1902.

Вернер, А. Новые воззрения в области неорганической химии / А. Вернер. – 5 изд. – Л., 1936.

Дальтон, Дж. Сборник избранных работ по атомистике : 1802-1810 / Дж. Дальтон ; пер. с англ. под ред. Б. М. Кедрова. – Л. : Госхимиздат, 1940. – 244 с.

Жерар, Ш. Ф. Введение к изучению химии по унитарной системе / Ш. Ф. Жерар. – 2 изд. – СПб., 1865.

Купер, А. С. О новой химической теории / А. С. Купер // Столетие теории химического строения. – М., 1961. – С. 31-45.

Лавуазье, А. Л. Предварительное рассуждение из "начального учебника химии" / А. Л. Лавуазье // Успехи химии. – 1943. – Т. XII. – Вып. 5. – С. 359-367.

Лен, Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы / Ж.-М. Лен. – Новосибирск : Наука, 1998. – 334 с.

Ломоносов, М. В. Избранные труды по химии и физике / М. В. Ломоносов. – М. : АН СССР, 1961.

Марк, Г. Ф. Строение высокополимерных органических естественных соединений / Г. Ф. Марк, К. Мейер. – 2 изд. – Л., 1934.

Марк, Г. Ф. Сополимеризация / Г. Ф. Марк, Т. Алфрей, Дж. Борер. – М., 1953.

Марк, Г. Ф. Линейные и стереорегулярные полимеры / Г. Ф. Марк, Н. Гейлорд. – М., 1962.

Менделеев, Д. И. Собр. соч. Т. 1-25 / Д. И. Менделеев. – М. – Л. : Госхимтехиздат : АН СССР, 1934–1954.

Руденко, А. П. Естественноисторическое описание прогрессивной химической эволюции и биогенеза и редуционизм : АН СССР, Науч. центр. биол. исслед. и др. : препринт / А. П. Руденко. – Пушино : НЦБИ АН СССР, 1986. – 18 с.

Руденко, А. П. Энергетический аспект основных закономерностей, причин и движущих сил химической эволюции элементарных открытых каталитических систем : препринт / А. П. Руденко. – Пушино : НЦБИ АН СССР, 1981. – 13 с.

Цюпка, В. П. К содержанию концепций современного естествознания / В. П. Цюпка // Дошкольник и младший школьник в системе современного естественно-математического образования: сб. докл. межрегион. науч.-практ. Интернет-конф., Белгород, 7-20 нояб. 2006 г. – Белгород: Изд-во «Велес», 2007. – С. 94-101. URL: http://www.bsu.edu.ru/_files/Resource/Inet-ConfYoungSchool/Tsjupka.zip

Эйген, М. Гиперцикл : Принципы самоорганизации макромолекул / М. Эйген, П. Шустер ; пер. с англ. под ред. М. В. Волькенштейна и Д. С. Чернавского. – М., 1982.

Яндекс. Словари. URL: <http://slovari.yandex.ru/>

Adolf von Baeyer's Gesammelte Werke : 2 Bd. / Adolf von Baeyer. – Braunschweig, 1905.

Berthollet, C. L. Essai de statique chimique : 2 vols. / C. L. Berthollet. – Paris : Firmin Didot, 1803.

Berthelot, M. L. Untersuchungen über die Affinitäten. Über Bildung und Zersetzung der Ather / M. L. Berthelot, Pean de Saint-Gilles // Ostwald's Klassiker. – N 173. – Leipzig, 1910.

Berzelius, J. J. Lehrbuch der Chemie : [10 bde.] / von J. J. Berzelius ; uebersetzt von F. Woehler. – 3 umgearb. und verm. Original-Aufl. – Dresden : Arnoldische Buchhandlung, 1833–1841.

Boyle, Robert. The Sceptical Chymist: or Chymico-Physical Doubts & Paradoxes, Touching the Spagyrist's Principles Commonly call'd Hypostatical; As they are wont to be Propos'd and Defended by the Generality of Alchymists. Whereuntois præmis'd Part of another Discourse relating to the same Subject / Robert Boyle. – London : Printed by J. Cadwell for J. Crooke, and are to be Sold at the Ship in St. Paul's Church-Yard, 1661. – 442 p.

Bunsen, R. W. Gesammelte Abhandlungen : Bd. 1-3 / R. W. Bunsen. – Leipzig, 1904.

Debray, Henri. Cours élémentaire de chimie / Henri Debray. – Paris, 1863. – 824 p.

Dumas, J.-B. Leçons sur la philosophie chimique, professées au Collège de France en 1836 / J.-B. Dumas. – Paris, 1837. – 352 p.

Fischer, H. E. Gesammelte Werke : Bd. 1-6 / H. E. Fischer ; hrsg. von M. Bergmann. – Berlin,

1906–1924.

Kekule, A. Lehrbuch der organischen Chemie oder der Chemie der Kohlenstoffverbindungen : Bd. 1-3 / A. Kekule. – Erlangen : Verl. von F. Enke, 1861–1862.

Laurent, Auguste. Méthode de Chimie / Auguste Laurent. – Paris : Mallet-Bachelier C.-F., 1854. – P. 28.

Le Chatelier, H. L. Cours de chimie industrielle / H. L. Le Chatelier. – Second edition. – 1902.

Leidheiser, Henry Jr. The Selective Deposition of Carbon on the (111) Face of a Nickel Crystal in the Catalytic Decomposition of Carbon Monoxide / Henry Jr. Leidheiser, Allan T. Gwathmey // Journal of the American Chemical Society. – 1948. – Vol. 70 (3). – P. 1206.

Proust, L.-J. Recueil de différentes observations de chimie / L.-J. Proust // Mémoires présentés à l'Institut des sciences, lettres et arts par divers savans et lus dans ses assemblées. Sciences mathématiques et physiques, 1^{re} série. – 1806. – I (1796-1815). – P. 184–218.

Rose, H. Handbuch der analytischen Chemie : 6 Aufl. : Bd. 1-2 / H. Rose. – Leipzig, 1864–1871.

The foundations of stereo chemistry : memoirs by Pasteur, van't Hoff, Le Bel and Wislicenus / George Mann Richardson, Louis Pasteur, J. H. van't Hoff, J.-A. Le Bel, Johannes Wislicenus. – New York : American Book Co., 1901.

The Free Encyclopedia Wikipedia. URL: <http://en.wikipedia.org/>

Wilhelmy, L. Ueber das Gesetz, nach welchem die Einwirkung der Säuren auf den Rohrzucker stattfindet / L. Wilhelmy // Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie. – 1850. – B. 81. – S. 413–433.

Williamson, Alexander. Theory of Aetherification / Alexander Williamson // Philosophical Magazine. – 1850. – Vol. 37. – P. 350–356.