

О чем умолчали
учебники

И. А. Леенсон

УДИВИТЕЛЬНАЯ
ХИМИЯ

Москва
ЭНАС
2009

УДК 54
ББК 24
Л33

Л33 Леенсон И. А.
Удивительная химия. — М. : ЭНАС, 2009. — 176 с. — (О чем умолчали учебники).

ISBN 978-5-93196-925-1

В увлекательной форме изложены оставшиеся за рамками школьных учебников сведения о химической науке, величайших открытиях ученых-химиков, загадочных фактах и уникальных химических экспериментах.

Для школьников, студентов и учителей, а также для всех, кто желает открыть для себя неизвестную, полную тайн и парадоксов химию.

УДК 54
ББК 24

Учебное издание

Илья Абрамович Леенсон

Удивительная химия

Ведущий редактор *И. А. Монахова*
Редактор *М. П. Забокрицкий*
Дизайн обложки *О. В. Лазаревой*
Оформление серии *Е. Г. Земцовой*
Технический редактор *Ж. М. Голубева*
Компьютерная верстка *С. Ю. Ромашенковой*
Корректор *Г. И. Эрли*

Подписано в печать 6.07.2009. Формат 60×90^{1/8}. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон. Усл. печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 11,1.
Тираж 10 000 экз. (2-й завод 5001–7000 экз.). Изд. № 628/1. Заказ № 1822.

ЗАО «Издательство НЦ ЭНАС».
115114, Москва, Дербеневская наб., д. 11.
Тел./факс (495) 913-66-20.
E-mail: adres@enas.ru http://www.enas.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ОАО «Ордена Октябрьской Революции,
Ордена Трудового Красного Знамени
«Первая Образцовая типография».
115054, Москва, ул. Валовая, д. 28.

ISBN 978-5-93196-925-1

© И. А. Леенсон, 2005
© ЗАО «Издательство НЦ ЭНАС», 2005

Оглавление

Предисловие	5
Из чего все состоит?	8
Первые теории строения мира	10
Что такое элемент	18
Из чего сделаны атомы	23
Химия и нумизматика	26
Химики соревнуются с природой. Химический конструктор	27
Откуда взялись атомы	31
От атомов — к молекулам	35
Как работают химики	37
Измерение массы и объема	37
Перемешивание и термостатирование	48
Измерение температуры	51
Фильтрация и разделение жидкостей	65
Техника безопасности — на первом месте!	68
Первые эксперименты	75
Измеряем плотность металла	75
Измеряем диаметр атома	79
Измеряем длину молекулы	82
Химики анализируют	85
Что такое химический анализ и аналитическая химия	85
Анализ на глюкозу — за несколько секунд	90
Об уксусе, пекарских порошках и «пузырьковом индикаторе»	94
Титрование с индикатором	101
Анализ иодной настойки	108
Сколько в апельсине витамина С	110
Анализ в эмалированной кружке	112
Химики изучают и выращивают кристаллы	115
Кристаллы в природе и в лаборатории	115
Как растет кристалл	118
Вещества для опытов с кристаллами	122
Выращиваем кристаллы	125

Переохлажденные растворы	129
«Золотой дождь» из кристаллов	131
Выращиваем кристаллы меди	132
Химики разгадывают тайны свечения	134
Свет «горячий» и «холодный»	134
Излучение раскаленных тел	138
Люминофоры – источники «холодного» света	143
Холодное «химическое» свечение	147
Химики изучают радиоактивные превращения	149
«Страшное» слово – радионуклид	149
Как быстро распадаются атомы	156
Что такое радиоуглерод и откуда он берется	159
Радиоуглеродный метод датировки	160
Тайна Туринской плащаницы	163
Как радиация помогла измерить число Авогадро	166
Химики музицируют	171

Предисловие

Во второй половине XIX века многие ученые, особенно физики, всерьез полагали, будто все основные открытия в науке уже сделаны, и жалели своих преемников, ученых XX века, на долю которых останутся только кое-какие уточнения. В связи с этим вспоминается история, случившаяся с выдающимся немецким физиком, лауреатом Нобелевской премии Максом Планком (1858–1947); именно он «изобрел» в 1900 году кванты, которые породили массу новых «квантовых» наук, в том числе и квантовую химию. Когда молодой Планк пришел к семидесятилетнему профессору Мюнхенского университета Филиппу Жолли (1809–1884), известному своим изобретением воздушного термометра, и сказал, что хотел бы посвятить себя теоретической физике, то услышал неожиданную отповедь: «Молодой человек! Зачем вы хотите испортить себе жизнь? Ведь здание теоретической физики уже в основном завершено. Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?»

Совершенно иначе смотрят на эту проблему современные ученые. Вот что написано в предисловии к одной из книг по химии: «Далекое от науки люди часто полагают, что раз уж существует какая-либо солидная наука, то уж, конечно, зиждется она на прочном и основательном фундаменте; дело нынешнего поколения – постройка очередного этажа, поскольку все остальное здание уже построено. Однако ни один исследователь так не думает. Более того, именно в фундаменте науки часто обнаруживаются серьезные недоделки, возникает необходимость существенной перестройки основных, опорных представлений. Исследования, направленные на совершенствование этих представлений, и называют фундаментальными – не за объем, а именно за направленность».

Автор другой книги по химии, хотя и смотрит на ту же проблему несколько иначе, фактически говорит о том же: «Вот человек трудится всю жизнь. Творение вырастает во всей красе. Проходят годы. Увенчанный лаврами строитель, может быть, еще жив. Но сооружение уже кажется уродливым и никчемным. Приходят другие люди с отбойны-

ми молотками. Монолит теории превращается в гранитную крошку, и пыль застилает все вокруг. На освободившемся месте возводится нечто воздушное из стекла и металла. Может быть, и это чудо техники обречено на слом. Кто знает? Но оно прекрасно и необходимо — сейчас... И фасад, и внутренняя планировка “здания науки” непрерывно меняются. И как надежда на совершенство, незыблемо стоят фундаментальные теории — творения великих мастеров».

К таким фундаментальным теориям, без сомнения, можно отнести периодический закон, открытый Д. И. Менделеевым (1834—1907) в 1869 году. Об этом законе его автор писал в конце своей жизни: «Повидимому, периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройкой и развитием обещается». Так оно и случилось.

Как видим, многие ученые представляют себе науку как строящееся здание, и это очень образное представление — ведь все видели, как строится дом. Однако современную науку, в том числе и химию, можно представить не только как бесконечно строящееся здание, но и в виде красочной мозаики, над которой в разных местах трудится множество мастеров. Одни начищают «свое» небольшое стеклышко до блеска и занимаются этим всю жизнь; иногда над одним стеклышком трудится несколько человек одновременно (при этом они вполне могут быть незнакомы друг с другом и даже говорить на разных языках). Другие заменяют старые, покрытые пылью и потускневшие детали на новенькие, только что изготовленные в их лабораториях, или же встраивают их на «пустые места». Третьи скептически оглядывают всю картину и пытаются давать рекомендации другим, что и как необходимо делать. Четвертые... В общем, жизнь в мастерской бьет ключом и каждый может найти себе в химии дело по душе.

В этой книжке вы познакомитесь лишь с некоторыми «стеклышками» из огромной «химической мозаики». Одни из них появились сравнительно недавно, при жизни нынешнего поколения. Другим — много веков. Это — те самые фундаментальные химические понятия, которым время не грозит уничтожением. Даже если вы еще не начали изучать химию в школе, вы поймете все, о чем написано в этой книжке (ну, может быть, почти все). В ней даже нет химических формул, которые обычно пугают новичков. Если же вы в химии не новичок и любите эту науку, то тоже найдете здесь для себя много нового и интересного. А если у вас есть к тому же склонность к экспериментированию, желание все проверить, что называется, собственными руками, то эта книжка поможет вам провести некоторые не очень сложные эксперименты. Ведь недаром говорят, что лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. Особенно это относится к химии. Химия — наука прежде всего экспериментальная (по крайней мере такой она была последние

300 лет). И в химии особенно важно проделать своими руками хотя бы некоторые наиболее простые эксперименты, увидеть их результаты и постараться понять, почему наблюдается именно это явление, а не какое-либо другое. Понять же различные химические явления школьнику XXI века намного легче, чем его сверстнику из далекого прошлого, так как при изучении того или иного явления он может опираться на факты и теории, установленные и разработанные многими поколениями ученых. В память о них английский химик Джозеф Уильям Меллор (1865—1938), закончив в 1937 году, после пятнадцатилетней титанической работы, шестнадцатитомную энциклопедию по неорганической химии, написал с признательностью на титульном листе своего труда: «Посвящается рядовым огромной армии химиков. Их имена забыты, их работы остались...»

Но начнем мы эту книжку с несколько неожиданного вопроса.

ИЗ ЧЕГО ВСЕ СОСТОИТ?



На этот с виду простой вопрос люди разных профессий ответят по-разному. Про стол и стул многие скажут, что они сделаны из дерева (а может быть, пластмассы; бывают и металлические стулья, неспециалисты скажут про них — «железные»). Бутылка или стакан сделаны из стекла; дешевая ложка или кастрюля — из алюминия, ложка получше — из нержавеющей стали, а ложка из богатого старинного дома — из серебра; гвоздь или иголка — из железа. Из железа сделан и автомобиль (но, конечно, кроме железа, в нем есть и стекло, и пластмасса, и много разных других материалов). Все это совершенно правильно. Хотя химик может и уточнить, сказав, что стул сделан из древесины, которая состоит в основном из целлюлозы. О стуле из пластмассы он может сказать — из какой именно пластмассы. Такое же уточнение он может сделать и в отношении пластмассовой бутылки. Например, увидев в нижней ее части выдавленную латинскими буквами надпись *PET*, он сразу поймет, что это — сокращенное международное обозначение пластмассы (полиэтилентерефталата).

Но даже специалисту не всегда легко так же просто сказать, из чего состоят, например, волосы или кожа человека, какое-нибудь лекарство или мазь в тубике. Он может лишь сказать, что это сложная смесь — композит.

А теперь вопрос потруднее: из чего состоит дерево, стекло, пластмасса, алюминий, железо, а также множество других металлов, их сплавов и неметаллов? Мало кто из людей задумывался раньше над такими «ненужными» вопросами. А так ли они не нужны? Ведь если знать, «из чего сделаны» разные металлы, то, может быть, удастся превратить свинец в золото? И не так уж важно, что свинец темный, тусклый, легко плавится, а если его нагреть посильнее, он и вовсе превратится в «окалину» желтого цвета — в свинцовый глет или в красный свинцовый сурик (эти вещества издавна использовали для приготовления глазурей и красок). А вот золото — желтое, блестящее, расплавить его намного труднее, оно никогда не «портится», не превращается при нагревании в окалину, не растворяется в кислотах. Недаром алхимики (так называли средневековых химиков) считали золото «царем металлов». Они были потрясены, когда

обнаружили «адскую смесь» из соляной и азотной кислот, которая оказалась способна растворить само золото! Эту смесь так и назвали — царская водка (рис. 1.1).

А главное — золото всегда было мерилom ценностей, обладание золотом означало обладание всем остальным. На небольшой кусочек золота, который даже ребенок спрячет в кулачке, можно было купить раба или целый воз хлеба. Свинец же был сравнительно дешев; его использовали даже для починки водопроводных труб, а иногда из свинца делали и сами трубы. Недаром по-английски водопроводчик — *plumber* (от латинского *plumbum* — свинец). Почему же золото надо «делать» именно из свинца? Ну, это древним было понятно: ведь свинец, как и золото, — тяжелый металл. (На самом деле свинец заметно легче: если кубик золота размером 1 дм³ весит 19,3 кг, то такой же кубик свинца — «всею лишь» 11,3 кг; правда, дошкольник, пожалуй, не поднимет ни тот ни другой.) Согласно иной «теории», золото надо было делать из ртути, которая тяжелее свинца: литр этой жидкости весит 13,6 кг. Так что полное ведро со ртутью обычному человеку даже от пола не оторвать!

Однако несмотря на многовековые старания тысяч алхимиков (рис. 1.2), никому из них не удалось превратить свинец не то что в золото, но даже в очень похожее на свинец олово. И постепенно становилось все более очевидным, что превратить один металл в другой вообще невозможно. А почему?

Чтобы превратить одно вещество в другое, например газ этилен в полимер, из которого делают полиэтиленовые пакеты и другие изделия, прежде всего надо знать, что общего у этих веществ, как они



Рис. 1.1. Рисунок из алхимического трактата: лев, символизирующий царскую водку, пожирает солнце — символ золота



Рис. 1.2. Лаборатория алхимика. Старинный рисунок

устроены. А потом уже думать о том, как их можно «перестроить». В такой перестройке и заключается сущность химических превращений. Тысячи и тысячи проведенных опытов убедили ученых в том, что превращения одних веществ в другие происходят не только в природе — их можно провести искусственно. Более того, можно получить искусственным путем такие вещества, которых в природе никогда не существовало. И таких веществ сейчас известно более 25 миллионов! Посмотрите на тот же прозрачный легкий пакет, который иногда неправильно называют «целлофановым», — он сделан на химическом заводе из замечательного водонепроницаемого вещества — полиэтилена; еще не так давно полиэтилен стоил дорого, и хозяйки, которые сейчас просто выбрасывают грязные пакеты, когда-то их стирали, а потом сушили на веревке, как белье. Люди старшего поколения помнят, как у станций метро стояли будки, где мастера, чьи руки были сплошь перепачканы пастой разных цветов, заправляли использованные стержни для шариковых ручек! Сегодня в это просто трудно поверить.

Но не все превращения оказались возможными. Например, никто не смог из угля сделать серу. Еще в XVIII веке ученые убедились в том, что существуют химические элементы — самые простые вещества, которые друг в друга не превращаются. А в XX веке, когда стало понятно, как устроены атомы, это убеждение получило теоретическое объяснение. Но прежде должно было возникнуть и оформиться само понятие химического элемента.

Первые теории строения мира

Первые теории о том, как устроены вещества, почему они такие разные и как могут превращаться друг в друга, появились более 2500 лет тому назад. В то время над этими вопросами размышляли философы; в переводе с греческого слово «философ» означает «любитель мудрости». Никаких опытов они не проводили, практическое применение знаний многих из них тоже мало интересовало. Главное для них было — как все происходит, и почему так, а не иначе. То есть они занимались тем же, чем занимаются современные физики и химики-теоретики. При этом древние философы считали, что до всего человек может прийти собственным умом, путем строгих логических рассуждений. И на этом пути они достигли удивительных, выдающихся результатов!

С древних времен одним из главных вопросов, занимающих философов, был вопрос: из чего все состоит? Первым на него попытался ответить греческий философ Фалес (640—550 до н. э.). Он полагал, что, поскольку одни вещества могут превращаться в другие, все они «деланы» из одного и того же «первичного вещества» и являются только

его разновидностями. Таким веществом Фалес считал воду, причем, конечно, не воду в реке, а воду как некую идеальную субстанцию, которая является «прародительницей» всего остального. Действительно, всякий знает, что чистая вода не имеет ни формы, ни цвета, ни запаха. Более того, она легко переходит из одного состояния в другое — замерзает в лед или превращается в пар. Много тысячелетий назад среди вечных снегов в Альпах, на территории современной Швейцарии, нашли очень красивые, совершенно бесцветные кристаллы, весьма напоминающие чистый лед. Древние натуралисты так их и назвали — «кристаллос»; это слово происходит от греческого «криос» — «лед». Полагали, что лед, образующийся в горах, на сильном морозе, становится твердым как камень и теряет способность таять при нагревании. Один из самых авторитетных античных философов Аристотель (384—322 до н. э.) писал, что «кристаллос рождается из воды, когда она полностью утрачивает теплоту». Римский поэт Клавдиан в 390 году уже новой эры то же самое описал красивыми стихами:

*Ярой альпийской зимой лед превращается в камень.
Солнце не в силах затем камень такой растопить.*

(Пер. М. Ильинского)

Любопытно, что такой же ход рассуждений был и у мудрецов древнего Китая и Японии — лед и горный хрусталь обозначали там одним и тем же словом. Интересно, как в разных странах и в разное время людям приходят в голову одни и те же идеи! Со временем, конечно, стало ясно, что горный хрусталь и лед — различные вещества. Однако оба термина сохранились: «кристалл» — в физике, химии, минералогии, «хрусталь» — в стекольном деле, где хрусталем называют особое стекло, например, с добавками соединений свинца.

Если вода может застыть в красивый твердый минерал, а также превратиться в пар, то почему она не может превратиться и во все остальное? Идея о воде как «первичном элементе» помогала объяснять единство вечно существующей материи: «Ничто не возникает из ничего, и ничто не исчезает, — писал греческий философ Анаксагор (ок. 500—428 до н. э.), — происходит только перераспределение тех вещей, которые существовали прежде». Это была очень глубокая и, по существу, правильная идея.

Конечно, древние не знали, да и не могли знать, что же представляют собой эти первоначала. Не все соглашались с Фалесом. Были философы, считавшие, что первооснова всех вещей — воздух, который, сгущаясь, превращается в воду и землю, а из них возникает все остальное. Другие полагали, что первоэлементом является огонь — ведь он так переменчив, так непостоянен. Но почему должно быть только

одно «первоначало», только один первичный элемент, из которого все и построено? Почему все «детали мирового конструктора» должны быть одинаковыми? Скорее всего, их больше — но сколько?

Сейчас известно, что в природе существует около 90 различных «первоначал» — атомов. Но если бы об этом сказали грекам, они бы, скорее всего, возмутились: «Зачем в “конструкторе” так много лишних деталей! Достаточно всего нескольких!» Между тем мир очень сложен, он включает в себе огромное множество различных веществ. Можно ли свести сложное к простому? Можно ли, исходя из нескольких «первоначал», построить все разнообразие веществ со всеми их свойствами? Это был ключевой вопрос науки. Сейчас ребенок, у кого есть хороший конструктор, скажет: «Да, можно — если в конструкторе есть детали нескольких сортов и этих деталей очень много, то из них можно построить все, что угодно!»

Многие философы, и среди них Эмпедокл (ок. 400 — ок. 430 до н. э.) и Аристотель, считали, что «первичных начал» всего четыре — это «земля», «вода», «воздух» и «огонь». Эти слова взяты в кавычки, потому что «вода» у Аристотеля — это не знакомая всем жидкость, а, как у Фалеса, лишь носитель определенных качеств: влажности и холода. Чем больше в каком-нибудь теле «воды», тем оно холоднее и более влажное. Соединение элементов с противоположными свойствами невозможно: теплота не может соединиться с холодом, а влага с сухостью. По Аристотелю, свойства элементов комбинируются парно (рис. 1.3): вода влажная и холодная, огонь сухой и горячий, воздух теплый и влажный, земля холодная и сухая.

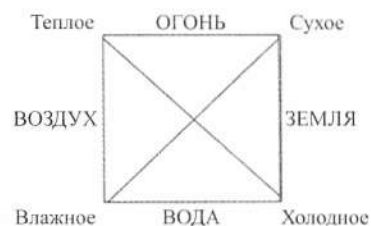


Рис. 1.3. Элементы Аристотеля в сочетании с разными «качествами»

К этим четырем «земным элементам» Аристотель присоединил нематериальный, «эфирный» элемент, который проникает во все вещи — *quinta essentia*, т. е. «пятая сущность»; вот откуда возник термин «квинтэссенция», который означает самое главное, важное, наиболее существенное. Можно ли из четырех «первичных начал» и «эфира» построить все остальные тела? Аристотель и его последователи считали, что можно, если четыре «первичных начала» с помощью «пятой сущности» способны превращаться друг в друга. Так, вода может превращаться в воздух и землю, потому что их общим свойством является влажность. Таким образом появилась «химическая теория», показывающая, как одни вещества могут превращаться в другие.

Великий греческий философ Платон (ок. 428 — ок. 348 до н. э.) сделал очень интересную вещь: он уподобил каждое «первоначало» правильному выпуклому многограннику. Таких многогранников существует всего пять, и их часто называют «платоновыми телами» (рис. 1.4). Напомним, что правильным называется выпуклый многогранник, построенный из одинаковых правильных многоугольников.

Например, из четырех равносторонних треугольников можно сделать тетраэдр — многогранник с четырьмя вершинами, четырьмя гранями и шестью ребрами, т. е. фигуру в форме пакета, в котором когда-то продавали молоко. Кстати, «тетра» по-гречески означает «четыре», а «эдра» — «поверхность, сторона». Из шести квадратов легко получается второе платоновое тело — куб. Из восьми равносторонних треугольников состоит октаэдр, в переводе с греческого — «восьмигранник» (представьте себе две египетские пирамиды, сложенные вместе своими основаниями, — это и будет октаэдр). Из двенадцати правильных пятиугольников получается двенадцатигранник — додекаэдр. Икосаэдр («эйкос» по-гречески «двадцать») состоит из двадцати равносторонних треугольников. Других правильных многогранников не существует. Попробуйте склеить все эти фигурки из бумаги. Кстати, это не просто забава. Именно такой «детской игрой» занимались ученые, открывшие новый тип молекул, построенных из атомов углерода; они назвали их фуллеренами — по имени современного архитектора Роберта Бакминстера Фуллера, который строил купола из многогранников. За это открытие они в 1996 году получили высшую научную награду — Нобелевскую премию по химии. Самая симметричная и красивая молекула — бакминстерфуллерен — имеет 60 вершин и состоит из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников. Конечно, эта фигура не является правильной (ведь в ней есть и пяти-, и шестиугольники), зато она выглядит точно так же, как современный футбольный мяч!

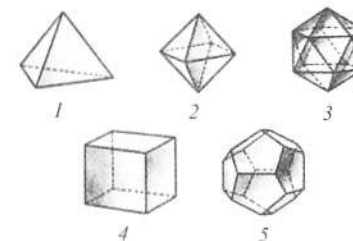


Рис. 1.4. Пять правильных многогранников — платоновых тел: 1 — тетраэдр; 2 — октаэдр; 3 — икосаэдр; 4 — куб; 5 — додекаэдр

Самое интересное, что Платон, пораженный совпадением количества правильных многогранников с числом «сущностей» природы, посчитал это равенство отнюдь не случайным. И он пришел к заключению, что огонь построен из «колючих» тетраэдров, воздух — из более «округлых» октаэдров, вода — из еще более «круглых» икосаэдров, а земля — из кубов, которые могут плотно прилегать друг к другу. Оставался еще додекаэдр, и Платон решил, что такую красивую и совершенную форму имеет весь мир — Вселенная!

Самое интересное, что Платон, пораженный совпадением количества правильных многогранников с числом «сущностей» природы, посчитал это равенство отнюдь не случайным. И он пришел к заключению, что огонь построен из «колючих» тетраэдров, воздух — из более «округлых» октаэдров, вода — из еще более «круглых» икосаэдров, а земля — из кубов, которые могут плотно прилегать друг к другу. Оставался еще додекаэдр, и Платон решил, что такую красивую и совершенную форму имеет весь мир — Вселенная!

Далеко не все философы соглашались с таким представлением об устройстве мира. Так, Демокрит (ок. 460 — ок. 370 до н. э.) считал, что все тела состоят из множества мельчайших частичек, названных им атомами (в переводе — «неделимые»). Логично было предположить, что существуют различные «сорты» атомов с разными размерами и формой. Они могут сцепляться друг с другом, например, с помощью крючочков или как-нибудь иначе. Скомбинировав атомы разными способами, как детали в конструкторе, можно получать разные вещества, а также превращать одни вещества в другие. Считали, например, что золото и серебро «растут» под землей, когда атомы группируются в нужном порядке. Поэтому не удивительными кажутся попытки, предпринимавшиеся в течение многих веков, превратить неблагородные металлы в благородные.

Учение о том, что все вещества состоят из мельчайших частиц, получило название атомистической теории. Эта теория — одно из наиболее важных, фундаментальных понятий в науке. Догадки древних, основанные лишь на размышлении, в принципе не так уж далеки от современных представлений: существует ограниченное число различных типов атомов (т. е. элементов), которые могут по-разному соединяться друг с другом, давая огромное разнообразие веществ с разными свойствами. А процесс перестройки взаимного расположения атомов составляет сущность химической реакции. Атомистическая теория была величайшим достижением человеческого разума. Очень образно о ней сказал лауреат Нобелевской премии по физике Ричард Фейнман (1918—1988): «Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — атомная гипотеза (можно называть ее не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому. В одной этой фразе... содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения».

Никаких реальных «доказательств» существования атомов у древних, конечно, не было и быть не могло — только рассуждения. Например такие: что будет, если, допустим, яблоко разрезать пополам? Сейчас ответ очевиден даже малому ребенку: получатся две половины яблока. А если каждую половину снова разрезать пополам? Получатся четвертинки. Потом — восьмушки, потом — шестнадцатые доли... Через некоторое время, скажете вы, придется взять увеличительное стекло и лезвие бритвы, потом — микроскоп и специальные инструменты. А потом?

Те из вас, кто учился музыке, возможно, вспомнят основу музыкальной грамоты: целая по длительности нота делится на половинки, последние — на четверти, потом идут восьмые доли, шестнадцатые, тридцать вторые, очень редко — шестьдесят четвертые... Меньшими долями композиторы обычно не пользуются, так как их уже трудно «втиснуть» в нужный отрезок времени. О связи музыки и химии мы еще поговорим, а пока подумаем над таким вопросом: можно ли (хотя бы теоретически) создавать все более и более короткие звуки? И есть ли у этого процесса предел? Вопрос этот на самом деле очень непрост, и ответ на него так же не очевиден, как и в случае с яблоком: возможно ли до бесконечности делить его на все более и более мелкие части, или когда-то наступит предел? Древнегреческий философ Левкипп (ок. 500—440 до н. э.) был, возможно, первым человеком на Земле, который две с половиной тысячи лет назад понял (рассуждая чисто логически), что процесс «разрезания яблока» должен рано или поздно прекратиться. Это произойдет тогда, когда мы дойдем до мельчайших частичек, из которых состоят не только яблоки, но и все остальные тела. Эти частички ученик Левкиппа — Демокрит назвал атомами. Демокрит считал, что существуют различные «сорты» атомов с разными размерами и формой. Именно этим объясняются различия в свойствах разных тел.

Атомистический взгляд на мир очень образно и поэтично изложил древнеримский поэт и философ Тит Лукреций Кар (ок. 99—55 до н. э.), которого обычно называют просто Лукрецием. В своей поэме «О природе вещей» он ни разу не употребил слова «атом», хотя и был знаком с этим понятием. Вместо него он использовал более десятка синонимов: «начала», «первоначала», «семена вещей» и др. Некоторые из них («корпускула», «элемент») позднее стали научными терминами. Атомистическое учение Лукреция во многом совпадает с современными представлениями. И если бы последние два тысячелетия его поэму изучали во всех существовавших тогда учебных заведениях, история человечества могла пойти по совершенно иному пути.

Теперь самое время ознакомиться с некоторыми строчками замечательной поэмы Лукреция.

Прежде всего Лукреций предупреждает читателя, что «начала» так малы, что увидеть их нет никакой возможности. Однако размышления над природными процессами убеждают нас в том, что они все же существуют, а не являются плодом фантазии. Вот, почитайте выдержки из его поэмы в переводе Ф. А. Петровского:

*...Начала вещей недоступны для глаза...
Существуют тела, которых мы видеть не можем.
Запахи мы обоняем различного рода,
Хоть и не видим совсем, как в ноздри они проникают.*

*И, наконец, на морском берегу, разбивающем волны,
Платье сырее всегда, а на солнце вися, оно сохнет;
Видеть, однако, нельзя, как влага на нем оседает,
Да и не видно того, как она исчезает от зноя.
Значит, дробится вода на такие мельчайшие части,
Что недоступны они совершенно для нашего глаза.
Так и кольцо изнутри, что долгое время на пальце
Носится, из году в год становится тоньше и тоньше;
Нам очевидно, что вещь от стирания становится меньше,
Но отделение тел, из нее каждый миг уходящих,
Нашим глазам усмотреть запретила природа ревниво.*

Чем не современное объяснение атомной теории строения вещества? Лукреций уверен, что атомы, в отличие от видимых тел, не стареют, не разрушаются, а существуют в неизменном виде вечно и только переходят из одних тел в другие. При этом общее число атомов в мире постоянно:

*...Существуют такие тела, что и плотны, и вечны:
Это — вещей семена и начала в учении нашем,
То, из чего получился весь мир, существующий ныне...
Первоначалам должно быть присуще бессмертное тело,
Чтобы все вещи могли при кончине на них разлагаться.
И не иссяк бы запас вещества...
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.
Иначе ведь не могли бы они, сохраняясь веками,
От бесконечных времен и досель восстанавливать вещи.*

А вот как Лукреций объясняет, каким образом из одних и тех же атомов могут получаться разные вещи: он проводит аналогию между порядком сочетания атомов, соединяющихся друг с другом, и букв, образующих множество разных слов:

*Часто имеет еще большое значенье, с какими
И в положеньи каком войдут в сочетание те же
Первоначала и как они двигаться будут взаимно.
Те же начала собой образуют ведь небо и землю,
Солнце, потоки, моря, деревья, плоды и животных...
Даже и в наших стихах постоянно, как можешь заметить,
Множество слов состоит из множества букв однородных,
Но и стихи, и слова, как ты непременно признаешь,
Разнятся между собой и по смыслу и также по звуку.
Видишь, как буквы сильны лишь одним измененьем порядка.
Что же до первоначал, то они еще больше имеют
Средств для того, чтоб из них возникали различные вещи.*

Лукреций уверен, что многообразие тел можно объяснить не только различным способом соединения атомов между собой, но и тем, что сами атомы отличаются друг от друга. Действительно, интересно ли играть с конструктором, в котором все детали одинаковы? (На самом деле такие «конструкторы» существуют — это кубики, но ведь это игра для самых маленьких.)

*Что же до первоначал, то они еще больше имеют
Средств для того, чтоб из них возникали различные вещи,
Нет ни одной из вещей, доступных для нашего взора,
Чтоб она из начал состояла вполне однородных;
Нет ничего, что различных семян не являлось бы смесью.*

Поразительно, но Лукреций предполагал, по-видимому, делимость атомов! Во всяком случае, именно так можно понимать следующие строчки из его поэмы:

*Предположи, например, что тела изначальные будут
Три или несколько больше частей заключать наименьших;
Если затем ты начнешь эти части у данного тела
Переставлять или снизу наверх, или слева направо,
То обнаружишь тогда, сочетания все их исчерпав,
Все изменения форм, что для этого тела возможны;
Если ж иные еще получить ты желаешь фигуры, —
Части другие тебе прибавить придется.*

А вот еще один довод Лукреция в пользу существования мельчайших частиц материи, находящихся в постоянном движении:

*Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая,
Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света.
Знай же: идет от начал всеобщее это блужданье.
Первоначала вещей сначала движутся сами,
Следом за ними тела из мельчайшего их сочетанья,
Близкие, как бы сказать, по силам к началам первичным,
Скрыто от них получая толчки, начинают стремиться
Сами к движенью, затем побуждая тела покрупнее.
Так, исходя от начал, движение мало-помалу
Наших касается чувств и становится видимым также
Нам и в пылинках оно, что движутся в солнечном свете,
Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит...
Первоначала вещей уносятся собственным весом
Или толчками других.*

Современная наука не подтвердила этот вывод древнего философа: пылинки в луче солнца слишком велики, чтобы молекулы воздуха могли на них действовать, и «пляшут» они под влиянием потоков воздуха. Но, наблюдая значительно более мелкие пылинки под микроскопом, можно увидеть их «пляску», действительно вызванную ударами молекул. Так что в принципе Лукреций правильно описал явление, открытое английским ботаником Робертом Броуном (1773–1858) в 1827 году и теоретически объясненное только в XX веке, в том числе в работе знаменитого физика Альберта Эйнштейна (1879–1955).

Теоретические построения древнегреческих философов были первыми научными построениями. На их основе через много веков зародились современные науки, в числе которых была и химия. Без древней атомистической теории не только химия, но и все естественные науки не могли бы развиваться. Однако на протяжении еще многих столетий лишь малая часть философов и ученых разделяла гипотезу о существовании атомов. Ну а все, что касалось размеров атомов, их массы, формы и т. п., оставалось тайной за семью печатями, и не было даже надежды, что эту тайну удастся раскрыть.

Что такое элемент

Лукреций, написавший свою поэму на латинском языке, часто использовал слово *principium*, которое означает «основа, первоначало». Есть в латинском языке и другое близкое понятие: *elementum*. Оно означает «вещество, стихия», а во множественном числе (*elementa*) — «основания, основные начала». В древности было распространено изречение: «Как слова состоят из букв, так и тела — из элементов». Любопытно, что по одной из версий слово *elementum* происходит от названия следующих по алфавиту латинских согласных: *l, m, n* («*el*» — «*em*» — «*en*») и окончания *t* («*tum*»).

Современное понятие «элемент» появилось в XVII веке. Английский ученый Роберт Бойль (1627–1691) определял элементы не умозрительно, как древние, а чисто практически. Рассуждал он примерно так: «Если вещества невозможно разложить на более простые, значит они являются элементами и состоят из атомов только одного сорта. (Сейчас такие вещества называют простыми.) Если же вещества разлагаются под действием кислот или при сильном нагреве, значит эти вещества состоят из разных элементов и являются сложными веществами».

В те времена считать какое-либо вещество элементом можно было только условно; ведь никто не сомневался в том, что со временем химии сумеют разложить на составные части некоторые из тех веществ, которые признавались простыми. Вот что писал по этому поводу фран-

цузский химик Антуан Лоран Лавуазье (1743–1794) в своем учебнике «Элементарный курс химии», изданном в 1789 году: «Все вещества, которые мы еще не смогли никаким способом разложить, являются для нас элементами; но не потому, что мы могли бы утверждать, что эти тела, рассматриваемые нами как простые, не состоят из двух или большего числа начал, но... потому, что мы не имеем никаких средств их разделить, эти тела ведут себя, с нашей точки зрения, как простые, и мы не должны считать их сложными до тех пор, пока опыт или наблюдения не докажут нам этого».

Сам Бойль, например, полагал, что металлы не являются простыми веществами и потому возможны превращения одних металлов в другие. Такого же мнения придерживался и выдающийся английский физик Исаак Ньютон (1643–1727), потративший массу времени и здоровья на алхимические опыты.

Со временем химии достигли больших успехов в изучении различных превращений. Но у них еще не было достаточно надежных методов, которые бы позволяли различать простые и сложные вещества. Отсюда возникали ошибки даже у известных ученых. Сам Лавуазье в своем учебнике привел таблицу примерно из 30 простых тел. Среди них были действительно простые вещества (газы — кислород, азот, водород; металлы — серебро, золото, медь, олово, железо, ртуть, никель, марганец и др.; неметаллы — сера, фосфор, углерод, хлор). А были и сложные вещества, о чем тогда еще не было известно (например: известь, глинозем, кремнезем). Воду, например, долго считали элементом, пока Лавуазье не опроверг это мнение и не написал в 1783 году сочинение, которое он назвал «Статья, имеющая целью доказать, что вода не простое вещество, не элемент в собственном смысле слова, но что она может быть разложена и получена вновь». Оказалось, что вода образуется при горении многих веществ, например водорода. А с помощью раскаленного железа воду можно снова разложить на водород и кислород (Лавуазье пропускал для этого пары воды через раскаленный ружейный ствол).

Основу современной атомистики заложил английский ученый Джон Дальтон (1766–1844). Свою теорию он вывел исходя из сделанного им открытия. Оказалось, что многие элементы могут соединяться друг с другом в разных соотношениях, при этом образуются разные вещества. А самое главное — в этих веществах массы элементов кратны друг другу и соотносятся как небольшие числа. Например, углерод может соединяться с кислородом в массовых соотношениях 3 : 4 или 3 : 8 (при этом образуется либо угарный газ, либо углекислый); сера соединяется с кислородом в соотношении 1 : 1 или 2 : 3, азот с кислородом — в соотношении 7 : 4, 7 : 8, 7 : 12, 7 : 16 и 7 : 20 (правда, Дальтону были известны не все эти соединения). Платон, наверное, долго ломал

бы голову, соображая, как эти странные соотношения можно подогнать к его теории строения мира. Дальтон же рассудил просто. Существуют атомы углерода, кислорода, серы, азота, причем атомы каждого элемента имеют свою массу. В разных веществах атомы соединяются друг с другом в строго определенных соотношениях. Например, если один атом азота «весит» 7 условных единиц, а один атом кислорода — 8 таких же единиц, то соотношение атомов в разных оксидах азота (так называются соединения азота с кислородом) будет: 2 : 1, 1 : 1, 2 : 3, 1 : 2 и 2 : 5.

Рассуждая таким образом и основываясь на экспериментах, Дальтон составил первую таблицу атомных масс. Атомы разных элементов он обозначил разными фигурками, запомнить которые было довольно трудно. Позднее шведский химик Йенс Якоб Берцелиус (1779—1848) предложил очень простой способ для обозначений атомов — по первой букве названий элементов на латинском языке. Если же буквы у разных названий оказывались одинаковыми, тогда он добавлял вторую букву. Например, водород на латыни — *Hydrogenium* (в переводе — «рождающий воду»), знак элемента Н; углерод — *Carboneum*, знак С; кислород — *Oxygenium* («рождающий кислоты»), знак О; азот — *Nitrogenium* («рождающий селитру»), знак N и т. д. Теперь различные оксиды азота можно было записать совсем просто: N_2O , NO, N_2O_3 , NO_2 и N_2O_5 . На таком «языке» говорят сегодня все химики мира; написав формулы, китайский химик легко поймет норвежского, хотя норвежец может не знать ни одного слова по-китайски, и наоборот.

Помимо аргументов, основанных на представлениях о кратных соотношениях, в пользу атомистического учения приводились и другие доводы. Например, существование красивых кристаллов разной формы — простой (как у поваренной соли, кристаллы которой образуют кубики) или сложной (рис. 1.5) — можно было объяснить тем, что они построены из атомов, которые соединены друг с другом в пространстве по определенным правилам.

Дальтон, чтобы его теория была понятной и наглядной, демонстрировал на своих лекциях разноцветные кубики, которые символизировали атомы разных элементов. Из этих кубиков, подбирая их в нужном количестве, он составлял различные химические соединения. Не все слушатели хорошо понимали суть его теории. Когда одного из студентов спросили, что такое атомы, он ответил: «Атомы — это разноцветные деревянные кубики, которые мистер Дальтон показывает на лекциях...»

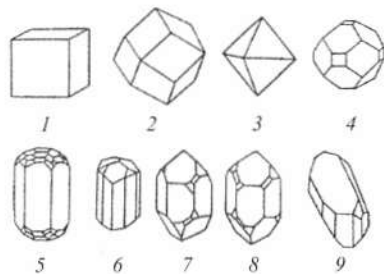


Рис. 1.5. Кристаллы разной формы: 1 — каменная соль; 2 — гранат; 3 — алмаз; 4 — кварц; 5 — берилл; 6 — турмалин; 7 — «правая» форма кварца; 8 — «левая» форма кварца; 9 — медный купорос

Массы атомов Дальтон выражал в относительных единицах — ведь он не мог взвесить отдельный атом, который так мал, что не виден даже в микроскоп! Можно было бы взвесить кусочек вещества побольше, но тогда для определения массы одного атома надо было точно знать, сколько атомов в этом кусочке. Во времена Дальтона этого не знали. Позднее химики и физики определили, сколько атомов содержится, например, в одном миллиграмме золота — едва заметной маленькой крупинке. Оказалось — астрономическое число: $3 \cdot 10^{18}$ (т. е. 3, умноженное на 10 с восемнадцатью нулями)! Сумели построить и приборы, которые позволили разглядеть отдельные атомы (рис. 1.6). Теперь уже никто не вправе усомниться в том, что атомы существуют на самом деле! Правда, значение греческого слова «атомос» уже не соответствует современным представлениям об атоме как о неделимой частице: атомы состоят из более мелких «деталей» — протонов, нейтронов и электронов, а есть и еще более «элементарные» — кварки. Но этот «конструктор» уже не для химиков — им пользуются физики для «конструирования» казавшихся ранее элементарными частиц — протонов и нейтронов.

В силу того, что никакие химические реакции не способны изменить ядро атома, невозможно химическими методами превратить один атом в другой. Вот почему не переходят друг в друга и химические элементы. Это как в конструкторе: если в нем очень много разных деталей, то из них можно собрать множество сложных конструкций. Но невозможно одну деталь превратить в другую, например кубик — в уголок. Поэтому сейчас только чудачку или совершенно дремучему человеку может прийти в голову идея превратить одно простое вещество в другое (например, свинец в золото, как это пытались в течение сотен лет сделать алхимики). И как мастер может распилить детали и из их частей склеить, спаять или сварить детали другой формы, так и физики сейчас умеют из одних атомов получать другие, правда, не любые. Золото из свинца они вряд ли получат, а вот из ртути, пожалуй, смогут (у ртути заряд ядра атома всего лишь на единицу больше, чем у золота). Однако осуществлять такие чудесные превращения они могут, как правило, лишь с небольшим числом атомов. Так что один грамм «искусственного» золота будет стоить, вероятно, больше, чем тысячи тонн «обычного» золота. Именно по этой причине теперь ни у кого не возникает желания обогатиться, превратив неблагородный металл в золото...



Рис. 1.6. На этой не очень четкой фотографии, сделанной с помощью электронного микроскопа, видны выстроившиеся в ряды атомы элемента ниобия

Большинство окружающих нас веществ являются сложными веществами, построенными из нескольких элементов. Например, вода состоит из атомов водорода и кислорода, поваренная соль — из атомов натрия и хлора, сахар — из атомов углерода, водорода и кислорода (поэтому сахар относят к углеводам), витамин B_{12} — из атомов углерода, водорода, кислорода, азота, фосфора и кобальта и т. д.

На практике понятие простого вещества, как и многие другие химические понятия, носит условный характер. (Все же химия — не математика!) Ведь «железный» гвоздь сделан вовсе не из чистого железа, а из низкоуглеродистой стали, содержащей небольшое количество углерода. Чистое железо очень мягкое и почти никогда не используется. То же можно сказать про свинцовую оболочку кабеля, серебряную вилку, алюминиевую ложку — все они представляют собой сплавы разных металлов, хотя свинца, серебра и алюминия в них больше всего. Например, «серебряные» полтинники, которые были отчеканены в нашей стране в 1921–1927 годах в количестве почти 150 миллионов, и потому их сохранилось довольно много, содержат только 90 % серебра, остальное — медь.

Вообще число относительно чистых простых веществ, с которыми человек сталкивается в повседневной жизни, невелико. Из металлов это, прежде всего, медь и алюминий, из которых сделаны электрические провода (примеси снижают электропроводность). Раскаленный волосок электрической лампочки — практически чистый, очень тугоплавкий металл вольфрам, а тоненькие подвески с крючками на концах, которые одним концом впаяны в стекло, а другим поддерживают вольфрамовую нить, сделаны из тугоплавкого металла молибдена. Тонкий защитный слой на консервной банке — практически чистое олово, а красивые крупные кристаллы на стенках и дне нового «железного» ведра — это цинк. В некоторых магазинах можно увидеть очень дорогие юбилейные монеты из платины, палладия, золота, сделанные из металлов высокой чистоты (степень чистоты на них, как правило, указана и может достигать 99,9 %). В медицинских градусниках используют единственный жидкий при 20 °С металл — ртуть. Многие металлические изделия покрывают хромом или никелем, которые придают предметам привлекательный блеск. Вот, пожалуй, и все чистые металлы, встречающиеся в быту. Остальные — это сплавы, которых огромное множество: латунь, бронза, томпак, баббит, мельхиор, нейзильбер, дуралюминий, силумин, инвар, платинит, нихром, константан — всех не перечислить...

Из неметаллов в быту в чистом виде встречается сера (ее используют для борьбы с вредителями растений), углерод (например, в виде сажи), гелий (им наполнены «летучие» воздушные шарики, а раньше для этого использовали более дешевый, но горючий водород), криптон

(в электрических «криптоновых» лампочках, отличающихся при той же мощности меньшим размером и грибовидной формой). Конечно, если покопаться в микросхеме компьютера или телевизора, возможно, найдутся маленькие кристаллы чистого кремния и германия.

Из чего сделаны атомы

Итак, к концу XVIII — началу XIX века благодаря работам Михаила Васильевича Ломоносова (1711–1765), А. Л. Лавуазье, Уильяма Праута (1785–1850), Амедео Авогадро (1776–1856) и других ученых гипотеза о существовании атомов и молекул начала приобретать черты теории, которая могла бы принести огромную практическую пользу. Однако многие ученые, в том числе и выдающиеся, не поняли этого. Вот несколько примеров. Крупнейший французский химик XIX века Марселен Бертло (1827–1907) писал: «Понятие молекулы, с точки зрения наших знаний, неопределенно, в то время как другое понятие — атом — чисто гипотетическое». Еще определеннее высказался известный французский химик Анри Этьен Сент-Клер Девилье (1818–1881): «Я не допускаю ни закона Авогадро, ни атома, ни молекулы, ибо я отказываюсь верить в то, что не могу ни видеть, ни наблюдать». А немецкий химик Вильгельм Оствальд (1853–1932), лауреат Нобелевской премии, один из основателей физической химии, еще в начале XX столетия решительно отрицал существование атомов! В своем трехтомном учебнике химии он ни разу даже не упомянул о них.

Теперь о том, что мир построен из атомов, знают даже школьники младших классов. Ученые получили довольно много сведений о строении различных атомов и молекул, об их форме и размерах. Еще более важными оказались знания, относящиеся к явлениям, которые происходят при «изменении форм» различных веществ, или, выражаясь современным языком, при изменении взаимного расположения атомов, когда они объединяются в более крупные частицы — молекулы, состоящие из одинаковых или разных атомов. С точки зрения современной науки взаимное расположение атомов в молекулах, а также взаимное расположение молекул определяют свойства веществ, о чем догадывались еще древние. А процесс перестройки взаимного расположения атомов составляет сущность химической реакции.

Нелегкий путь становления теории строения вещества на основе атомистических представлений можно проследить на примере изменений, которые претерпела периодическая таблица элементов Д. И. Менделеева.

Периодическая таблица начинается с самого легкого элемента — водорода. Некоторые ученые полагали, что все химические элемен-

ты произошли от самых простых атомов. В 1815 году английский химик Уильям Праут выдвинул гипотезу, согласно которой атомы всех химических элементов «построены» из атомов водорода. Если массу атома водорода принять за единицу, то атомные массы всех остальных элементов должны в соответствии с гипотезой Праута в целое число раз превышать массу атома водорода и потому выражаться целыми числами. Эти числа (их называют относительной атомной массой) действительно были целыми для ряда известных на то время элементов.

Во второй половине XIX века отдельные ученые попытались обосновать гипотезу Праута, но у них ничего не получилось, о чем достаточно определенно написал уже знаменитый в то время Д. И. Менделеев: «Все подобные мысли... должно относить к области, лишенной какой-либо опытной опоры». То есть на тот момент ученые не располагали надежными методами проверки истинности гипотезы Праута. Кстати, в первой таблице химических элементов, составленной Д. И. Менделеевым в 1869 году, было немногим более 60 элементов, причем атомные массы 50 из них, или у подавляющего большинства, приводились в целых числах. Но массы-то остальных 13 элементов были дробными! В чем тут дело? Сторонники гипотезы Праута считали, что просто атомные массы этих элементов были определены недостаточно точно. Ведь определить экспериментально относительную атомную массу элемента с высокой точностью в XIX веке было делом трудным; некоторые химики годами работали над этой задачей. Между прочим, сам Менделеев не был уверен в точности всех атомных масс, значениями которых он располагал. В своей первой таблице он в этих случаях ставил рядом с символом элемента знак вопроса. Так, на месте золота в этой таблице стоит $Au = 197?$

Однако атомные массы некоторых элементов, например, меди (63,4) или хлора (35,5), настолько сильно отличались от целых чисел, что ошибками эксперимента объяснить это было невозможно. Более того, результаты экспериментов как бы в насмешку над гипотезой Праута свидетельствовали: чем точнее становились измерения, тем у большего числа элементов обнаруживались «отклонения». Так, в последний год жизни Д. И. Менделеева шведский ученый Иоганн Ридберг (1854–1919), чьим именем названа одна из физических констант, опубликовал таблицу элементов, в которой впервые каждому элементу был присвоен соответствующий порядковый номер. В этой таблице оказалось уже 69 элементов, из которых лишь у 21 атомная масса была выражена целым числом. Любопытно, что в современной таблице Менделеева нет ни одного (!) элемента со строго целочисленной атомной массой. Объясняется это разными причинами. Одна из них, очень

важная, была обнаружена английским ученым Френсисом Уильямом Астоном (1877–1945) в 1919 г.

Раньше считалось, что атомы одного и того же химического элемента во всем одинаковы. Астон впервые доказал, что это не так. Они могут отличаться по массе, хотя с химической точки зрения ведут себя сходным образом. Другими словами, Астон открыл, что у элементов могут быть «близнецы-братья», но одни из них чуть полегче, другие потяжелее. Этим близнецов назвали изотопами, так как в таблице Менделеева им отвели одно и то же место (по гречески «изос» — «равный, одинаковый», «топос» — «место»). Из встречающихся в природе элементов (а их почти 90) только у 20 нет «родственников» — это элементы-одиночки. Другим же повезло больше, например у олова их целых 10! Есть изотопы и у самого легкого в природе элемента — водорода, и у самого тяжелого — урана.

После того как было доказано существование изотопов, стало понятно, почему элементы с целочисленной атомной массой встречаются гораздо реже, чем с дробной. Например, у меди было обнаружено два изотопа с атомными массами, очень близкими к 63 и 65. Легких атомов меди в природе больше — их 69 %, а тяжелых меньше — 31 %. Поскольку оба изотопа и в металлической меди, и во всех ее соединениях равномерно перемешаны, не удивительно, что измерения всегда давали усредненное значение атомной массы меди — примерно 63,5.

В XX веке, когда стало известно, из чего состоят атомы, появилось четкое и вполне определенное понятие химического элемента. Элемент — это совокупность атомов, которые устроены примерно одинаково. В центре атома — ядро, вокруг ядра движутся отрицательно заряженные электроны. Ядро состоит из положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов и потому несет положительный заряд. В нейтральном атоме число протонов в ядре равно числу электронов. Главное, что отличает один элемент от другого, — это заряд ядра: у всех атомов данного элемента этот заряд одинаковый (одинаковое число протонов). Например, у всех атомов золота в ядре 79 протонов, а у всех атомов свинца — 82. Атомы самого легкого элемента водорода состоят всего из одного протона и одного электрона. А в ядрах самого тяжелого на Земле элемента урана уже 92 протона. Число же нейтронов в ядрах атомов данного элемента может быть переменным. Например, у 99,3 % атомов урана в ядре 146 нейтронов, а у оставшихся 0,7 % — на три нейтрона меньше; если выделить в чистом виде несколько килограммов данного изотопа, то этого количества будет достаточно для осуществления ядерного взрыва! (Есть еще, правда, очень редкая разновидность атомов урана со 142 нейтронами в ядре, но таких атомов всего 0,0055 %.)

Химия и нумизматика

А теперь поговорим о том, как удалось установить процентный состав двух изотопов меди. Наглядно это можно показать на примере разновидностей монет одного достоинства, отличающихся массой. В 1993 году в России были выпущены 50-рублевые монеты из желтого медного сплава массой 6,1 г. Вскоре вместо них начали чеканить такие же с виду монеты, но более дешевые: их делали из стали и лишь сверху покрывали тонким слоем медного сплава. Стальные монеты были немного легче (5,3 г), но внешне они почти ничем не отличались от своих предшественниц (даже годом чеканки), как не отличаются по химическим свойствам два сорта атомов меди. Будем считать, что у нас было два «изотопа» 50-рублевых монет.

Примерно к 1996 году оба «сорта» монет, находившихся в обращении, равномерно перемешались, так что доля легких и тяжелых монет стала постоянной. Один нумизмат решил выяснить, какова же доля монет каждого типа. Он собрал у знакомых целый мешочек 50-рублевых монет, взвесил их и разделил общую массу на число монет; получилась «средняя» масса одной монеты – 5,54 г. Можно ли теперь узнать долю легких и тяжелых монет?

Будем рассуждать так: пусть у нас имеется 100 монет, среди которых есть и легкие, и тяжелые (по условию их соотношение не зависит от числа монет). Общая масса всех 100 монет равна 554 г. Если бы все эти монеты были «тяжелой разновидности», то их общая масса была бы равна 610 г, что на 56 г (610–554) больше действительной. Почему так? Потому что не все монеты тяжелые: есть среди них и легкие. Замена одной тяжелой монеты на одну легкую приводит к уменьшению общей массы на 0,8 г (6,1–5,3). Нам же надо уменьшить массу на 56 г. Следовательно, имеется 70 легких монет (56 : 0,8). Это и есть ответ: 70 % легких монет, 30 % тяжелых.

Точно так же мы можем рассуждать и в случае изотопов меди: известна средняя атомная масса меди (ее определили химики, анализируя различные соединения меди), а также массы легкого и тяжелого изотопов меди (эти массы определили физики, используя свои, физические, методы).

Интересно, что точно такая же история с монетами произошла несколько раньше в США. В 1964 году из-за подорожания серебра 10-центовые монеты («даймы»), которые прежде чеканились из серебряного сплава, стали делать из медно-никелевого (причем их внешний вид практически не изменился).

Но дорожает не только серебро. Самая мелкая медная монета США – 1 цент («пенни») с изображением Линкольна тоже претерпела

изменения в октябре 1982 года. Монетки, выпущенные ранее, изготавливались из меди с добавлением 5 % цинка. А новые центы только снаружи покрыты медью, внутри же они цинковые. Можно провести такой забавный опыт: слегка соскоблить надфилем краешек монеты и положить ее в разбавленную соляную или серную кислоту. В течение нескольких дней кислота будет все глубже и глубже проникать в монету, постепенно выедая ее цинковое нутро и не затрагивая оболочку, пока не останется легкий медный чехольчик. Точное взвешивание покажет, что в новых монетах общее содержание меди снижено с 95 до 2,5 % – солидная экономия для такого массового производства. Так как цинк не только дешевле, но и легче меди, масса центов существенно уменьшилась – примерно с 3,1 до 2,5 г. Этот эксперимент описывается в американском учебнике по химии и проводится на уроках во многих американских школах. Практическая неотличимость на вид новых и старых центов делает их уникальным учебным пособием для демонстрации на уроках: цинковые и медные центы можно рассматривать как отличающиеся массой изотопные разновидности одного и того же «элемента», причем путем взвешивания кучи нерассортированных монет можно определить содержание в ней каждого «изотопа», если известно общее число монет.

Интересно, что очень похожая задача (только не с изотопами и монетами, а с двумя сортами сукна) приведена в рассказе А. П. Чехова «Репетитор». Вот эта задача.

«Купец купил 138 аршин черного и синего сукна за 540 рублей. Спрашивается, сколько аршин купил он того и другого, если синее сукно стоило 5 рублей за аршин, а черное – 3 рубля?» Фактически это та же самая задача, что и в случае разновидностей монет или изотопов меди. Так что вы теперь сами легко ее решите.

Химики соревнуются с природой. Химический конструктор

Всего в природе найдено 90 различных элементов, и еще более 20 получено искусственным путем. Из этих нескольких десятков «кирпичиков» и состоят все окружающие нас тела – воздух, которым мы дышим; бумага, на которой напечатана эта книга, и красители в рисунках и самих буквах; глаза, которые читают этот текст, и клетки мозга, которые анализируют, хорошо ли он написан... На самом деле живые организмы состоят из еще меньшего числа элементов, чем объекты неживой природы. В книге американского ученого Глена Сиборга (он участвовал в создании многих искусственных элементов, а один из элементов даже назван его именем) есть забавная картинка. На фо-

тографии изображен мужчина средних лет в белой рубашке и в галстуке, а на столе перед ним — куча баночек и несколько сосудов с газами. Подпись же гласит: «Здесь изображен известный химик Бернард Харви в двух различных вариантах — в одном случае он в своем нормальном состоянии, в другом — расщеплен на составные элементы».

Люди, не знающие химии, часто удивляются, когда до них доходит информация о том, что из сотни с лишним известных химических элементов в состав растений и животных входит всего два десятка. Действительно, если принять, что Харви весил 70 кг, то на столе должны были бы находиться: 45,5 кг кислорода, 12,6 кг углерода, 7 кг водорода, 2,1 кг азота, 1,4 кг кальция, 700 г фосфора, 260 г калия, 175 г серы, по 100 г натрия и хлора, 30 г магния, 3 г железа и в очень малых количествах несколько других элементов (например, иода — всего 0,03 г, а марганца — 0,01 г). Как же природа ухитрилась из небольшого числа «составных частей» создать такое чудо, как мыслящий человек? А также кустик земляники (и ее запах!), гигантское дерево эвкалипт, крошечного муравья и огромного кита, миллионы других видов растений и животных...

Однако подобных «чудес» в мире немало. Разве не удивительно, что всего 12 нот хроматической гаммы дают бесконечное число разнообразных мелодий — от бесхитростной песни монгольского пастуха до мотивов «Спящей красавицы» П. И. Чайковского?! Разве не удивительно, что всего 16 белых и 16 черных шахматных фигур способны создать огромное разнообразие шахматных комбинаций — начиная от простейшего «детского мата» в два хода и кончая гениальными творениями лучших шахматистов мира?! Наконец, разве не удивительно, что из небольшого числа букв (в венгерском алфавите их 38, в русском — 33, в латинском — 26, в греческом — 24) можно составить бесконечное число слов, выражений и литературных произведений — от «Чижика-пыжика» до «Войны и мира» Л. Н. Толстого.

Так и в химии. Из ограниченного числа элементов, соединенных друг с другом в разных сочетаниях, построены все вещества. Возможности разных сочетаний элементов можно проиллюстрировать на таком примере. Во второй половине XX века ученые выяснили, что для записи всей наследственной информации живого организма достаточно всего нескольких химических элементов! А информация эта, «записанная» в живой клетке, определяет, что именно вырастет из этой клеточки, неразличимой для невооруженного глаза: сибирский кедр, морской конек или человек. Как же удается записать эту информацию?

Аборигены (коренные жители) Америки много веков назад изобрели «узелковую письменность»: к длинной веревке они привязывали шнурки с узелками различной формы. Таким образом они могли пе-

редавать разнообразную информацию. Возьмем теперь длинную «веревку», построенную из соединенных друг с другом атомов углерода (эти атомы легко соединяются в цепочки любой длины). Получится молекула, которая не несет никакой информации. Кстати, именно из таких молекул состоит полиэтилен, применяемый для изготовления пакетов, и парафин, из которого делают свечи. Разные свойства полиэтилена и парафина связаны в основном с разной длиной молекул-цепочек. Но если в разных местах этой молекулы присоединить по бокам атомы других элементов (в том числе и углерода), можно получить осмысленное «сообщение». Чтобы его «прочитать», надо знать, из каких элементов состоят боковые группы (кстати, «боковая группа» — обычный химический термин), каково их строение и по каким правилам они присоединяются к центральной нити. Именно по этому принципу природа создала «текст» с определенным биологическим смыслом — его называют генетическим кодом. И вряд ли здесь было бы возможно какое-то другое решение.

Чтобы собрать из готовых деталей какой-либо механизм, надо знать, как он устроен. Именно такая задача в первую очередь стояла перед химиками, которые захотели искусственно получать различные соединения. Химики всегда стремятся сделать что-то совершенно новое, никогда и никем не виданное, в природе не встречающееся (например, даже простейший полимер полиэтилен в природе сам по себе никогда не образуется). А зачем химикам все это было нужно? Ведь далеко не всегда очевидно, что полученное ими новое вещество принесет хоть какую-нибудь пользу! Прежде всего, создавать новые вещества очень интересно! Зачем ребенок строит из песка или из деталей конструктора башни и крепости? Ведь он прекрасно знает, что они ненастоящие. Но — интересно! Химики в этом отношении похожи на детей — им тоже очень интересно «построить» в колбе сложную конструкцию из атомов, синтезировать какое-нибудь вещество с необычными свойствами. Но дело не только в интересе. Многие вещества, которых в природе мало или вообще нет, оказались совершенно необходимы людям. Среди них — удобрения, необходимые для повышения урожайности сельскохозяйственных культур: без них сельское хозяйство уже не смогло бы прокормить выросшее во много раз население Земли. Химики получили также множество разнообразных лекарственных веществ, чтобы избавлять людей от болезней. Или — взрывчатые вещества, с помощью которых, к сожалению, этих же людей можно убивать...

Чтобы получить какое-либо новое вещество или вещество, уже созданное природой, надо знать, какие атомы и в каких пропорциях содержатся в этом веществе. Это — задача аналитической химии, о которой еще будет отдельный рассказ. Но этого мало. Требуется еще установить, в каком порядке должны быть соединены атомы в веществе,

т. е. каково его строение. А от строения вещества (порядка соединения атомов) очень сильно зависят его свойства. Например, в молекуле аминокислоты аланина содержатся 3 атома углерода, 7 атомов водорода, 1 атом азота и 2 атома кислорода (химики записывают такую формулу в виде $C_3H_7NO_2$, обозначая буквами сорт атомов и цифрами их количество в молекуле). Аланин встречается во всех организмах в свободном виде и в составе белков; это бесцветные кристаллы сладкого вкуса. Но те же атомы и в таком же количестве находятся и в молекуле искусственно полученного вещества пропилнитрита — летучей, взрывчатой, очень ядовитой жидкости, пары которой при вдыхании вызывают резкое расширение сосудов, снижение кровяного давления и учащение сердцебиения (похожим действием обладает и всем известный нитроглицерин, так как его строение очень напоминает строение пропилнитрита). Такое существенное различие в свойствах двух соединений одинакового состава объясняется тем, что указанные атомы соединены в этих веществах по-разному: в аланине атом азота соединен с двумя атомами водорода и одним атомом углерода, а в пропилнитрите — с двумя атомами кислорода.

Допустим теперь, что химик узнал, какие элементы и в каком соотношении содержатся в данном веществе; узнал он также, в каком порядке они соединены друг с другом. Сможет ли он теперь самостоятельно получить такое же вещество? Эта задача похожа на такую: человеку сказали, какие детали и в каком количестве содержатся в его телевизоре или автомобиле, а также в каком порядке они соединены друг с другом. Сумеет ли он, воспользовавшись этой информацией, самостоятельно сделать точно такой же телевизор или автомобиль? Понятно, что это зависит от мастерства человека, его знаний и возможностей. Если он должен сначала сам найти нужные руды, выплавить из них разные металлы... ну и так далее, то вряд ли он что-то успеет за всю свою жизнь. Если же это опытный механик, и у него есть все готовые детали, а также хорошие помощники, то за месяц-другой, глядишь, у него что-то и получится.

Примерно такая же ситуация и у химиков. Первые химики все реактивы готовили для себя сами и до «большой» химии было еще далеко. Сначала должны были заработать химические заводы, производящие тысячи разнообразных химических веществ — «заготовок» для будущих искусственных изделий. Одновременно должны были открыться химические лаборатории, в которых бы молодые химики учились премудростям соединения элементов в нужных пропорциях и в нужном порядке. Наконец, ученые-химики должны были разработать способы и приемы разнообразных превращений. Именно поэтому химия начала особенно интенсивно развиваться только во второй половине XIX века.

Все эти условия действуют и в настоящее время: химические предприятия производят вещества для синтезов (такие вещества называются химическими реактивами). Некоторые из них производятся миллионами тонн, потому что они нужны для получения синтетических тканей, моющих веществ, средств защиты растений и множества иных товаров, другие — в количестве всего лишь нескольких граммов или даже миллиграммов (например, радиоактивные препараты).

Подобно тому, как опытный механик из отдельных частей собирает сложный механизм (а при необходимости и сам изготавливает некоторые части), химики научились «разбирать» сложные органические молекулы на составные части и соединять их в иной последовательности — по своему желанию. Появилась также возможность, не затрагивая остов молекулы, заменять в ней отдельные фрагменты другими, что приводит порой к полнейшему изменению всех свойств вещества. Как из рога изобилия посыпались новые методы и приемы синтеза самых разнообразных органических соединений.

Откуда взялись атомы

До сих пор, говоря об атомной теории, о том, как из нескольких сортов атомов, соединенных между собой в разном порядке, получаются совершенно непохожие друг на друга вещества, мы ни разу не задались «детским» вопросом — а откуда взялись сами атомы? Почему атомов одних элементов очень много, а других — очень мало, и распространены они очень неравномерно. Например, всего один элемент (кислород) составляет половину земной коры. Три элемента (кислород, кремний и алюминий) в сумме составляют уже 85 %, а если к ним добавить железо, кальций, натрий, калий, магний и титан, то получим уже 99,5 % земной коры. На долю же нескольких десятков остальных элементов приходится всего 0,5 %. Самый редкий на Земле металл — рений, да и золота с платиной не так уж много, не зря они такие дорогие. А вот другой пример: атомов железа в земной коре примерно в тысячу раз больше, чем атомов меди, атомов меди в тысячу раз больше, чем атомов серебра, а серебра в сто раз больше, чем рения.

Совсем иначе распределены элементы на Солнце: там больше всего водорода (70 %) и гелия (28 %), а всех остальных элементов — только 2 %. Если взять всю видимую Вселенную, то водорода в ней еще больше. Почему так? В древности и в Средние века вопросами о происхождении атомов не задавались, ибо считали, что они существовали в неизменном виде и количестве всегда (а по библейской традиции — были созданы Богом в один день творения). И даже когда атомистическая теория победила и химия начала бурно развиваться, а Д. И. Менделеев

создал свою знаменитую систему элементов, вопрос о происхождении атомов продолжал считаться несерьезным. Конечно, изредка кто-либо из ученых набирался смелости и предлагал свою теорию. Как уже говорилось, в 1815 году Уильям Праут высказал предположение, что все элементы произошли из атомов самого легкого элемента — водорода. Как писал Праут, водород — это та самая «первоматерия» древнегреческих философов, которая путем «сгущения» дала все остальные элементы.

В XX веке усилиями астрономов и физиков-теоретиков была создана научная теория происхождения атомов, которая в общих чертах отвечала на вопрос о происхождении химических элементов. Весьма упрощенно эта теория выглядит так. Вначале вся материя была сосредоточена в одной точке с невероятно большой плотностью (10^{80} г/см³) и температурой (10^{27} К). Эти числа настолько велики, что для них даже не существует названий. Примерно 10 миллиардов лет назад в результате так называемого Большого взрыва эта сверхплотная и сверхгорячая точка начала быстро расширяться. Физики достаточно хорошо представляют себе, как развивались события спустя 0,01 секунды после взрыва. Теория же того, что происходило до этого, разработана значительно хуже, поскольку в существовавшем тогда сгустке материи плохо выполнялись известные ныне физические законы (и чем раньше — тем хуже). Более того, вопрос о том, что было до Большого взрыва, по существу даже не рассматривался, поскольку тогда не было самого времени! Ведь если нет материального мира, т. е. никаких событий, то откуда взяться времени? Кто или что будет его отсчитывать?

Итак, материя начала стремительно разлетаться и остывать. Чем ниже температура, тем больше возможностей для образования разнообразных структур (например, при комнатной температуре могут существовать миллионы различных органических соединений, при +500 °С — лишь немногие, а выше +1000 °С, вероятно, никакие органические вещества существовать не могут, — все они при высокой температуре расщепляются на составные части). По оценкам ученых, через 3 минуты после взрыва, когда температура снизилась до миллиарда градусов, начался процесс нуклеосинтеза (это слово происходит от латинского *nucleus* — «ядро» и греческого «синтесис» — «соединение, сочетание»), т. е. процесс соединения протонов и нейтронов в ядра различных элементов. Помимо протонов — ядер водорода, появились и ядра гелия; эти ядра еще не могли присоединить электроны и образовать атомы из-за слишком высокой температуры. Первичная Вселенная состояла из водорода (примерно 75 %) и гелия с примесью небольшого количества следующего по массе элемента — лития (в его ядре три протона). Этот состав не изменялся примерно 500 тысяч лет. Вселенная продолжала расширяться, остывать и становилась все более разреженной. Когда температура снизилась до +3000 °С, электроны

получили возможность соединяться с ядрами, что привело к образованию устойчивых атомов водорода и гелия.

Казалось бы, что и дальше Вселенная, состоящая из водорода и гелия, должна была расширяться и остывать до бесконечности. Но тогда не было бы не только других элементов, но и галактик, звезд, а также нас с вами. Бесконечному расширению Вселенной противодействовали силы всемирного тяготения (гравитации). Гравитационное сжатие материи в разных частях разреженной Вселенной сопровождалось повторным сильным разогревом — наступила стадия массового образования звезд, которая продолжалась около 100 миллионов лет. В тех состоящих из газа и пыли областях пространства, где температура достигала 10 миллионов градусов, начинался процесс термоядерного синтеза гелия путем слияния ядер водорода. Эти ядерные реакции сопровождались выделением огромного количества энергии, которая излучалась в окружающее пространство: так загоралась новая звезда. Пока в ней было достаточно водорода, сжатию звезды под действием сил тяготения противодействовало излучение, которое «давило изнутри». Наше Солнце также светит за счет «сжигания» водорода. Идет этот процесс очень медленно, так как сближению двух положительно заряженных протонов препятствует сила кулоновского отталкивания. Так что нашему светилу суждены еще долгие годы жизни.

Когда запас водородного горючего подходит к концу, постепенно прекращается и синтез гелия, а вместе с ним затухает мощное излучение. Силы гравитации вновь сжимают звезду, температура повышается и становится возможным слияние друг с другом уже ядер гелия с образованием ядер углерода (6 протонов) и кислорода (8 протонов в ядре). Эти ядерные процессы также сопровождаются выделением энергии. Но и запасам гелия рано или поздно приходит конец. И тогда наступает третий этап сжатия звезды силами гравитации. А дальше все зависит от массы звезды на этом этапе. Если масса не очень велика (как у нашего Солнца), то эффект от повышения температуры при сжатии звезды будет недостаточен, чтобы углерод и кислород могли вступить в дальнейшие реакции ядерного синтеза; такая звезда становится так называемым белым карликом. Более тяжелые элементы «изготовлены» в звездах, которые астрономы называют красными гигантами — их масса в несколько раз больше массы Солнца. В этих звездах и идут реакции синтеза более тяжелых элементов из углерода и кислорода. Как образно выражаются астрономы, звезды — это ядерные костры, зола которых — тяжелые химические элементы.

Выделяющаяся на этом этапе жизни звезды энергия сильно «раздувает» внешние слои красного гиганта; если бы наше Солнце стало такой звездой, Земля оказалась бы внутри этого гигантского шара — перспектива для всего земного не самая приятная. Звездный ветер,

«дующий» с поверхности красных гигантов, выносит в космическое пространство синтезированные этими звездами химические элементы, которые образуют туманности (многие из них видны в телескоп).

Красные гиганты живут сравнительно недолго — в сотни раз меньше, чем Солнце. Если масса такой звезды превышает массу Солнца в 10 раз, тогда возникают условия (температура порядка миллиарда градусов) для синтеза элементов вплоть до железа. Ядро железа — наиболее стабильное из всех ядер. Это означает, что реакции синтеза элементов, которые легче железа, идут с выделением энергии, тогда как синтез более тяжелых элементов требует затрат энергии. С затратой энергии идут и реакции распада железа на более легкие элементы. Поэтому в звездах, достигших «железной» стадии развития, происходят драматические процессы: вместо выделения энергии идет ее поглощение, что сопровождается быстрым понижением температуры и сжатием до очень маленького объема; астрономы называют этот процесс гравитационным коллапсом (от латинского слова *collapsus* — «ослабевший, упавший»; недаром медики так называют внезапное падение кровяного давления, что очень опасно для человека). В ходе гравитационного коллапса образуется огромное число нейтронов, которые, благодаря отсутствию заряда, легко проникают в ядра всех имеющихся элементов. Пересыщенные нейтронами ядра претерпевают особое превращение (его называют бета-распадом), в ходе которого из нейтрона образуется протон; в результате из ядра данного элемента получается следующий элемент, в ядре которого уже одним протоном больше. Ученые научились воспроизводить такие процессы в земных условиях; хорошо известный пример — синтез изотопа плутония-239, когда при облучении нейтронами природного урана (92 протона, 146 нейтронов) его ядро захватывает один нейтрон и образуется искусственный элемент нептуний (93 протона, 146 нейтронов), а из него — тот самый смертоносный плутоний (94 протона, 145 нейтронов), который используется в атомных бомбах. В звездах же, которые претерпевают гравитационный коллапс, в результате захвата нейтронов и последующих бета-распадов образуются сотни различных ядер всех возможных изотопов химических элементов. Коллапс звезды заканчивается грандиозным взрывом, сопровождающимся выбросом огромной массы вещества в космическое пространство — образуется сверхновая звезда. Выброшенное вещество, содержащее все элементы из таблицы Менделеева (и в нашем теле содержатся те самые атомы!), разлетается по сторонам со скоростью до 10 000 км/с, а небольшой остаток вещества погибшей звезды сжимается (коллапсирует) с образованием сверхплотной нейтронной звезды или даже черной дыры. Изредка такие звезды вспыхивают на нашем небосводе, и если вспышка произошла не слишком далеко, сверхновая звезда по яркости затмевает все осталь-

ные звезды. И не удивительно: яркость сверхновой звезды может превышать яркость целой галактики, состоящей из миллиарда звезд! Одна из таких «новых» звезд, в соответствии с китайскими хрониками, вспыхнула в 1054 году. Сейчас на этом месте находится известная Крабовидная туманность в созвездии Тельца, а в ее центре расположена быстровращающаяся (30 оборотов в секунду!) нейтронная звезда. К счастью (для нас, а не для синтеза новых элементов), такие звезды вспыхивали пока лишь в далеких галактиках...

В результате «горения» звезд и взрыва сверхновых звезд в космическом пространстве оказались все известные химические элементы. Остатки сверхновых звезд в виде расширяющихся туманностей, «разогретых» радиоактивными превращениями, сталкиваются друг с другом, конденсируются в плотные образования, из которых под действием гравитационных сил возникают звезды нового поколения. Эти звезды (в их числе и наше Солнце) уже с самого начала существования содержат в своем составе примесь тяжелых элементов; такие же элементы содержатся и в окружающих эти звезды газопылевых облаках, из которых образуются планеты. Так что элементы, входящие в состав всех окружающих нас вещей; в том числе и нашего тела, родились в результате грандиозных космических процессов...

Почему же одних элементов образовалось много, а других — мало? Оказывается, в процессе нуклеосинтеза с наибольшей вероятностью образуются ядра, состоящие из небольшого четного числа протонов и нейтронов. Тяжелые ядра, «переполненные» протонами и нейтронами, менее устойчивы и их во Вселенной меньше. Существует общее правило: чем больше заряд ядра, чем оно тяжелее, тем меньше таких ядер во Вселенной. Однако это правило выполняется не всегда. Например, в земной коре мало легких ядер лития (3 протона, 3 нейтрона), бора (5 протонов и 5 или 6 нейтронов). Предполагают, что эти ядра по ряду причин не могут образоваться в недрах звезд, а под действием космических лучей «откалываются» от более тяжелых ядер, накопившихся в межзвездном пространстве. Таким образом, соотношение различных элементов на Земле — отголосок бурных процессов в космосе, которые происходили миллиарды лет назад, на более поздних этапах развития Вселенной.

От атомов — к молекулам

При благоприятных условиях атомы разных элементов могут соединяться между собой в более сложные образования — молекулы. Это могут быть простейшие двухатомные частицы, например, молекулярный водород, состоящий из двух атомов водорода (H_2), «осколок» молекулы воды, называемый гидроксидом (ОН), цианид (СN).

Процессы объединения атомов в молекулы широко распространены во Вселенной и всегда происходят там, где для этого есть подходящие условия. Таким условиям, например, отвечает умеренная температура, которая должна быть не слишком высокой (десятки—сотни градусов Цельсия) и не слишком низкой (иначе атомам не хватит энергии для взаимодействия друг с другом, т. е. для химической реакции). В межзвездной среде условия для образования молекул не очень благоприятные, хотя бы из-за чрезвычайной разреженности вещества (несколько атомов в 1 см^3 , тогда как в каждом кубическом сантиметре воздуха их $3,7 \cdot 10^{19}$). Тем не менее в космосе обнаружены многие молекулы, в том числе и довольно сложные, содержащие большое количество разных атомов. Насколько далеко может зайти процесс усложнения молекул в межзвездной среде? Не могут ли таким способом возникнуть какие-либо формы жизни? Наука пока не в состоянии ответить на эти вопросы — мы ведь даже толком не знаем, как возникла жизнь на Земле и действительно ли она возникла на нашей планете или была каким-то образом «занесена» из космоса...

Доподлинно известно, что в благоприятных условиях возможно соединение в определенном порядке многих тысяч атомов, при этом образуются такие сложные образования, как молекулы белков, молекулы наследственности ДНК, содержащие десятки тысяч атомов.

Полагают, что Солнечная система образовалась примерно 4,6 миллиарда лет назад. За это время и возникло окружающее нас богатейшее разнообразие неорганических и органических соединений. И все они образовались из химических элементов, уже имевшихся в Солнечной системе в момент ее образования. Процесс образования сложных соединений из отдельных атомов и простейших молекул называют «химической эволюцией». В этом процессе, который длился миллиарды лет, еще много «белых пятен», в частности — как из простых молекул возникли сложные, состоящие из многих тысяч атомов; как эти сложные молекулы дали начало простейшим живым существам; наконец, как шло последующее развитие — от простейших одноклеточных микроорганизмов до высших животных и «венца природы» — мыслящего человека.

КАК РАБОТАЮТ ХИМИКИ



Измерение массы и объема

Все мы постоянно находимся в мире, где царствуют числа. Этими числами измеряется все: цена — на хлеб или на гектар леса, время — до окончания урока или до выключения двигателя ракеты, расстояние — между шкафом и диваном и между скоплениями галактик, масса — атома урана и урожая пшеницы, температура — тела больного и чугуна в доменной печи... А еще измеряются сила электрического тока и сила света, плоские и телесные углы, площади и объемы, скорости и ускорения, плотности тел и их сжимаемость, твердость и давление, энергия и мощность, жесткость воды и влажность воздуха, частота и период колебаний, электрический заряд и электропроводность, магнитный поток и магнитная восприимчивость, яркость и освещенность, прозрачность и мутность, интенсивность радиации и период полураспада... Перечислять можно очень долго. И, конечно, не химики первыми начали производить измерения. И не физики. Без измерений могут обходиться только животные. Уже первобытные люди должны были считать дни до начала наступления холодов или дни до периода дождей и разлива рек. Конечно, единицы измерения, если не считать «естественных», таких как сутки и год, у всех были разные: масса и длина ячменного зерна, расстояние между концами вытянутых пальцев кисти или между поднятой рукой и ногой (во всех таких случаях речь, естественно, шла только о средних величинах; иногда эти величины узаконивали, «привязывая», например, к длине локтя или ступни монарха).

Понятно, что у каждого племени, а потом и у каждого народа появлялись свои единицы измерения; это вносило большие неудобства в общение между ними. И такие неудобства до сих пор окончательно не изжиты, хотя еще в середине XX века была принята Международная система единиц (СИ). Вот и приходится переводить английские единицы давления *psi* (*pounds per square inch*, т. е. фунты на квадратный дюйм) в привычные для нас килограммы на квадратный сантиметр (атмосферы), градусы Фаренгейта, по неудобной формуле, — в градусы Цельсия, морские и географические мили — в километры, футы — в метры, фунты — в килограммы, галлоны и баррели — в литры, даты по лунному календарю и по хиджре (где летоисчисление ведется с 662 года, когда пророк Мухаммед переселился из Мекки в Медину) — в даты по «ново-

му» (а иногда и по «старому») стилю солнечного календаря, не говоря уже о пересчете наших рублей в украинские гривны или ангольских кванз в свазилендские лилангени. Как совершенно справедливо заметил М. И. Грамм, автор «Занимательной энциклопедии мер, единиц и денег», если бы знаменитая Книга рекордов Гиннеса появилась лет 200 назад, в ней почти никто не смог бы разобраться — настолько непохожи были в разных странах единицы измерения чего угодно. Немецкий математик и физик Иоганн Ламберт (1728–1777) в своей книге «Пирометрия» (этот термин дословно означает «измерение теплоты») описал 19 разных температурных шкал, которыми пользовались в XVIII веке! Сейчас от них остались только три, но и это слишком много.

К счастью, теперь хотя бы в научных публикациях в большей или меньшей степени используется единая система мер — СИ (или *SI* — от французского *Système International d'Unités* — Международная система единиц, так что говорить «система СИ» не совсем правильно: получается «система системы»). Оговорка «в большей или меньше степени» необходима потому, что единицей объема в СИ служит кубический метр или его дольные единицы — кубический дециметр и кубический сантиметр. Химики же привыкли использовать для этой цели литры и миллилитры

(по правде говоря, 1 дм^3 и 1 л практически не различаются). Вместо единицы энергии джоуль химики по старинке еще продолжают использовать калории. Но вот дюймы вместо сантиметров или фунты и унции вместо килограммов и граммов в химических работах уже не встретишь.

Посмотрим теперь, с какими основными измерениями и с каким оборудованием приходится иметь дело химикам. А заодно проведем несколько небольших «домашних» измерений, из которых можно получить довольно интересные, а иногда и неожиданные результаты.

Работа современного химика немислима без множества различных измерений. Одним из самых важных измерений всегда считалось взвешивание. Это одна из наиболее распространенных операций в химии. Поэтому уже в первых химических лабораториях можно найти весы (рис. 2.1).

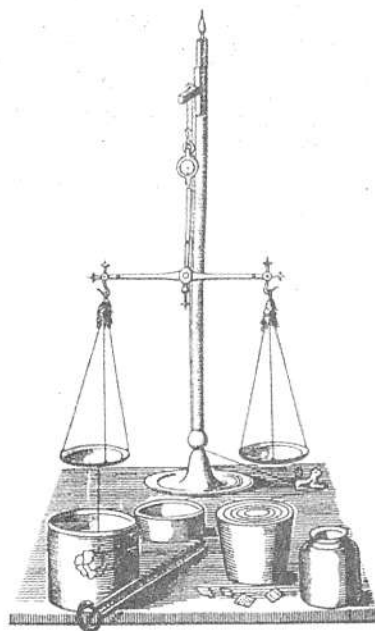


Рис. 2.1. Весы Роберта Бойля (к левой чашке весов привязана нитка — для взвешивания предметов, погруженных в воду)

Весы были изобретены так давно, что еще в античные времена люди почитали их дарами богов. При раскопках древнего Вавилона археологи не раз находили каменные изделия правильной геометрической формы; иногда они напоминали фигурки животных. Оказалось, что это древние гири, которым больше 4,5 тысяч лет! На каждой гире указан ее вес. Единицей измерения у вавилонян служила довольно увесистая гиря массой (в современных единицах) около 0,5 кг. Эта единица называлась малой миной, она просуществовала несколько тысяч лет. Другие гири были еще тяжелее. С их помощью взвешивали зерно и другую сельскохозяйственную продукцию.

В Древнем Риме единица массы называлась либрой (или фунтом — от латинского слова *pondus* — «вес, тяжесть, гиря»). Римский фунт был равен (в современных единицах) 327,45 г. Во времена Карла Великого (IX век) фунт «потяжелел» до 408 г. Раздробленность средневековой Европы привела к тому, что чуть ли не в каждом королевстве, княжестве был свой фунт — а то и не один. Достаточно сказать, что к концу XVIII века в разных странах применялись сотни различных фунтов! Например, в старинном французском фунте было 489,5 г, в голландском — 492,2 г, в немецком (ганноверском) — 489,6 г. Вот и приходилось, например, в России официально устанавливать, что английский фунт = 1 русскому фунту 13 золотникам 44 долям, лондонский фунт = 1 русскому фунту 9 золотникам 51 доле, амстердамский фунт = 1 русскому фунту 19 золотникам 33 долям и т. д. и т. п. Отметим, что русский фунт, равный 409,51 г, полностью соответствовал двум старинным новгородским серебряным гривнам; он делился на 96 золотников, а в 1 золотнике было 96 долей (эти меры можно встретить в надписях на «царских» золотых и серебряных монетах, а также на серебряных полтинниках и рублях, датированных 1921–1927 годами). Вплоть до XX века в Бельгии, Венгрии, Германии, Дании, Голландии, Франции и в некоторых других странах применяли метрический фунт — ровно 500 г.

Трудно даже представить, каково было когда-то торговцам (а также химикам), вынужденным каждый раз проводить пересчет из одной системы единиц в другую. В США до сих пор широко пользуются фунтом, который, правда, немного полегче старых европейских, но тяжелее русского: в нем 453,59 г. В Великобритании, в которой особенно крепки традиции, до сих пор для разных целей пользуются «разными фунтами»: так называемым торговым (коммерческим) — 453,59 г, аптекарским и тройским — в обоих по 373,24 г. Аптекарские меры отличаются от тройских тем, что в них есть драхмы и скрупулы, а в тройских — караты, в которых выражают массу драгоценных металлов и камней. Кстати, слово «тройский» не имеет никакого отношения к Древней Трое; это название произошло от французского города Труа (по-французски *Troyes*), где в Средние века проходили торговые ярмарки.

Разные меры, применяемые при взвешивании товаров разного типа, привели к забавной старинной задаче: «Что весит больше: фунт золота или фунт пуха?» Оказывается, школьники разных стран должны решать ее по-разному! Самый простой ответ (его дал Оська, один из героев книги Льва Кассиля «Конduit и Швамбрания») звучит так: «Фунт фунтом и будет!», т. е. фунт золота и фунт пуха весят одинаково. А вот школьники англоязычных стран должны отвечать иначе: «Фунт пуха весит больше!» Почему так? Да потому, что в этих странах пух (как и другие товары) взвешивают с использованием английской торговой (коммерческой) системы мер — «эвердюпойс» (*avoirdupois* — это странное словечко произошло от старинного французского выражения, означающего «товары на вес»), в которой 1 фунт = 453,59 г. Золото же (а также другие благородные металлы, драгоценные камни и лекарства) принято взвешивать по другой системе мер — монетной (тройской) и аптекарской, в которой 1 фунт = 373,24 г. Понятно, что пух взвешивали (а кое-где и сейчас взвешивают) в торговых фунтах, а золото — в тройских, и потому фунт пуха весит больше. Кстати, в XIX веке гагачий пух — а он самый теплый — продавали по 6–7 рублей за фунт; это были большие деньги, так что позволить себе спать на гагачьей перине могли только исключительно богатые люди...

Любопытно, что англоязычные школьники должны давать прямо противоположный ответ на очень похожий вопрос: «Что весит больше: унция золота или унция пуха?» Чтобы понять, в чем тут дело, надо сначала «разобраться» с унцией. По-английски унция — *ounce*, слово того же происхождения, что и *inch* (дюйм) — от латинского *uncia* — «двенадцатая часть» (имеется в виду двенадцатая часть фунта — по тройской системе мер). Делим 373,24 на 12 и получаем 31,1 г (более точно — 31,1035 г). В тройских унциях по традиции измеряют массу драгоценных металлов в монетах, в том числе и отечественных (юбилейных и памятных). Посмотрите на фотографию гербовой стороны юбилейной монеты, выпущенной к 250-летию Московского государственного университета (рис. 2.2). В правом нижнем углу рядом со знаком Московского монетного двора (ММД) указана масса серебра в граммах, соответствующая одной тройской унции — 31,1.



Рис. 2.2. Юбилейная монета «250 лет МГУ» содержит ровно одну тройскую унцию чистого серебра

А вот в торговой (коммерческой) системе мер та же унция определяется иначе — как одна шестнадцатая часть торгового фунта, т. е. 28,25 г. Поэтому унция пуха весит меньше, чем унция золота!

К сказанному можно добавить, что общеупотребительное сокращенное название унции (*oz*) происходит от итальянского названия *onza*. А какое отношение к унции имеет английский дюйм? Оказывается, он тоже связан с числом 12 следующим соотношением: 1 дюйм = 12 линий = 2,54 см. Разное же написание (и произношение) объясняется тем, что слово *ounce* пришло в английский язык из старофранцузского (*unce*), тогда как слово *inch* — из англосаксонского *unse* и потому подверглось более сильному искажению. Русское же слово «дюйм», которое ввел Петр I, происходит от голландского *duim* — большой палец руки; сейчас это слово осталось только при измерении диаметра труб (стандартная водопроводная труба в доме обычно имеет диаметр полдюйма), а также в словах «трехдюймовая» (пушка) и Дюймовочка в сказке Андерсена.

А теперь попробуйте ответить на такой необычный вопрос: «Что больше: масса 1 кг пуха или масса 1 кг золота?» Правильный ответ может показаться вам совершенно неожиданным: масса килограмма пуха больше! А почему — подумайте сами. (Подсказка: и золото, и пух взвешивали у нас, на Земле, а не где-нибудь на Луне!)

Сейчас практически все ученые, в том числе и химики, пользуются метрической системой мер, в которой массу выражают в килограммах, граммах и миллиграммах. В особых случаях используют еще более мелкие единицы — микрограммы (миллионные доли грамма), а иногда и наногаммы (миллиардные доли грамма).

Вы сами можете изготовить весы и гири к ним, используя самые простые материалы: мягкую алюминиевую проволоку, нитки и легкие пластмассовые баночки (в таких баночках продают варенье, йогурты, творог и т. п.). Устройство весов видно из рисунка (рис. 2.3). Деревянная (или легкая металлическая) стрелочка-указатель при равновесии располагается строго вдоль нитки, на которой подвешены весы. Если стрелка отклоняется от вертикального положения, надо более легкое коромысло весов утяжелить — намотать на нее немного тонкой медной проволоки, так чтобы стрелка располагалась вертикально. А где взять гири (химики называют их разновесами)?

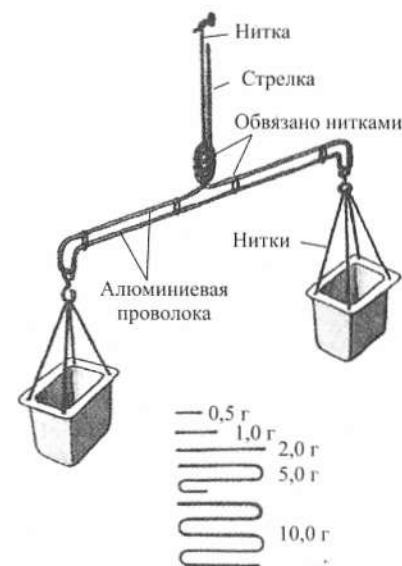


Рис. 2.3. Самодельные весы и разновесы к ним

Раньше с этим было просто: можно было использовать «медные» монеты, которые чеканились в СССР (с небольшими перерывами) с 1926 по 1991 годы: копейка весила ровно 1 г (конечно, если она не очень стерлась), двухкопеечная монета — 2 г, трехкопеечная — 3 г, «пятак» — 5 г. Возможно, в вашей семье сохранились такие монеты, хотя бы несколько штук. Тогда вы можете с их помощью изготовить себе целый набор разновесов, используя алюминиевую проволоку подходящего диаметра и кусачки. Делается это так. В одну чашку кладете копейку, а в другую — кусочек проволоки, который весит больше 1 г. Осторожно откусывая от проволоки маленькие кусочки, добейтесь, чтобы весы пришли в равновесие. Аналогичным образом сделайте две гирьки по 2 г, используя либо старую двухкопеечную монету (такие монеты называли «двушками»; их очень любили, так как с такой монетой можно было позвонить по телефону-автомату), либо современную российскую 10-копеечную монету, которая тоже весит ровно 2 г. К сожалению, масса большинства современных монет «нецелая»; например, 1 копейка весит 1,5 г, 5 копеек — 2,5 г, 1 рубль — 3,3 г. А почему двухграммовых гирек должно быть две? Потому что стандартный набор гирь разновесов таков: 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100. Он позволяет взвесить любой предмет массой от 1 до 210 г (вы можете ограничиться «гирями» по 20 г). Когда вы начнете взвешивать, то сами убедитесь, что такой набор — самый удобный. Теперь для вас не составит труда изготовить «гири» по 5, 10 и 20 г (2 штуки!). Если ваши весы оказались достаточно чувствительными и стрелка заметно отклоняется даже при нагрузке 1 г, попробуйте изготовить гирьки по 0,5 г; как это сделать, подумайте сами. С помощью самодельных весов и гирь мы проведем несколько интересных опытов.

Для более точных измерений химики пользуются аналитическими весами. Когда-то каждый экземпляр аналитических весов изготовлялся мастером вручную и стоили хорошие весы очень дорого. Уже в начале XIX века точность самых лучших весов достигала 0,001 г (или 1 мг). Однако лишь немногие химики могли похвастаться такими весами. Даже знаменитый шведский химик Йенс Якоб Берцелиус имел в молодые годы плохо оборудованную лабораторию с довольно грубыми весами, поэтому для получения надежных результатов он был вынужден повторять один и тот же анализ по 20–30 раз! За 10 лет Берцелиус произвел анализ порядка 2000 соединений, состоящих из 43 элементов. Можно только восхищаться усердием, с каким он проделал эту колоссальную работу. Спустя почти столетие другой знаменитый химик Вильгельм Оствальд, один из первых лауреатов Нобелевской премии по химии, увидев в музее оборудование, с которым работал Берцелиус, сказал: «Мне стало совершенно ясно, как мало зависит от прибора

и как много от человека, который перед ним сидит». Конечно, Оствальд имел в виду не только весы, и его слова остаются во многом справедливы и сегодня.

Со временем весы совершенствовались, и через несколько десятилетий уже каждый химик имел возможность взвешивать на стандартных аналитических весах несколько граммов вещества с точностью до 0,0001 г (рис. 2.4). Такие аналитические весы до сих пор можно встретить во многих лабораториях. Два больших цилиндра над чашками весов, внутри которых с маленьким зазором движутся цилиндры чуть меньшего диаметра, — это демпферы, назначение которых — быстро «успокоить» качание весов.

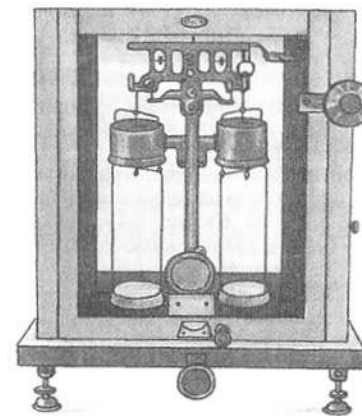


Рис. 2.4. Аналитические весы

Гири для аналитических весов должны быть очень точными. Поскольку коррозия может изменить массу гирь на несколько миллиграммов (а это совершенно недопустимо), гири покрывают тонким слоем золота. А чтобы они не пачкались, их разрешается брать при взвешивании только специальным пинцетом. Точное взвешивание на аналитических весах — дело долгое и кропотливое. Даже малейшее движение воздуха в комнате влияет на их показания, поэтому весы помещают в шкафчик со стеклянными дверцами. Для облегчения процедуры взвешивания самые легкие гирьки на таких весах изготавливают в виде тонких проволочных колечек; они подвешены справа сверху на специальном держателе и помещаются в нужное место на коромысло весов с помощью рычажков, которыми можно управлять, вращая пластмассовый черный диск на внешней дверце шкафчика. Такие аналитические весы — очень сложный и капризный механический агрегат. Их коромысло качается на опоре из особо твердого минерала — агата. Таким весам посвящались целые параграфы в учебниках, и аккуратной работе с ними ранее долго обучали студентов. Вот что писала в рекламной брошюре 1940 года фирма «Кристиан Беккер», производившая такие весы: «Простой расчет показывает, что средний химик проводит значительную часть рабочего времени у весов. В лаборатории нередко можно видеть химиков, ожидающих возле весов своей очереди, задерживающих важную работу, чтобы провести необходимое взвешивание. В связи с этим очевидна необходимость в быстро работающих, удобных и точных весах».

Возникла необходимость — и задача была решена. Постепенно эти красивые аналитические весы уходят в прошлое. Недавно в бюллетене

Американского химического общества была опубликована заметка, где говорилось, что весы — один из основных инструментов химика, за последнее время потеряли шарм, который в свое время делал их центральным местом лаборатории. И потеряли они его в результате... усовершенствования. Современные аналитические весы настолько удобны в работе, надежны и относительно дешевы, что многие химики как бы перестали их замечать, привыкли к ним. Современные весы — настоящее чудо электронной техники (рис. 2.5). На электронных весах



Рис. 2.5. Электронные весы

можно взвесить с высокой точностью легкие образцы, стаканчик с раствором и даже тяжелую банку с краской. Обратите внимание: чем легче взвешиваемый предмет, тем больше знаков после запятой выдают весы. Для очень точных измерений электронные весы могут выдавать вес до пятого знака после запятой, т. е. до сотой доли миллиграмма.

Электронные весы экономят массу времени: на взвешивание уходит всего несколько секунд. Судите сами: у электронных весов — всего одна чашка и никаких гирь! Чтобы отвесить, например, определенное количество реактива в виде порошка, химик ставит сначала на чашу весов пустую посуду, например, стаканчик. Встроенный в механизм чувствительный датчик давления выдает на микропроцессор сигнал, и после мгновенного вычисления на световом табло сразу высвечивается масса стаканчика, причем с очень высокой точностью (у некоторых весов точность измерения можно по желанию изменить). Нажатие специальной кнопки — и на табло опять одни нули; это значит, что процессор «запомнил» массу стаканчика и далее будет автоматически учитывать ее, когда в стаканчик поместят взвешиваемое вещество. Многие весы имеют также специальные программы для обнаружения ошибки взвешивания, усреднения погрешностей, вызванных вибрацией здания. Точность же электронных весов может быть необыкновенной. Так, микровесы имеют чувствительность до 10^{-6} г, а ультрамикровесы — 10^{-7} г. На таких весах можно определить массу точки, которую вы поставили авторучкой на листке бумаги!

Когда химики работают с жидкостями, например, с водными растворами, они обычно определяют не массу, а объем раствора. И в этом случае приборы для определения объема могут быть самыми разными и совершенно непохожими друг на друга — все зависит от того, каков

объем раствора и какова точность измерения. Вы, возможно, видели аптечные склянки с делениями, которые показывают объем налитой жидкости. Химики для этих целей используют мерные стаканы (один такой стакан показан на предыдущем рисунке — он стоит на весах), колбы и цилиндры (рис. 2.6). Колба и цилиндр справа снабжены стеклянной притертой пробкой. С такой пробкой раствор может находиться в сосуде очень долго, не испаряясь. Стаканы и колбы с делениями предназначены лишь для приблизительной оценки объема жидкости, поскольку они не очень точны. Цилиндры (они бывают огромные, на несколько литров, но точность их невелика —

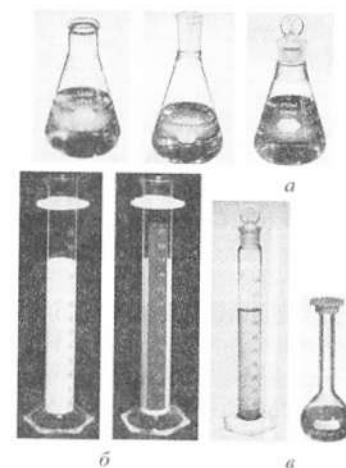


Рис. 2.6. Колбы для жидкостей с делениями (а) и мерные цилиндры (б). Справа внизу (в) изображена колба на 25 мл

50 или 100 мл, а бывают и маленькие цилиндры на 5–10 мл с делениями через 0,5 мл или даже меньше) позволяют отмерять объем жидкости значительно точнее. Тут как с весами — чем меньше измеряемое количество, тем меньше и цена деления. Чтобы лучше видеть цифры, шкала цилиндра может быть окрашена. Шестигранное основание цилиндра не дает ему катиться по столу, если его положить на бок (пустой, конечно). А надетое в верхней части пластмассовое кольцо не дает цилиндру разбиться, если он случайно упадет на лабораторный стол.

Когда при выполнении химических анализов химикам приходится готовить с большой точностью определенный объем раствора, например, 25, 100 или 500 мл, для этой цели используют стеклянные мерные колбы. Отличительная особенность мерной колбы — узкое длинное горлышко с нанесенной в верхней части кольцевой меткой — риской, до которой необходимо налить раствор, чтобы получить требуемый объем. Узкое горлышко позволяет точнее отмерять объем жидкости. Если при данной температуре (а температура, при которой измерен объем колбы, указана на стенке сосуда) насыпать в колбу точно взвешенную массу твердого вещества, затем налить в нее примерно на 2/3 объема растворитель (например, воду), закрыть пробкой, осторожно взболтать до растворения твердого вещества, а потом медленно (а в конце буквально по каплям) долить воду ровно до метки, то получится раствор вещества точно известной массы в точно известном объеме. Это позволяет легко рассчитать концентрацию полученного раствора, что для химиков очень важно.

Иногда химикам приходится объединять обе операции — взвешивание раствора и определение его объема. Делается это для того, чтобы определить плотность раствора — для этого надо его массу разделить на объем. Для определения плотности служат пикнометры — с виду они такие же, как мерные колбы, только очень маленькие, например, на 1 мл. Наполняют пикнометры до метки пипеткой с оттянутым узким кончиком. Сначала с помощью дистиллированной воды и точных весов определяют объем пикнометра, после чего его можно использовать для определения плотности любой жидкости.

Аналогом мерной колбы на небольшой объем является мерная пипетка (рис. 2.7, *а, б*). На ней тоже есть риска — кольцевая метка в верхней узкой части пипетки. Другие пипетки — с делениями — позволяют отмерять разные небольшие объемы жидкости (обычно от 0,1 до 10 мл) с достаточно высокой точностью. Обратите внимание на две пипетки на 10 мл. Левая работает «на слив», т. е. из нее выпускают весь набранный до определенного деления объем жидкости. С помощью правой пипетки на 10 мл объем жидкости отмеряют по разности делений. Медленно затягивать жидкость в пипетку и сливать из нее можно так: укрепить на штативе в вертикальном положении пипетку

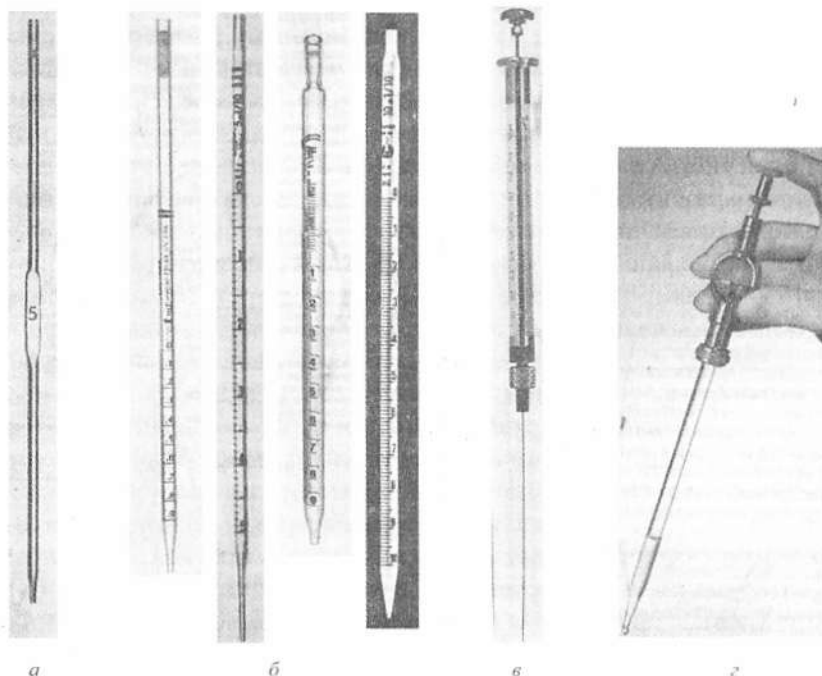


Рис. 2.7. Мерная пипетка на 5 мл (*а*), пипетки на 1,5 и 10 мл (*б*), микрошприц (*в*) и приспособление для набора и слива жидкости (*г*)

и рядом с ней в горизонтальном положении — медицинский одноразовый шприц (без иголки) подходящего объема. Затем соединить носик шприца с верхней частью пипетки кусочком резиновой трубки. Медленно двигая поршень шприца, можно набирать в пипетку и сливать из нее нужное количество жидкости. Существуют и другие приспособления — с резиновой грушей, например, показанное на рис. 2.7, *в*. При этом отпадает необходимость в штативе.

Иногда необходимо точно отмерить очень малый объем раствора. Для этого существуют микрошприцы; изготовленные с высокой точностью, они позволяют переносить из одной емкости в другую миллионные доли литра, т. е. микролитры (мкл) раствора, отсюда и название шприцов. Миллионная доля литра — это тысячная доля миллилитра. Показанный на рис. 2.7, *в* шприц при полном его заполнении вмещает 1 мкл жидкости, а цена самого маленького деления — 0,01 мкл. Для сравнения: маленькая капелька раствора имеет объем около 0,02 мл, или 20 мкл!

В некоторых случаях химику требуется вычислить количество определенного вещества по объему вступающего с ним в реакцию раствора другого вещества с известной концентрацией. Этот прием в объемном анализе называется титрованием; о нем мы еще поговорим, когда речь пойдет о проведении химического анализа. В химической лаборатории измерение объема израсходованного раствора производят с помощью бюретки — длинной стеклянной трубки с делениями и с краником внизу, с помощью которого помещенный в бюретку раствор можно вводить в реакцию не струей, а по каплям (рис. 2.8, *а*). Объем бюретки может



Рис. 2.8. Нижняя часть бюретки с краником (*а*), увеличительная насадка для точного измерения уровня жидкости в бюретке (*б*), приспособление с резиновой трубкой и шариком, заменяющее краник (*в*)

быть разный (например, на 25 или 50 мл). На стенки бюретки нанесены деления, позволяющие измерить объем раствора с точностью до 0,1 мл или даже точнее. Для увеличения точности отсчета существуют специальные приставки с увеличительным стеклом, которые надеваются на бюретку и могут скользить по ней (рис. 2.8, б). Глядя в окуляр приставки, можно очень точно установить положение в бюретке столбика жидкости по ее мениску — вогнутой части на границе жидкость—воздух.

Конечно, бюретки (а часто и пипетки) не держат во время работы руками, а прикрепляют их специальными зажимами к стойке штатива. Нижнее основание штатива обычно делают чугунным и тяжелым, поэтому штатив стоит на столе очень устойчиво и его нелегко уронить.

До сих пор в некоторых лабораториях вместо бюретки с краником используют значительно более дешевые бюретки, оканчивающиеся просто стеклянным носиком. Как же тогда «спускать» из бюретки жидкость, тем более по каплям? Для этого химики давно придумали остроумное приспособление: на нижнюю часть бюретки надевают небольшой отрезок резиновой трубки, внутрь которой загоняют стеклянный шарик, а потом в свободный конец трубки вставляют небольшую стеклянную трубочку с вытянутым носиком (как у аптечной пипетки). Диаметр шарика должен быть больше диаметра трубки, тогда жидкость из бюретки выливаться не будет (рис. 2.8, в). Но если большим и указательным пальцем надавить на трубку в том месте, где внутри сидит шарик, стараясь оттянуть резину немного вбок, между шариком и внутренней стенкой трубки появится небольшой зазор, и жидкость из бюретки начнет просачиваться. Регулируя давление на шарик, можно заставить жидкость литься струйкой, а можно — редкими отдельными каплями.

Перемешивание и термостатирование

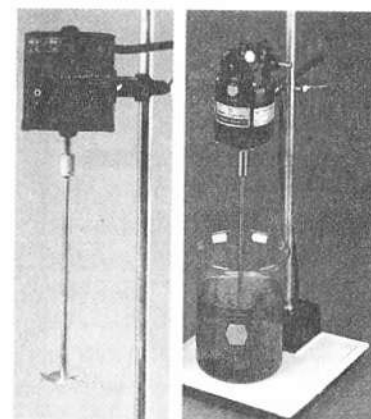
Когда из бюретки раствор реагента добавляют к раствору в колбочке или химическом стакане, необходимо хорошее перемешивание. Перемешивание нужно и во многих других случаях. Конечно, можно встряхивать колбочку вручную, особенно если она маленькая, а жидкости в ней немного. Но в любом случае проще и приятнее, если перемешивание происходит автоматически. Раньше для этого был один способ — над колбой или стаканом с раствором укрепляли на штативе специальный моторчик, который вращал длинную металлическую или стеклянную палочку, конец которой

был опущен в раствор. Для лучшего перемешивания конец стеклянной палочки нетрудно было причудливо изогнуть с помощью горелки. А на металлическую палочку можно надеть какую-нибудь крыльчатку. Регулируя напряжение на моторчике, можно изменять скорость его вращения, чтобы жидкость хорошо перемешивалась и в то же время не выплескивалась из стакана (рис. 2.9, а).

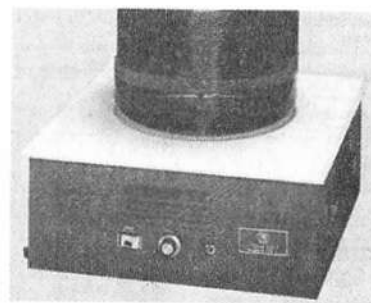
Указанный способ перемешивания не всегда удобен, особенно если в раствор надо добавлять реагенты или измерять в нем температуру. В таких случаях можно использовать магнитные мешалки. В небольшом ящичке с немагнитной крышкой находится моторчик, который вращает сильный магнит. Скорость его вращения можно регулировать, меняя напряжение на моторчике с помощью рукоятки на передней панели ящичка. Если в центр ящика, прямо над невидимым магнитом, поставить стакан или колбу с раствором, а на дно положить маленький магнит, запаянный в стеклянную или пластмассовую трубочку (это и предохраняет раствор от за-

грязнения, и уменьшает трение о дно стакана), то, вращая медленно рукоятку прибора, можно получить в жидкости настоящий «торнадо» — такой, какой виден на рис. 2.9, б. Часто магнитные мешалки снабжены регулируемым подогревом, так что можно одновременно перемешивать раствор и нагревать его до нужной температуры.

А если нужно выдерживать реакционную смесь при строго постоянной температуре в течение длительного времени? Такая проблема возникает, например, при измерении скорости реакции, поскольку скорость может очень сильно зависеть от температуры. В таких случаях используют термостат. Название этого прибора говорит само за себя: оно происходит от греческих слов «термос» — «теплый» (или «терме» — «жар») и «статос» — «стоящий». Термостат — уже довольно



а



б

Рис. 2.9. Приспособление для перемешивания с моторчиком (а), перемешивание с помощью магнитной мешалки (б)

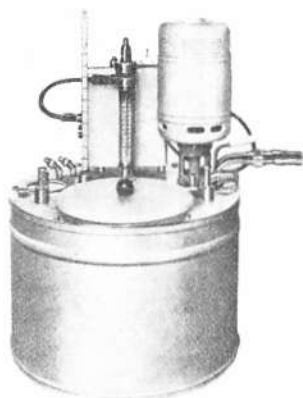


Рис. 2.10. Этот термостат позволяет поддерживать температуру от -60 до $+300$ °С с высокой точностью, а в диапазоне от $+15$ до $+80$ °С — с точностью $\pm 0,02$ °С

сложный прибор (рис. 2.10). Его основа — большой бак, обычно литров на 10. В него заливается дистиллированная вода, которая интенсивно перемешивается мешалкой с мотором (цилиндр этого мотора виден в правой части). Внутри бака расположен электрический нагреватель, при включении которого вода начинает нагреваться; ее температура контролируется обычным лабораторным термометром (он расположен в задней части слева). Чтобы прекратить нагрев, при достижении определенной, заранее установленной температуры, термостат снабжен так называемым контактным термометром (он расположен в самом центре и принцип его действия будет описан в рассказе о температуре и термометрах). Назначение контактного термометра — выключить (с помощью расположенного за ним реле) нагреватель, как только температура поднимется до нужной, и снова включить нагреватель, если температура чуть-чуть понизится. А температура в приборе понижается не столько от охлаждения его воздухом (этот процесс очень медленный), сколько от охлаждения обычной водопроводной водой, протекающей через металлический змеевик (он находится внутри бака и потому не виден). Ввод воды и ее вывод осуществляется двумя резиновыми шлангами, которые присоединяются к двум коротким металлическим трубочкам, видимым в левой задней части термостата. Таким образом, контактный термометр осуществляет тонкий «баланс» между нагревателем и «охладителем» и позволяет поддерживать температуру в термостате с точностью примерно $\pm 0,1$ °С в интервале от $+1$ до $+95$ °С. И если в термостат поместить колбу с веществом, температура вещества будет постоянной до тех пор, пока работает термостат. Если к воде добавить глицерин, температуру можно повышать уже до $+160$ °С (с повышением температуры вязкость глицерина быстро снижается), а если вдруг потребуются еще более высокая температура (что случается редко), в термостат заливают так называемое цилиндрическое масло, которое можно нагревать до 300 °С! Конечно, и контролирующий, и контактный термометры должны соответствовать рабочему диапазону температур.

Если в специальную металлическую емкость, вставленную в бак, поместить лед, то температуру воды в термостате можно поддерживать более низкой, чем комнатная. Если же лед смешать с солью, можно опустить температуру ниже нуля градусов по Цельсию (но сам термо-

стат при этом придется вместо воды заполнить низкотемпературной жидкостью, например, водно-спиртовым раствором). Теоретически смесь льда с поваренной солью может понизить температуру до $-21,3$ °С, а если лед смешать с кристаллами хлористого кальция, можно получить даже -55 °С! Еще более низкую температуру, до -78 °С, дает «сухой лед» — твердый углекислый газ (его широко используют в пищевой промышленности, например, для сохранения мороженого жарким летом). Уместно сказать, что чистый этиловый спирт замерзает при еще более низкой температуре, примерно при -114 °С, правда, ниже -100 °С он уже начинает загустевать.

Но это не все, что умеет «умный» прибор. В самой правой его части видна еще пара трубочек, к которым присоединены уходящие вправо резиновые шланги. Если переключить белую рукоятку, вода помчится из бака по одной из этих трубочек. А по другой она должна вернуться назад! То есть циркулирующая в термостате вода способна поддерживать постоянную температуру где-нибудь еще, обычно неподалеку от термостата. Например, в каком-нибудь приборе. Конечно, там надо предусмотреть герметичный кожух, в одно из отверстий которого вода будет вливаться, а из другого — выливаться.

А если нужно не просто подогреть или охладить вещество, а сильно повысить его температуру, например, чтобы хорошо просушить осадок на фильтре? Для этого существуют сушильные шкафы (рис. 2.11). В них тоже имеется датчик температуры (обычно электрический), нагреватель и реле, с помощью которого можно задать требуемую температуру. Конечно, точность поддержания температуры в сушильном шкафу не идет ни в какое сравнение с термостатом. Но это и не требуется. В таких сушильных шкафах удобно также сушить вымытую химическую посуду.



Рис. 2.11. Воздух в этом сушильном шкафу можно нагреть до $+200$ °С

Измерение температуры

Трудно найти человека, во всяком случае в цивилизованных странах, который бы ни разу не измерял температуру тела. Термометр — настолько привычная вещь домашнего обихода, что на него не обращают внимания. И только в случае недомогания мы пристально всматриваемся в ртутный столбик — не повышена ли температура? А ведь термо-

метры появились сравнительно недавно, и в течение нескольких тысячелетий у людей не было не только термометров, но они даже не знали такого понятия, как температура. Слово это происходит от латинского глагола *tempero* — «соблюдать меру»; соответственно *temperamentum* у древних римлян означало «соразмерность». А вместо температуры использовали качественные понятия: тепло, холодно, жарко, очень жарко и т. д. Понятия эти весьма относительные: одному человеку в помещении может быть жарко, другому — прохладно (особенно если у него повышена температура).

Можно проделать простой эксперимент, показывающий относительность тепловых ощущений человека; этот эксперимент известен уже несколько веков. Поставьте в ряд три кастрюли или глубокие миски. В левую налейте воду погорячее, но такой температуры, чтобы в нее еще можно было опустить руку. Кстати, попробуйте спросить своих знакомых, какая должна быть температура воды, чтобы еще можно было держать в ней руку. Вероятно, некоторые ответят — градусов 60–70 и очень удивятся, если вы скажете им, что если температура воды в кастрюле будет выше 45 °С градусов, то они не смогут опустить в нее руку даже на несколько секунд! В среднюю кастрюлю налейте воду, температура которой близка к 36 °С, так чтобы рука в ней не чувствовала ни холода, ни тепла. А в правую — воду похолоднее (в нее можно добавить несколько кусочков льда из холодильника), а зимой — снега. Конечно, вода не должна быть совершенно ледяной, чтобы не «заморозить» руку. Теперь опустите правую руку в холодную воду, а левую — в горячую, и через 5–10 секунд перенесите обе руки в среднюю кастрюлю. Ощущение будет необычным: одна рука почувствует явное тепло, другой же будет холодно!

«Градусы тепла» научились измерять только в XVII веке. В эти годы уже работали французский философ, математик и физик Рене Декарт (1596–1650), итальянский физик и математик Эванджелиста Торричелли (1608–1647), знаменитый итальянский математик, физик и астроном Галилео Галилей (1564–1642), немецкий астроном, физик и математик Иоганн Кеплер (1571–1630), английский химик и физик Роберт Бойль (1627–1691), французский математик, физик и философ Блез Паскаль (1623–1662), выдающийся английский физик, математик и астроном Исаак Ньютон (1642–1727), другие ученые, заложившие основы современной науки. Отличительная черта этой эпохи — изобретение важнейших инструментов и проведение с их помощью количественных измерений. Именно переход от умозрительных суждений к эксперименту вызвал бурное развитие науки, продолжающееся по сей день.

Одним из важнейших изобретений XVII века было изобретение термометра. Сначала у него было мало общего с современным термо-

метром. Например, Галилей изобрел термоскоп (рис. 2.12). Галилей взял стеклянную колбочку размером с куриное яйцо и присоединил к ней тонкую стеклянную трубочку длиной около 25 см. Нагрев колбочку руками, он опустил конец трубки в сосуд с водой. По мере остывания воздуха в колбочке вода частично заполняла трубку. Если колба нагревалась или охлаждалась, легко было заметить, что уровень воды в трубке меняется. Впоследствии в трубочку стали вводить лишь капельку воды, которая двигалась вверх или вниз в зависимости от температуры воздуха. Прибор Галилея реагировал даже на небольшое нагревание или охлаждение колбочки. Но это не был «настоящий» термометр, потому что он реагировал не только на температуру, но и на атмосферное давление: при его повышении капелька воды двигалась в сторону колбочки, а при понижении — к концу трубочки. Причем изменение давления действовало на объем воздуха в колбочке значительно сильнее, чем изменение температуры. Так что это был «полутермометр-полубарометр». Однако о существовании атмосферного давления в то время ничего не знали.

Постепенно прибор Галилея все более совершенствовался. Воду стали подкрашивать, чтобы она была лучше видна, а на трубочку нанесли деления, чтобы можно было судить о «степени тепла». Для повышения чувствительности диаметр трубки уменьшили, а ее длину увеличили. Ведь чем тоньше трубка, тем сильнее будет влиять на положение капельки воды температура в колбочке. Чтобы тонкая длинная трубка не сломалась, ее изгибали — иногда самым причудливым образом (рис. 2.13).

По мере того как трубочки термометров становились все более узкими, чувствительность термометров возрастала и наконец повысилась настолько, что стало возможным помещать в колбочки термометров не воздух (его объем очень сильно меняется с температурой), а жидкость, объем которой реагирует на изме-



Рис. 2.12. Рисунок из старинной книги с иллюстрацией действия термоскопа



Рис. 2.13. Показаны некоторые попытки сделать трубки первых термометров более компактными

нение температуры незначительно. Например, если нагреть при постоянном давлении 1 литр воздуха с 20 до 50 °С, его объем увеличится на 10 % — до 1,1 л. Если же нагреть с 20 до 50 °С литр воды, ее объем увеличится только на 1 % (до 1,01 л). Но вода при температуре ниже 0 °С замерзнет, и прибор сломается; поэтому вместо воды обычно использовали подкрашенный спирт, который не замерзает даже в самые сильные морозы. Помимо этого спирт расширяется при повышении температуры в несколько раз сильнее, чем вода. Объем жидкости от давления практически не зависит, поэтому «термоскоп» стал «настоящим» термометром.

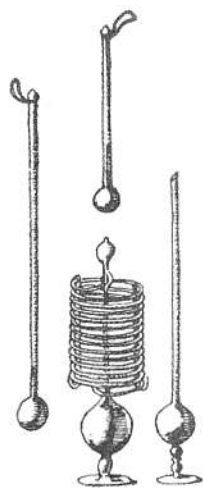


Рис. 2.14. Изображения термометров в трудах итальянской Академии опытов (1666)

Больших успехов в изготовлении термометров достигли мастера-стеклодувы из итальянского города Флоренции, где в 1657 году князь Леопольдо Медичи основал Академию опытов. Главное усовершенствование состояло в том, что из шара и трубки удаляли воздух, после чего конец трубки герметизировали сургучом. Так впервые удалось полностью избавиться от влияния атмосферного давления, а заодно устранить испарение жидкости из трубочки. Приборы флорентийских мастеров были настоящими произведениями искусства (рис. 2.14). Их изготовление описано в трудах Академии, изданных в 1667 году: «Прежде всего стеклодув должен изготовить шарик соответствующей величины с припаянной к нему трубкой. Наполнение инструмента жидкостью происходит следующим образом: шарик нагревают и затем сразу погружают открытый конец трубки в спирт. Спирт начинает медленно подниматься по трубке. При помощи воронки с вытянутым тонким носиком спирт доливают в шар. Трубка заранее делится на равные части, причем деления отмечают белыми бусинами. Затем почти готовый термометр нагревают и, наконец, герметически закрывают его, как только спирт достигнет высшей точки».

Обычно бусинами из белой эмали, которые впаивали в разогретую трубку, делили шкалу на 10 равных частей. Затем каждый промежуток делили еще на 10 равных частей с помощью девяти бусин из черной или цветной эмали. На длинной спиральной трубке термометра помещали много делений и наблюдали малые изменения температуры. С помощью таких термометров флорентийские академики сделали несколько открытий. Они, например, установили, что показание термометра не меняется, когда его шарик погружен в толченый лед, даже если сосуд со льдом помещен в кипящую воду. Ученые не знали, как объяснить

это явление и не догадывались, что оно наблюдается при плавлении любого вещества. Сейчас любой школьник знает, что температура смеси воды со льдом будет постоянной (0 °С), пока весь лед не растает.

А теперь посмотрите на современный термометр — трубочка, по которой поднимается ртуть или спирт, очень узкая, особенно у медицинского термометра. Такие трубочки называются капиллярами (от латинского слова *capillus* — «волос»). Действительно, некоторые термометры имеют капилляры диаметром несколько сотых долей миллиметра — тоньше человеческого волоса! Эти термометры такие чувствительные, что легко улавливают изменение температуры даже в тысячные доли градуса.

Если положить рядом термометры, изготовленные в разное время в разных странах, они могут показать совершенно разные температуры. Например, на одном будет 40°, на другом — 50°, на третьем — 122°! Вы, наверное, уже догадались, что это разные градусы. Действительно, когда-то во Франции и в России были распространены термометры со шкалой Реомюра, которая была предложена в 1730 году французским ученым Рене Антуаном Реомюром (1683—1757). В этом термометре шкала между точками замерзания и кипения воды разделена на 80 частей (рис. 2.15).

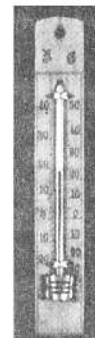


Рис. 2.15. Термометр, изготовленный в XIX веке, позволял определять, в соответствии с привычкой владельца, температуру по Цельсию или Реомюру, а также переходить от одной шкалы к другой

В США распространена шкала Фаренгейта, предложенная в 1714 году работавшим в Голландии искусным немецким физиком и стеклодувом Даниэлем Габриэлем Фаренгейтом (1686—1736), который первым начал изготавливать точные термометры. У нас шкала Фаренгейта известна в основном благодаря знаменитому фантастическому рассказу Рея Брэдли «451° по Фаренгейту». Формула, связывающая шкалу Фаренгейта (F) со шкалой Цельсия, выглядит очень странно: $t\text{ }^{\circ}\text{F} = 9/5(t\text{ }^{\circ}\text{C}) + 32$. Откуда она взялась?

Для калибровки своих термометров Фаренгейт использовал две точки: очень низкую температуру, которую дает смесь мелко колотого льда с солью и которая была принята за нулевую, а также «нормальную» температуру тела человека. Этот интервал он разделил на 12 частей; это число удобно тем, что оно делится и на 3, и на 4, и на 6. Первоначальные градусы получились у Фаренгейта слишком крупными (каждый градус соответствовал примерно 5 °С). Поэтому со временем Фаренгейт изменил шкалу: интервал между температурами охлаждающей смеси из льда с солью и плавления льда он последовательно

пять раз разделил пополам и таким образом получил для плавления льда отметку на 32° выше нулевой (вот откуда в формуле для пересчета градусов Цельсия в градусы Фаренгейта появилось число $2^5 = 32$). По шкале Фаренгейта нормальная температура тела человека равна 98° , а температура кипения воды — 212° . Теперь становится понятным и другое число в формуле для перехода от шкалы Цельсия в шкалу Фаренгейта — это сотая часть интервала между точками кипения воды и плавления льда: $(212 - 32)/100 = 9/5$. А в рассказе Брэдбери $451^\circ\text{F} = 233^\circ\text{C}$ — это температура, при которой воспламеняется бумага (при чуть более высокой температуре — 236°C — возгорается сосновая древесина). В научной литературе американцы давно перешли на привычную нам стоградусную шкалу. Что же до обывателей, то их мнение образно выразил один фермер, который на вопрос, чем ему не нравится шкала Цельсия, ответил: «Я никогда не поверю, что 40° градусов — это очень жарко. Когда же утром по радио передают, что сейчас в округе плюс десять градусов, то я твердо знаю, что мне надо одеться потеплее, взять лопату и идти отгрести снег от гаража...»

А теперь приступим к интересному эксперименту с медицинским термометром. Но прежде следует сказать о его потенциальной опасности. Медицинский термометр знаком каждому с детства и обычно вызывает лишь неприятные ассоциации: ведь как правило мы измеряем температуру только во время недомогания или болезни. У химика же термометр вызывает в основном опасения тем, что содержит ядовитый металл — ртуть. Если термометр разбить и не собрать тщательно всю разлившуюся ртуть (а это очень трудно сделать!), то мельчайшие шарики ртути, закатившиеся в труднодоступные места, будут медленно испаряться, а ее пары, попадая в легкие, задерживаются там и вызывают впоследствии отравление организма. Кстати, по той же причине опасность представляют и лампы дневного света, содержащие ртуть. Некоторым «противоядием» от остатков пролитой ртути может служить регулярное и частое проветривание помещения, снижающее концентрацию паров ртути в воздухе.

Но разве ртуть при комнатной температуре испаряется? Ведь температура кипения ее очень высока — 357°C . Тем не менее в полностью изолированном помещении, в котором пролита ртуть, в каждом кубическом сантиметре воздуха содержится 30 триллионов атомов ртути, или $13,4\text{ мг/м}^3$, что в 1300 раз больше предельно допустимой концентрации! И вот что еще плохо: поскольку силы притяжения между атомами ртути малы (именно поэтому этот металл жидкий), испаряется ртуть довольно быстро, хотя на первый взгляд кажется, что пролитые капли ртути в течение длительного времени вовсе не уменьшаются

в размере. А отсутствие цвета и запаха у паров ртути приводит к тому, что без специальных приборов обнаружить их в воздухе невозможно.

Известен эффектный опыт, доказывающий довольно быстрое испарение ртути (конечно, его можно показывать только в лаборатории). Плотную закрытую маленькую склянку с ртутью устанавливают перед экраном, покрытым специальным составом, который светится под действием ультрафиолетовых лучей (подробнее об этом можно прочитать в главе «Химики разгадывают тайны свечения»). При включении ультрафиолетовой лампы (она располагается перед склянкой) экран начинает ярко и равномерно светиться. Если теперь вытянуть пробку, то на экране появляются движущиеся тени, как будто из сосуда с ртутью идет дым, отбрасывающий эти тени на экран. Объясняется это просто: поднимающиеся из сосуда, почти как дым из трубы, пары ртути задерживают ультрафиолетовые лучи, и в этих местах экран временно не светится.

В последнее время стали появляться электронные термометры, не содержащие ядовитый металл. Но они пока довольно дороги, и в большинстве домов по-прежнему пользуются ртутными термометрами, конструкция которых доведена до совершенства и не меняется уже многие десятилетия. (Иногда в продаже бывают значительно менее опасные термометры: они очень тонкие, ртути в них мало, а главное — если такой термометр уронить, он разбивается посередине и ртуть не выливается.) Будем надеяться, что вы постараетесь работать аккуратно и термометр не разобьете.

Несмотря на ядовитые свойства ртути, ее используют в термометрах со времен Фаренгейта. Она удобна по многим причинам: не смачивает стекло, поэтому отсчет температуры получается более точным; с повышением температуры ртуть расширяется более равномерно, чем другие жидкости, поэтому расстояния между всеми делениями шкалы ртутного термометра одинаковые. Наконец, нагреть ртуть до определенной температуры почти в 30 раз легче, чем воду до той же температуры, поэтому ртутный термометр, помимо прочих достоинств, обладает и малой инерционностью — не надо долго ждать, пока шарик со ртутью примет температуру окружающего воздуха или тела.

Почему же врачи рекомендуют измерять температуру под мышкой не менее пяти минут, а лучше — десять? Ведь термометр может показать правильную температуру уже через полминуты! Но это только в том случае, если между ним и средой имеется очень хороший тепловой контакт, например, когда лабораторным термометром измеряют температуру жидкости; медицинским термометром этого нельзя делать ни в коем случае — если температура воды превысит 42°C , термометр тут же лопнет! Но вроде между термометром и кожей под мышкой кон-

такт довольно тесный... А все дело в том, что поверхность кожи всегда холоднее, чем кровь и внутренние органы. Еще в XIX веке ученые установили, что самое горячее место в теле человека находится в той части печени, где из нее вытекает венозная кровь, температура которой у здорового человека превышает 40°C . А вот кожа может иметь намного более низкую температуру, например, в области ступней. Поэтому когда руку с термометром под мышкой прижимают к телу, прежде всего должна прогреться сама подмышечная впадина — ее согревает тепло циркулирующей крови. А для этого требуется некоторое время.

Что же интересного может быть в измерении температуры медицинским термометром? А вот что. Вы никогда не задумывались, почему он «держит» измеренную когда-то температуру — даже если после измерения прошло много времени? Ведь термометр за окном или в комнате на стене исправно «следит» за температурой окружающего воздуха — столбик подкрашенной жидкости в нем поднимается или опускается при изменении температуры. И дело вовсе не в том, что в этих термометрах вместо ртути — подкрашенный спирт. В лабораториях температуру измеряют чаще всего ртутными термометрами, и когда они просто лежат в ящике лабораторного стола, то показывают температуру воздуха: столбик ртути никогда не «застывает» в них на определенной отметке.

В чем же секрет медицинского термометра? В нем используется принцип разрывания столбика ртути, который после измерения не должен изменять свою длину. Возьмите обыкновенный медицинский термометр и осторожно встряхните его, как всегда это делаете перед измерением температуры (лучше встряхивать термометр над чем-нибудь мягким: диваном, кроватью, в крайнем случае, над ковром — вдруг он случайно выскользнет из руки). Теперь положите термометр на мягкую подстилку на столе (подальше от края) и при хорошем освещении внимательно посмотрите на него в сильную лупу. Вы увидите, что от стеклянного баллончика с ртутью отходит узкая трубочка с очень тонким внутренним каналом — капилляром; конец этой трубочки припаян к внешнему стеклянному баллону. Канал внутри трубочки настолько тонкий, что трубочка сама сделана в виде увеличительного стекла, чтобы лучше разглядеть столбик ртути. В самом же начале капилляра в стекле сделана перетяжка — самое узкое место канала. Через эту перетяжку ртуть сама перетечет в основной канал не может, как не может она и вернуться назад. Что же происходит при измерении температуры?

Внимательно посмотрите через лупу на перетяжку и одновременно очень осторожно нагревайте пальцами свободной руки баллончик с ртутью — но ни в коем случае не горячей водой или горячим пред-

метом! Перед вами предстанет удивительное зрелище: в отличие от других, не медицинских, термометров, ртуть поступает в очень тонкий капилляр из резервуара не равномерно, а скачками, периодически «выстреливая» в него через перетяжку мельчайшими капельками. Заставляет ее это делать повышение давления в резервуаре при подъеме температуры. В отсутствие давления ртуть сама через перетяжку пройти не может. Поэтому когда термометр вынимают из-под мышки, резервуар начинает охлаждаться, столбик ртути в месте перетяжки разрывается, и часть ее остается в капилляре — ровно столько, сколько ее там было во время измерения температуры. Резко встряхивая термометр, мы сообщаем столбику ртути ускорение, в десятки раз превышающее нормальное ускорение силы тяжести. Развиваемое при этом давление «загоняет» ртуть через перетяжку обратно в резервуар. Так что наш маленький медицинский термометр — настоящее чудо техники! Кстати «знатоки» из телевизионной передачи «Что? Где? Когда?» не смогли ответить на вопрос, почему показание медицинского термометра не изменяется после измерения температуры.

Жители средней полосы России и тем более ее южных областей не всегда знают, что ртутный термометр может отказать в трескучие зимние морозы, которые случаются в северо-восточной части нашей страны. Получается так потому, что при температуре ниже $-38,9^{\circ}\text{C}$ ртуть замерзает. Это явление впервые наблюдал в Иркутске при сильном морозе в 1736 году французский астроном и географ Жозеф Никола Делиль (1688—1768). При основании Российской академии наук в 1725 году Делиль был приглашен в Петербург на место директора астрономической обсерватории и прожил в России до 1747 года. В Сибирь он ездил с научной целью — для наблюдения за прохождением Меркурия перед диском Солнца и для определения географического положения некоторых населенных пунктов. Искусственно же заморозить ртуть с помощью охлаждающей смеси (из льда и концентрированной азотной кислоты) удалось лишь в 1759 году другому петербургскому академику Иосифу Адаму Брауну (1712—1768); его пригласили в Российскую академию в 1746 году. Браун обнаружил, что твердую ртуть можно ковать, как обычные металлы; он написал также много статей по физике и метеорологии.

Здесь уместно сказать, какие же морозы бывают на Земле. Много лет самой низкой температурой у земной поверхности считалась температура, которую наблюдали в августе 1960 года в районе советской антарктической станции «Восток», расположенной на высоте 3488 м над уровнем моря ($78^{\circ} 28'$ южной широты, $106^{\circ} 48'$ восточной долготы), $-88,3^{\circ}\text{C}$. Этот рекорд был побит в разгар зимы 21 июля 1983 года на той же станции «Восток»: $-89,2^{\circ}\text{C}$.

В Северном же полушарии «полюсом холода» считается район Оймякона (город в верховьях реки Индигирки в Якутии). В феврале 1933 года в Оймяконе температура воздуха понизилась до $-67,7^{\circ}\text{C}$, а температура снега составила $-69,6^{\circ}\text{C}$. Очень сильные холода бывают также в Верхоянске — городе на реке Яне, к северо-западу от Оймякона. В феврале 1892 года там была зафиксирована температура -69°C . В Оймяконе в тот год измерения не проводились, однако обычно в самые холодные ночи там на два градуса холоднее, чем в Верхоянске. Поэтому считается, что когда в Верхоянске было -69°C , в Оймяконе должно было быть -71°C ! В этих местах фиксируется и самая большая в мире годовая амплитуда температур, которая даже вошла в Книгу рекордов Гиннеса: $106,7^{\circ}\text{C}$ (от -70 до $+36,7^{\circ}\text{C}$), в районе Верхоянска.

Ниже 50 градусов в России бывает в Якутии, Красноярском крае, Томской и Магаданской областях. Но не только Россия славится холодами, при которых замерзает ртуть в термометрах. В феврале 1947 года в Канаде (станция «Снэг») была зафиксирована температура $-62,8^{\circ}\text{C}$. В январе 1971 года в горах Эндикотт (Аляска) было $-62,1^{\circ}\text{C}$. Ниже -50°C температура бывает в США — в штатах Монтана, Колорадо, Айдахо, Сев. Дакота, Вайоминг. В Швеции и Норвегии также может быть ниже -50°C .

Если надо измерять такие низкие температуры, вместо ртути можно использовать некоторые ее сплавы. Например, сплав ртути с 8,5 % редкого металла галлия не замерзает до -60°C ; этот сплав предложил академик Николай Семенович Курнаков (1860—1941). Для измерения низких температур широко используют также органические соединения — петролейный эфир, керосин, толуол, спирт. Такими жидкостями заменяют ртуть в бытовых термометрах, не требующих высокой точности. Термометром, заполненным спиртом, можно измерять температуры от -100 до $+75^{\circ}\text{C}$. При более низкой температуре спирт становится вязким, что затрудняет измерения.

При измерении высоких температур появляются другие проблемы. При температурах более $+200^{\circ}\text{C}$ ртуть начинает интенсивно испаряться (кипит она при $+357^{\circ}\text{C}$) и конденсироваться в верхней части капилляра. Однако есть ртутные термометры, позволяющие измерять температуру до $+600^{\circ}\text{C}$. В них над ртутью под большим давлением (порядка 30 атм) находится инертный газ, не дающий ртути закипеть даже при очень высокой температуре.

Разновидностей лабораторных термометров очень много. Некоторые из них предназначены не столько для измерения температуры, сколько для ее поддержания в заданных пределах в том или ином приборе. Так, уже упоминавшийся электроконтактный термометр

(рис. 2.16) автоматически включает или выключает какой-либо прибор при достижении определенной температуры. Внутри капилляра этого термометра с помощью магнитной муфты перемещается тоненькая, диаметром 0,1 мм, вольфрамовая проволочка. Нижний конец ее устанавливается на температуру, которую нужно поддерживать постоянной, вращая магнит в ту или иную сторону. В нижнюю часть капилляра впаян второй (неподвижный) платиновый контакт, который всегда погружен в ртуть. Термометр соединяют с реле, которое управляет, например, нагревателем термостата. Как только поднимающийся ртутный столбик коснется вольфрамовой проволочки, электрическая цепь замкнется и реле выключит нагреватель. Когда жидкость в термостате чуть охладится, ртуть в капилляре опустится, разрывая контакт, и реле вновь включит нагреватель.

Иногда, например, на автоматической метеорологической станции, куда люди приходят редко, устанавливают максимально-минимальный термометр. Его особенность в том, что он может показывать самую высокую и самую низкую температуру за тот промежуток времени, когда его не трогали (рис. 2.17). Работает он так. В нижней части U-образного капилляра находится столбик ртути (поскольку ртути в приборе мало, изменением ее объема при изменении температуры можно пренебречь). А рабочим телом в термометре, которое и реагирует на изменения температуры, служит бесцветная органическая жидкость, основной объем которой находится в широкой пробирке. С обеих сторон в капилляр помещены миниатюрные ползунки из синего стекла. При повышении температуры расширяющаяся жидкость давит на ртутный столбик и перемещает его так, что правый мениск поднимается, толкая при этом правый ползунок вверх, а левый — опускается (обратите внимание на перевернутую шкалу слева). При понижении температуры ртуть перемещается в обратном направлении, толкая вверх левый ползунок, тогда как правый остается на месте. Таким образом, оба ползунка могут двигаться только вверх и показывать самую высокую и самую низкую температуру, которая отмечалась прибором (в данном случае $+28$ и $+14^{\circ}\text{C}$ — такие температуры были в течение года в квартире,



Рис. 2.16. Электроконтактный термометр и магнитная муфта к нему



Рис. 2.17. Максимально-минимальный термометр

в которой висел этот термометр). Встряхивая термометр, можно установить оба ползунка в позицию, соответствующую показанию термометра в данный момент (на рисунке – около $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$), при этом ползунки упрутся в ртутные столбики.

Заканчивая небольшую экскурсию в мир стеклянных термометров, трудно удержаться, чтобы не продемонстрировать среди них великана и карлика (рис. 2.18). У маленького термометра Аншютца – он назван



Рис. 2.18. Термометры Аншютца и Бекмана

по имени немецкого химика Рихарда Аншютца (1852–1937) – сверху припаян стеклянный шарик, за который его легко подвесить на ниточке в нужной части аппаратуры. Огромным кажется рядом с ним термометр, изобретенный немецким химиком Эрнстом Отто Бекманом (1853–1923). Это так называемый метастатический термометр переменного наполнения. За этими мудреными словами скрывается вот что. Термометр предназначен для определения не самой температуры, а лишь ее изменения в небольшом интервале – зато с очень высокой точностью. Это требуется, когда анализируют вещество по повышению температуры кипения или по понижению температуры плавления его раствора. В термометре Бекмана две шкалы: большая основная, длиной более полуметра, соответствует изменению температуры всего на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет разместить на ней 600 делений через $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. (С помощью увеличительного стекла можно повысить точность отсчета до $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$!) Нужный диапазон измерений – в любом интервале от -20 до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – устанавливают, отливая часть ртути из большого резервуара внизу в петлеобразный запасной резервуар сверху, либо наоборот. Делается такая операция путем переворачивания термометра и легкого его встряхивания.

В последние годы жидкостные термометры все увереннее вытесняются электронными приборами (рис. 2.19). Они и безопаснее (не содержат ртути), и точнее, и позволяют измерять температуру



Рис. 2.19. Электронный термометр, показывающий, что температура жидкости в стакане равна $+77,3\text{ }^{\circ}\text{C}$

там, где обычный термометр бесполезен (например, в живой клетке). Вместо шарика с ртутью в таком приборе небольшой датчик – термочувствительный элемент, занимающий очень малый объем. Если его нагреть (или охладить), на выходе появится небольшое электрическое напряжение, которое можно измерить и таким образом определить температуру.

Сравнительно недавно появились «одноразовые термометры», предназначенные для измерения температуры... жареной котлеты! Известно, что многие пищевые отравления происходят из-за бактериальной зараженности продуктов, особенно скоропортящихся. И рыба, и мясо – прекрасная питательная среда для многих микроорганизмов, которые могут при благоприятных условиях размножаться с огромной скоростью. Для размножения патогенных микробов существует оптимальная температура. При низких температурах бактерии растут очень медленно, а при высоких они гибнут.

Единственный надежный способ обеззараживания долго хранившихся пищевых продуктов – тепловая обработка. Так, температурная обработка молока предусматривает либо пастеризацию в течение получаса при $+62...+65\text{ }^{\circ}\text{C}$, либо кратковременную (10–20 секунд) обработку при $+71...+74\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой уничтожаются почти все микроорганизмы, либо достаточно длительную стерилизацию при $+115\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой гибнут все патогенные микроорганизмы и их споры. Когда-то нередко были вспышки инфекционных заболеваний, вызванных потреблением зараженного молока (туберкулез, бруцеллез, дизентерия и др.). С потреблением зараженного мяса связаны различные глистные заболевания – гельминтозы и инфекционные болезни.

Перед употреблением многие продукты обязательно подвергаются тепловой обработке. Выдерживание продуктов при $+60...+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5–15 минут полностью убивает возбудителей бруцеллеза и ящура. При этом не только гибнут микроорганизмы, но изменяется состав продуктов. Уже при $+60...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинаются химические превращения белков, что облегчает их усвоение. Не рекомендуется есть и сырые куриные яйца (а утиные – категорически запрещено). Яйца нередко заражены сальмонеллами, которые вызывают тяжелые пищевые отравления. Для безопасности сырые куриные яйца надо нагреть примерно до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при этом они фактически остаются сырыми). Поэтому кулинарная обработка мяса, птицы, рыбы совершенно необходима.

Как же узнать, что гамбургер или куриные ножки прогрелись в духовке или микроволновой печи в достаточной степени? Для этого существуют различные термометры, в том числе электронные, но они довольно дорогие. Альтернативой могут служить дешевые одноразовые

термометры (рис. 2.20). Такой термометр представляет собой небольшую картонную пластинку, на кончике которой находится маленький термочувствительный индикатор — белый прямоугольничек размером



Рис. 2.20. «Бумажный термометр» в действии



а



б



в

Рис. 2.21. Новая полоска (а), термочувствительный индикатор нагрет до начала плавления (вещество расплавилось не полностью) (б), новая полоска со снятым покрытием (в)

примерно 6×4 мм. Достаточно всего на пять секунд поместить кончик индикатора в подогреваемый продукт, чтобы определить, хорошо ли он прогрелся. Если индикатор остался белым, нагрев следует продолжить, пока пластинка не почернеет. Почернение пластинки указывает на то, что требуемая температура достигнута. Для каждого вида продукта существует свой индикатор, цвет которого меняется только при достижении определенной температуры: для рыбы — это индикатор на +60 °С; для гамбургера, мясного фарша, свинины или яиц в кастрюле с водой — на +71 °С, для цыплячьих грудок — на +77 °С и т. д.

Как же устроен такой необычный «термометр»? Его кончик, который и измеряет температуру, герметично покрыт безвредной полимерной пленкой. Под этой прозрачной оболочкой находится белый порошок, а под ним — черный картон. При достижении определенной температуры белый порошок быстро плавится и становится видна черная подложка (рис. 2.21). Все просто. Для каждой температуры подобрано безвредное вещество, которое плавится при данной температуре. Точность определения температуры таким «прибором» — примерно 0,5 °С.

Фильтрация и разделение жидкостей

Одна из самых старых химических операций — фильтрация, т. е. отделение твердого вещества от жидкости, в которой это вещество не растворяется. С древнейших времен, раздавив спелый виноград, отделяли его сок от кожицы и косточек. Самый примитивный «прибор» для фильтрации представлял собой полотняный мешок, который наполняли плодами, а затем складывали так, чтобы на обоих его концах образовалась петля. В эти петли вставляли две палки, которые вращали в разные стороны. Получался одновременно отжим с фильтрацией через ткань (рис. 2.22). В Древнем Египте, во времена III династии (ок. 2670–2600 до н. э.), процесс был усовершенствован: мешок подвешивали за петли к стойкам (рис. 2.23). В таком виде этот «механизм» использовался более 2500 лет.



Рис. 2.22. Рабочие выжимают виноградный сок с помощью фильтровального мешка. (Рисунок из древнеегипетского захоронения в Саккаре, ок. 2500 года до н. э.)

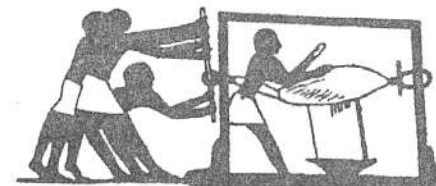


Рис. 2.23. Усовершенствованный фильтровальный мешок, концы которого удерживаются на раме. (Рисунок из древнеегипетского захоронения в Бени-Хасан, ок. 1500 года до н. э.)

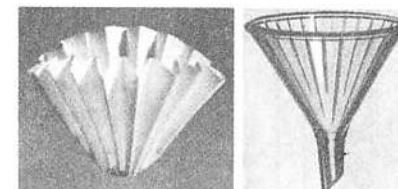


Рис. 2.24. Складчатый фильтр и воронка с внутренними ребрами и наружными канавками

Современному химику для фильтрации не нужны ни полотняные мешки, ни подсобные рабочие. Со Средних веков сохранился способ фильтрации с помощью воронки и бумажного фильтра. Для ускорения процесса фильтр делают складчатым — так увеличивается фильтрующая поверхность. Если используется обычный бумажный фильтр конической формы, фильтрация ускоряется при наличии небольших продольных ребер внутри воронки (рис. 2.24). В этом случае фильтр не прилипает к стеклу и профильтрованная жидкость стекает со всей внешней поверхности фильтра. Каждый, кому пришлось фильтровать что-либо с помощью воронки или просто использовать ее для переливания жидкости, знает об одной неприятной особенности:

стекающая в емкость жидкость вытесняет оттуда воздух, и если он не может свободно выйти между горлышком сосуда и внешней стенкой воронки, фильтрование резко замедляется. Хуже того: воздух из сосуда иногда «прорывается» через носик воронки в слой жидкости, вызывая ее разбрызгивание. Чтобы такого не происходило, обычно между воронкой и горлышком вставляют стеклянную палочку или просто спичку. Чтобы избавить химиков от таких неудобств (палочка или спичка могут проскользнуть вниз) некоторые воронки делают с небольшими продольными ребрышками или с канавками на внешней стенке.

В связи с этим можно вспомнить сетования известного популяризатора науки Я. И. Перельмана. Вот что он писал в своей «Занимательной физике» (книге первой): «Кому случалось наливать через воронку жидкость в бутылку, тот знает, что нужно время от времени воронку приподнимать, иначе жидкость из нее не выливается. Воздух в бутылке, не находя выхода, удерживает своим давлением жидкость в воронке. Правда, немного жидкости стечет вниз, так что воздух в ней чуть сожмется давлением воды. Но стесненный в уменьшенном объеме воздух будет иметь увеличенную упругость, достаточную, чтобы уравновесить своим давлением вес жидкости в воронке. Понятно, что, приподнимая воронку, мы открываем сжатому воздуху выход наружу, — и тогда жидкость вновь начинает литься».

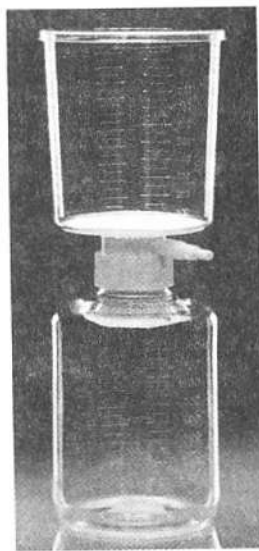


Рис. 2.25. Приспособление для вакуумного фильтрования со стеклянным пористым фильтром

Было бы поэтому весьма практично устраивать воронки так, чтобы суженная часть их имела продольные гребни на наружной поверхности, — гребни, мешающие воронке вплотную приставать к горлышку. Таких воронок мне в обиходе видеть не приходилось; только в лабораториях употребляются фильтры, устроенные подобным образом».

Первое издание «Занимательной физики» было опубликовано в 1913 году и с тех пор перепечатывалось десятки раз, однако воронки с ребрышками, кажется, так и остались только в лабораториях.

Фильтрование — процесс довольно медленный: жидкость из носика воронки вытекает по каплям. Чтобы ускорить этот процесс, химики придумали такое приспособление (рис. 2.25). У верхнего сосуда, в который наливают смесь для фильтрования, вместо обычного дна — стеклянный фильтр. Это белая пластинка из мелкопористого стекла, в котором имеется множество тонких пор, пропускающих жидкость и не

пропускающих твердые частицы. Размер пор может быть разным, но в любом случае жидкость через такой фильтр просачивается не очень быстро (а иногда даже очень медленно, если твердое вещество образует на поверхности фильтра плотный осадок). Резко ускорить фильтрование помогает... атмосферное давление. Для этого воздух из нижнего сосуда через специальную трубочку откачивают с помощью насоса. Понижение давления воздуха в нижнем сосуде резко увеличивает давление воздуха на фильтруемую жидкость. В результате скорость фильтрования может возрасти во много раз. Химику остается только перелить отфильтрованную жидкость (или вылить ее, если нужна не она, а осадок на фильтре).

Не всегда процесс фильтрования идет успешно даже со стеклянным фильтром и с использованием вакуумного фильтрования. Бывают случаи, когда твердое вещество в жидкости состоит из таких мелких частиц, которые, образуя суспензию или вязкую массу, быстро забивают любой фильтр и останавливают фильтрование. В таких случаях используют приспособление, весьма напоминающее центрифугу, на которой тренируются космонавты. Жидкость, которую надо, как говорят технологи, осветлить, наливают в несколько пробирок из прочного стекла, выдерживающего большие перегрузки. Эти пробирки вставляют в пластмассовые или металлические пеналы, которые устанавливают в пазах вращающегося диска центрифуги (рис. 2.26). Диск с помощью мотора раскручивается до очень высоких скоростей (показанная на этом рисунке центрифуга имеет скорость вращения 3300 оборотов в минуту, или 55 оборотов в секунду). Под действием центробежной силы мельчайшие твердые частицы, которые никак не хотели оседать в обычном поле притяжения Земли, получив ускорение, в тысячи раз превышающее ускорение нормального падения, собираются на дне пробирок в виде плотного осадка. Остается только отключить центрифугу и слить с этого осадка прозрачный раствор. Кстати, похожий процесс происходит и в обычной соковыжималке, в которой также действует центробежная сила. Только в соковыжималке эта сила отбрасывает (через мелкую сетку) отжатый сок, а твердые «отжимки» морковки или яблок остаются внутри сетки.

В заключение этого раздела рассмотрим случай, когда надо разделить две жидкости. Понят-



Рис. 2.26. Современная центрифуга

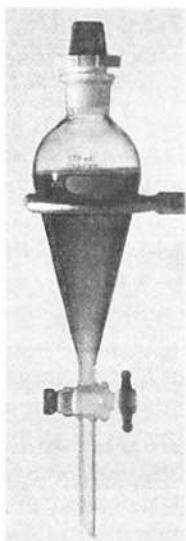


Рис. 2.27. Делительная воронка

но, что такая операция имеет смысл только в тех случаях, когда эти жидкости взаимно нерастворимы — например, вода и масло (любое). Если эту смесь потрясти, масло раздробится на мелкие капельки и образуется мутная эмульсия. Со временем она отстоится и более легкое масло соберется наверху. Но как отделить его от воды? Каждый, кто пробовал совершить такую операцию в обычной кастрюле, знает, как трудно бывает в самом конце: почти всегда либо часть воды оказывается в слитом масле, либо часть масла остается в кастрюле с водой.

Химик легко отделяет две жидкости с помощью простого прибора, который называется делительной воронкой (рис. 2.27). Открывая понемногу кран, легко добиться того, чтобы граница между двумя жидкостями (ее очень хорошо видно в узкой части воронки) как раз оказалась на уровне крана.

Техника безопасности — на первом месте!

В химической лаборатории самое главное — строжайшим образом соблюдать все меры безопасности. В чем же состоят правила проведения опытов?

Прежде чем приступить к опытам, даже самым простым, надо подготовить рабочее место, необходимую посуду и оборудование, а также внимательно прочитать описание опыта, чтобы, проводя его, вы ясно понимали, что и зачем делаете. Химия требует аккуратной, а главное — грамотной работы! Очень важно также, чтобы после окончания работы не оставалось никакой грязи — ни на столе, ни на полу, ни на одежде. Использованное для опытов оборудование тоже должно быть вымыто.

Конечно, в этой книжке не будут описаны сложные и опасные опыты. Ну чем могут быть опасны самодельные весы? Но ведь беспечный или неаккуратный человек может пораниться и иголкой, и даже карандашом. Опыты же с химическими реактивами представляют дополнительную опасность. От разных веществ могут остаться трудно удаляемые пятна, а то и дырки на одежде. Реактивы могут вызвать ожог на коже; особенно надо беречь глаза. Кроме того, при смешивании некоторых вполне безобидных веществ возможно образование ядовитых соединений, которыми можно отравиться. Происходит такое, как

правило, у людей химически неграмотных, которые не знают состав и свойства веществ, не представляют себе, что между ними может произойти нежелательная реакция. Если вы только начали интересоваться превращениями веществ и еще не знаете ни химических формул, ни уравнений реакций, единственный способ избежать неприятностей — строго следовать инструкции, описанию эксперимента. И если вы захотите сделать что-то сверх того, что описано в эксперименте, то без дополнительных знаний вам не обойтись, а их вы можете почерпнуть из соответствующих учебников (и не только школьных!) и справочников.

Для иллюстрации сказанного приведем только три примера «из жизни». Два закончились сравнительно благополучно, третий — печально.

Пример первый. Согласно правилам при работе с пипетками (см. рис. 2.7) затягивать в них жидкость ртом нельзя ни в коем случае! И дело не только в том, что это негигиенично и вредные пары над раствором могут попасть в организм. Основная опасность в другом: если потерять бдительность, самый кончик пипетки, погруженный в жидкость, может оказаться в воздухе (уровень жидкости ведь понижается), и тогда под действием разности давлений все содержимое пипетки мгновенно окажется во рту! Хорошо если в пипетке была чистая вода или на худой конец раствор поваренной соли или хлорида кальция — противно, но не смертельно. А если это была сильная щелочь, или кислота, или очень ядовитое вещество? Один химик, пренебрегший правилами техники безопасности, засасывал таким способом в большую пипетку крепкий раствор аммиака — нашатырный спирт. И в это время ему что-то сказал коллега. Достаточно было незадачливому химику, наклонившемуся над колбой, чуть-чуть приподнять голову, как кончик пипетки, который был погружен в раствор не очень глубоко (раствора в колбе было немного), оказался в воздухе. И через долю секунды около 10 миллилитров раствора оказалось у него во рту. Конечно, химик тут же прополоскал рот большим количеством воды, но через некоторое время со слизистых оболочек языка и внутренней части щек начала лохмотьями слезать кожа. Боли не было, но и приятно тоже было мало. Этот случай послужил ему хорошим уроком: всегда надо выполнять все правила и инструкции, а также стараться предусмотреть все неприятные события, которые могут произойти. И не только в химической лаборатории. Например, не ставить чайник или стакан с кипятком на самый край стола...

Пример второй. Как-то в редакцию журнала «Химия и жизнь» пришло письмо от матери школьника 7-го класса: «Мой сын отравился каким-то едким газом. При этом он уверял, что смешивал самые безобидные вещества — уксус и жидкость для стирки белья. Сыну, конечно, здорово влетело. Я уверена, что на самом деле он что-то скрывает. Ведь уксус — не серная кислота. Да и стиральным порошком, я не слышала, чтобы кто-нибудь отравился».

Что же произошло? Уксус, конечно, не серная кислота, но смешивать без разбора все подряд — дело, не достойное любителя химии. В данном случае уксус выступал просто в качестве кислоты, хотя и слабой. Вместо него могла быть любая другая кислота. Стиральный порошок здесь, конечно, ни при чем. «Жидкость для стирки белья», которую использовал незадачливый юный химик, — это, скорее всего, отбеливатель. Вот в нем-то, очевидно, и было все дело. Отбеливатели бывают разные. В состав многих моющих средств входят так называемые оптические отбеливатели. Это вполне безопасные вещества; их назначение, образно говоря, — «обмануть глаз», выдать желтоватую ткань за белоснежную. Справляются они с этим за счет явления, которое называется флуоресценцией (об этом интересном и красивом явлении будет рассказано в главе «Химики разгадывают тайны свечения»). Преобразуя невидимый ультрафиолетовый свет (он поступает с солнечным светом) в голубой, синий и фиолетовый, оптический отбеливатель, который сам может быть бесцветным, «подправляет» цвет ткани так, что она кажется нам белой. Этот прием давно известен, только вместо синтетических флуоресцирующих красителей наши мамы и бабушки подкрашивали (а иногда и сейчас подкрашивают) ткань синькой. При сильном разведении ее бледно-синий цвет, смешиваясь с ослабленным желтоватым цветом ткани, давал ощущение белого цвета, поскольку желтый и голубой — дополнительные цвета, которые в сумме дают белый цвет. Современные оптические отбеливатели придают белью гораздо более яркий белый цвет, особенно при прямом солнечном освещении.

Совершенно иначе действуют химические отбеливатели. В их состав входят вещества, которые химически разрушают различные загрязнения на ткани, а заодно и дезинфицируют ее. Раньше ткани (хлопчатобумажные и льняные) белили на солнце: под действием ультрафиолетового света большинство красителей постепенно выцветает. С ростом промышленного производства тканей для той же цели стали использовать хлорную известь, которую называли также белильной. Это смешанная кальциевая соль двух кислот — соляной и хлорноватистой. Впервые хлорную известь получил английский химик Смитсон Теннант (1761—1815), тот самый, который в 1804 году открыл самые тяжелые металлы платиновой группы — осмий и иридий. За несколько десятилетий производство хлорной извести выросло в десятки раз, она стала довольно дешевым препаратом. Действующее начало этого вещества — так называемый активный хлор, окислитель, разрушающий загрязнения (а при неправильном употреблении — и саму ткань). В настоящее время хлорную известь используют в основном для дезинфекции.

Активный хлор содержится и в иных веществах. Издавна (с 1789 года) известна жавелевая вода, близкая родственница хлорной извести, в формуле которой место кальция занимает калий. Свое название она получила от названия пригорода Парижа — Жавеля, где располагались заводы

по ее производству (сейчас это один из парижских районов). Наравне с ней использовали и так называемую «лабарракову воду»; в ней на месте калия находится его «родственник» натрий. А назвали этот отбеливающий раствор по имени парижского аптекаря Антуана Жермена Лабаррака (1777—1850); его начали использовать с 1820 года. Натриевая соль хлорноватистой кислоты (химики называют ее гипохлоритом натрия) входит в состав многих современных средств для отбеливания.

Помимо веществ с активным хлором для той же цели используют и вещества с «активным кислородом». К таким веществам относится, например, перекись водорода (женщинам она хорошо известна в качестве средства для обесцвечивания волос), ее соединение с мочевиной (гидроперит), некоторые другие вещества. Все эти вещества обладают сильным окислительным действием.

Какая же опасность может возникнуть от химических отбеливателей? Активного вещества в растворе для стирки немного, и опасности такие отбеливатели никакой не представляют — если использовать их строго в соответствии с инструкцией. И если даже взять неразбавленный концентрат отбеливателя на основе активного кислорода, то при неправильном употреблении его действие будет проявляться разве что в бурном выделении газообразного кислорода, который для белья бесполезен, но и для человека безвреден. Иначе обстоит дело с активным хлором в составе гипохлоритов. Растворы гипохлоритов устойчивы только в щелочной среде. При подкислении идет реакция образования хлорноватистой кислоты. Это опасная реакция, так как образующаяся в свободном виде хлорноватистая кислота — вещество токсичное и нестабильное. Она разлагается с выделением хлора, которым, скорее всего, и отравился незадачливый юный химик. Ведь предельно допустимой (и, следовательно, сравнительно безопасной) считается такая концентрация хлора в воздухе, при которой на одну часть хлора приходится миллион частей воздуха (один маленький наперсток хлора, «разведенный» в кубометре воздуха)! Смешав неразбавленный отбеливатель с уксусом, юный химик мог получить в воздухе в сотни раз большую концентрацию ядовитого газа. Более того, известны случаи, когда гипохлориты давали взрывчатые смеси с некоторыми веществами, которые используются в быту (по понятным причинам мы их здесь не указываем). Так что, работая с любым, даже привычным химикатом, следует строго соблюдать инструкцию.

Описание третьего случая предоставим самому пострадавшему. Вот запись того, что с ним случилось много лет назад: «Пишу по поводу странного и в некотором роде трагического случая, произошедшего со мной. Но сначала немного о себе. Химией увлекся в 4-м классе, а в 7-м классе, выступая по программе восьмого, победил на районной, городской и республиканской олимпиадах. В следующем году опять победил на республиканской, на Всероссийской — третий диплом, на

Всесоюзной моя работа отмечена первым дипломом. В нынешнем году собирався ехать на Всесоюзную олимпиаду, прошел по конкурсу — и не поехал. Причиной был взрыв.

Как всякий уважающий себя химик, помимо теории я занимаюсь и практикой в небольшой домашней лаборатории. Услышал где-то рецепт приготовления... (далее название вещества мы будем заменять буквой X — на всякий случай) и решил исследовать свойства этого вещества. Получил кристаллы X , отфильтровал их, промыл, высушил. Подумал — нелишне бы сделать порошок...

В общем, у меня было 2,5 г чистого вещества X . Взяв на пробу кристаллик, я поднес к нему спичку. Он с треском разлетелся; стало быть, к открытому пламени неустойчив. Пересыпал кристаллы в фарфоровую ступку, стал крайне осторожно, на вытянутой руке, перетирать пестиком. Заметил несколько неперетертых кристаллов, стряхнул их на край ступки, коснулся пестиком, едва-едва провел (повторяю, крайне осторожно) — и взрыв, неожиданный, ужасной силы. А всего-то два с половиной грамма...

Руки и ноги в крови. Если бы я не был близорук и не носил бы очков, остался бы слепым: оба стекла — вдребезги, фарфоровая ступка превратилась в пыль, газовая плита из стального листа пробита фарфоровым осколком почти насквозь. Так что мне еще очень и очень повезло. Вызвал скорую, попал в больницу. В справке написали: «Множественные раны обеих рук, повреждение сухожилий-сгибателей, травматическая ампутация первой фаланги среднего пальца правой руки». Наложили массу швов — 24 на одной руке и 4 на другой.

Вот выздоровел, но не могу понять, почему же все-таки произошел взрыв? Я неплохо знаю правила работы в лаборатории, но я азартен, работая, теряю представление о времени и о многом забываю. Надо исправляться; этот случай меня многому научил. Чрезмерная увлеченность, неосторожность, излишняя самоуверенность стали причиной несчастья. А ведь всего через пять дней надо было лететь на Всесоюзную олимпиаду.

До сих пор мне просто везло. Например, вышел я как-то из дому и увидел соседа, на два года моложе меня, — трясет перед носом пузырек с бурой смесью. Спрашиваю, что в пузырьке, а он небрежно отвечает: «Бертолетка с фосфором». Я пузырек взял и отшвырнул подальше. Не успел долететь до земли, как взорвался. А сосед только в затылке почесал...»

Что можно было ответить автору письма? Он допустил непростительную ошибку, работая с веществом X в домашних условиях. И помимо прочего, не прочитал предварительно об этом веществе, не узнал о его коварных свойствах. А ведь о нем написано достаточно. Например, в химической энциклопедии сказано, что высокая взрывоопасность вещества X ограничивает применение соединений этого класса, причем для близкого по строению вещества Y замечено: «Взрывается

от удара, трения и даже от прикосновения острым предметом». Словом, растирать в ступке пестиком более двух граммов такого вещества — почти то же самое, что положить в костер неразорвавшийся снаряд и стоять рядом, ожидая, что будет дальше (к сожалению, и такие случаи бывают). Вещество X , как и многие другие взрывчатые вещества, опасно держать в сухом виде даже в склянках с притертой стеклянной пробкой, так как крупинка, попавшая в зазор между пробкой и горлышком, при открывании может привести к взрыву.

Если бы юный химик заранее прочитал о свойствах вещества X , он, скорее всего, отказался бы от его получения и тем более — от «изучения свойств». А если у него не было доступа к книгам, в которых это вещество достаточно подробно описано, то он вообще не должен был получать его.

В этой книге, конечно, не будет опытов с взрывчатыми, ядовитыми и прочими опасными веществами. Но даже работая с безобидным столовым уксусом, следует соблюдать аккуратность и осторожность. Место для опытов должно быть свободно от ненужных предметов. Под рукой должна быть тряпка, чтобы сразу убрать пролившуюся жидкость или просыпанное вещество. А закончив работу, надо оставить после себя идеальный порядок — это одно из основных правил работы в химической лаборатории. Вообще, химики — люди достаточно аккуратные и знают, что если сразу после окончания эксперимента не вымыть посуду, потом сделать это будет намного труднее. Для мытья химической посуды используются специальные кислотные или щелочные растворы, но если грязь отмывается легко, в ход идут обычные ершики, похожие на те, которыми пользуются в домашнем хозяйстве (рис. 2.28).

Заканчивая разговор о безопасности и аккуратности, уместно привести любопытную выдержку из системы штрафов, налагаемых на студентов за нарушение правил работы в лаборатории. Эти штрафы были введены самими студентами знаменитого германского университета в Гейдельберге еще в 1854 году (собранные деньги шли на покупку химической литературы). Вероятно, это был первый и единственный случай, когда студенты постановили штрафовать самих себя! Вот некоторые положения этого документа:

«Кто оставляет открытым газовый кран при негорящем газе, платит 12 крейцеров (около 10 долларов в современных ценах).

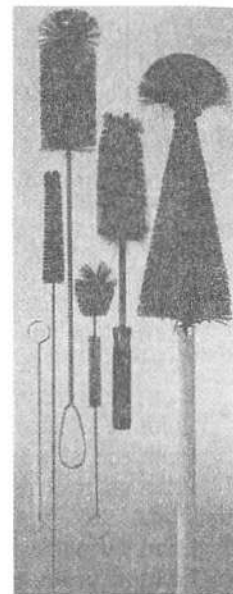


Рис. 2.28. Ершики для мытья химической посуды

Кто бросает в раковины осколки керамики, бумагу и другие предметы, препятствующие стоку воды, платит 3 крейцера.

Кто оставляет открытым кран для воды, когда она не используется, платит 3 крейцера.

Кто после использования лабораторного прибора не убирает его или его части на место, платит 6 крейцеров».

В заключение этого очень серьезного и важного раздела — немного юмора. В 1970 году директор Иркутского института органической химии академик Михаил Григорьевич Воронков был в командировке в Индии. Во время посещения университета в городе Джайпур (он расположен юго-западнее Дели) М. Г. Воронков обнаружил «Правила выживания в химической лаборатории». Вернувшись домой, он восстановил их по памяти и прислал в редакцию журнала «Химия и жизнь». После публикации эти правила были перепечатаны и повешены на дверях в сотнях химических лабораторий, что вызвало улыбку старожил и удивление новичков: некоторые из них все написанное восприняли вполне серьезно.

Вот эти правила:

«Если вы откупили что-либо — закупорьте.

Если в руках у вас жидкое — не разлейте, порошкообразное — не рассыпьте, газообразное — не выпустите наружу.

Если включили — выключите.

Если открыли — закройте.

Если разобрали — соберите.

Если вы не можете собрать — позовите на помощь умельца.

Если вы не разбирали — не вздумайте собирать.

Если вы одолжили что-либо — верните.

Если вы пользуетесь чем-либо — держите в чистоте и порядке.

Если вы привели что-либо в беспорядок — восстановите статус-кво.

Если вы сдвинули что-либо — верните на место.

Если вы хотите воспользоваться чем-либо, принадлежащим другому, попросите разрешения.

Если вы не знаете, как это действует, ради бога, не трогайте.

Если это вас не касается — не вмешивайтесь.

Если не знаете, как это делается, сразу спросите.

Если не можете что-либо понять — почесайте в затылке.

Если все же не поймете, то и не пытайтесь.

Если вы горите на работе, постарайтесь, чтобы у вас ничего не загоралось.

Если у вас что-либо взорвалось, проверьте, остались ли вы живы.

Если не усвоили этих правил, не входите в лабораторию».

Ну вот, теперь самое время заняться экспериментом. Помимо весов нам понадобятся самые простые вещи, например, обычная аптечная пипетка.

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Измеряем плотность металла

Один из самых великих ученых древности Архимед был родственником царя Гиерона, который правил в городе Сиракузы на острове Сицилия. Как-то царь заказал своему ювелиру изготовить ритуальный золотой венец, который использовался во время жертвоприношений. Чистое золото слишком мягкое, поэтому в золотые изделия для придания им твердости добавляют определенное количество меди или серебра. Гиерон, подозревая своего ювелира в обмане, поручил Архимеду доказать, что в корону подмешано больше меди, чем следовало. Архимед долго и безуспешно пытался решить эту задачу. Ведь никаких методов химического анализа в те времена еще не существовало. Единственный способ заключался в определении плотности металла, а для этого надо было взвесить корону (что не составляло труда) и определить ее объем — а вот это сделать для предмета неправильной формы не так-то просто! Предание гласит, что решение пришло неожиданно, во время приема ванны: ученый обратил внимание на то, что его тело выплеснуло из ванны часть воды на пол, а само стало весить намного меньше. Значит, об объеме веса тела (причем не обязательно Архимедова!) можно судить по тому, насколько оно потеряет в весе при погружении в воду. Архимед был настолько взволнован этим открытием, что выскочил из ванны и, забыв о том, что он голый, побежал по улицам Сиракуз с радостным криком: «Эврика!» (что в переводе означает «Нашел!»). Так это было или иначе — доподлинно неизвестно, несомненно лишь то, что именно Архимед открыл знаменитый закон, названный впоследствии его именем. После этого задача с короной была быстро решена: Архимед знал плотность чистого золота (по современным данным $19,3 \text{ г/см}^3$ — это один из самых тяжелых металлов) и меди ($8,96 \text{ г/см}^3$). Возможно, при изготовлении короны золото было сплавлено не с чистой медью, а с бронзой — сплавом меди и олова; Архимед, конечно, знал и плотность бронзы. Измерив плотность короны, Архимед вычислил долю золота в сплаве.

Попробуем повторить опыт Архимеда. Конечно, мы возьмем не золотую корону, а что-нибудь попроще, например, старую серебряную ложку. А действительно ли она серебряная? Естественно, если сохранилось клеймо, на котором указана проба серебра, то никаких изме-

рений не потребуется. А если оно не сохранилось или на нем ничего разобрать нельзя даже с помощью лупы? Тут-то и пригодится способ, придуманный Архимедом. Плотность — это отношение массы к объему. Массу ложки легко определить взвешиванием. А как найти ее объем? С помощью тонкой нитки привяжем ложку к одной из чашек весов и взвесим ее. Теперь повторим взвешивание, аккуратно опустив ложку в кастрюлю или большую банку с водой так, чтобы ложка не касалась стенок (подобные измерения плотности проводил еще Роберт Бойль, как это видно из рис. 1.1). В соответствии с законом Архимеда, ложка должна потерять в весе ровно столько, сколько весит вода, вытесненная ложкой. Плотность воды при комнатной температуре почти не отличается от $1,00 \text{ г/см}^3$, поэтому разность двух взвешиваний ложки — в воздухе и в воде — как раз и равна объему ложки в кубических сантиметрах. Пусть, например, ложка весила в воздухе 89 г, а в воде — 78 г. Разность дает нам объем ложки — 11 см^3 . Плотность ложки получается равной $89 \text{ г} : 11 \text{ см}^3 = 8,1 \text{ г/см}^3$ (с округлением первого знака после запятой из-за не очень точного взвешивания). Значит, ложка не серебряная (плотность серебра $10,50 \text{ г/см}^3$), а скорее всего — стальная. Таким же способом можно отличить и многие другие металлы, например, свинец (плотность $11,3 \text{ см}^3$) от олова (плотность $7,29 \text{ см}^3$).

Если у кого-нибудь есть дома школьная медаль — «золотая» или «серебряная», можете попробовать таким же способом измерить ее плотность. После этого станет понятно, почему слова, обозначающие достоинства медали, взяты здесь в кавычки. Если таких «сувениров» не отыщется, вот результаты измерений автора.

Медаль № 1. «Золотая» медаль, выданная в 1962 году. Диаметр — 40 мм. На одной стороне — надпись «РСФСР» и соответствующий герб (сейчас уже мало кто помнит, в каком порядке в этой аббревиатуре следуют слова «социалистическая» и «советская»); на другой стороне изображена книга в лавровом венке и надпись «За отличные успехи в учении, труде и за примерное поведение» (ее острословы быстро переименовали: «За тихие успехи и громкое поведение»). Масса медали (взвешивание проводилось в домашних условиях на простых аптекарских весах, которые подвешиваются за колечко на гвоздик) равна 26,46 г в воздухе и 23,48 г — в воде. Отсюда объем медали — $2,98 \text{ см}^3$, а плотность — $2,46 \text{ г} / 2,98 \text{ см}^3 = 8,26 \text{ г/см}^3 \approx 8,3 \text{ г/см}^3$. Полученное значение очень близко к плотности меди — $8,96 \text{ г/см}^3$. Напомним, что золото более чем вдвое тяжелее. Значит, медаль сделана из меди (или медного сплава, например, из латуни или бронзы — сплавов меди с цинком и оловом) и лишь позолочена с поверхности. Как сказали знающие люди, до 1960 года школьные медали действительно были золотыми, 375-й пробы, т. е. золота в них было 37,5%; теперь же «золотые» медали делают из томпака (это сплав меди с цинком, близкий к латуни, но с меньшим содержанием цинка) и только снаружи покрывают позолотой.

Медаль № 2. «Серебряная» медаль, выданная в 1968 году. Внешне она отличается от предыдущей только цветом. Масса — 24,96 г в воздухе и 22,06 г в воде, объем — $2,90 \text{ см}^3$, плотность — $8,61 \approx 8,6 \text{ г/см}^3$. Видимо, это тоже медный сплав; такую плотность имеет, например, сплав, очень близкий к мельхиору: 75 % меди, 20 % никеля и 5 % цинка, а также бронза состава 67 % меди, 33 % олова. А довольно сильное потемнение медали за несколько десятков лет говорит о том, что она, скорее всего, посеребрена (серебро темнеет на воздухе, если в нем есть хотя бы малейшие следы сероводорода, который может выделяться из резины, при варке яиц и т. п.). О серебряном покрытии непосредственно свидетельствует и проба, применяемая ювелирами. Когда на очищенную боковую поверхность медали капнули раствором дихромата калия («хромпика») в серной кислоте, под каплей сразу же появилось характерное красное пятно (легко потом счищаемое) — осадок дихромата серебра красного цвета.

Медаль № 3. «Серебряная» медаль, выданная в 1998 году. Размер у нее такой же, но рисунок другой: на одной стороне — силуэт женщины в лучах солнца, на другой — герб Российской Федерации на символической «сургучной» печати и две надписи: «Россия» и «За особые успехи в учении». Ну а каковы «особые успехи» в составе сплава? Масса медали — 26,50 г в воздухе, 23,50 г в воде, объем — $3,00 \text{ см}^3$, плотность — $8,83 \approx 8,8 \text{ г/см}^3$. Видно, что за 30 лет медаль немного потяжелела, приблизившись по плотности к «золотой». Но она, конечно, не серебряная, во всяком случае, не из чистого серебра (напомним, что его плотность $10,5 \text{ г/см}^3$). И даже не из «монетного сплава», содержащего 90 % серебра и 10 % меди (его плотность $10,3 \text{ г/см}^3$). Плотность $8,8 \text{ г/см}^3$ имеют, например, сплавы 65 % меди, 18 % никеля и 17 % цинка, или 90 % меди и 10 % олова (бронза), или 96 % меди и 5 % марганца, а также некоторые другие. Проба с тем же раствором не дала с первой попытки положительного результата, только после зачистки небольшого участка на ребре медали на нем под действием реактива появилось красное пятно. Видимо, современные медали после серебрения покрывают каким-то защитным слоем — недаром они не темнеют со временем!

В заключение — краткие сведения о пробах, которые ставятся на изделиях из драгоценных металлов: золота, серебра, платины, палладия. Иногда, чтобы разглядеть пробу на старом изделии, нужно увеличительное стекло. Проба указывает содержание в сплаве драгметалла. Пробы бывают разные. Так, старая российская золотниковая проба, введенная указом Петра в 1700 году, обозначала количество золотников чистого металла в одном фунте сплава. Современная метрическая проба (в нашей стране она принята в 1926 году) показывает массу драгметалла в граммах в 1000 г сплава. Поэтому, например, старой пробе 84 соответствует современная $(84 : 96) \cdot 1000 = 875$. Например, с 1886 года проба российских монет достоинством 1 рубль, 50 и 25 копеек была

равна $86 \cdot 2/5$ (что соответствует современной 900-й пробе), а проба монет достоинством 20, 15, 10 копеек и маленьких серебряных «пятак-ков» массой всего 0,9 г, которые чеканились с 1867 по 1915 год (в отличие от громадных медных пятаков массой 16,38 г), была равна 48 (по современному — 500). Советские рубли и полтинники имели 900-ю пробу, а более мелкие серебряные монеты 1921–1931 годов содержали только 50 % серебра (500-я проба). Современные серебряные изделия могут иметь пробу 960, 925 (так называемое «стерлинговое» серебро — название происходит от серебряной английской монеты, которая чеканилась в XII–XV веках; 240 таких монет по весу составляли «фунт стерлингов»), 916, 875, 800 и 750.

На золотых украшениях часто стоит 583-я проба. Это означает, что сплав содержит 58,3 % золота. Сейчас часто можно встретить на золотых изделиях 585-ю пробу. Это не значит, что золота в них больше. Проба 583 — это пересчет на метрическую старую 56-й пробы: $(56 : 96) \cdot 1000 = 583,3$. Допустимое отклонение в содержании драгметалла укладывается в эту разницу, поэтому пробы 583-я и 585-я — это фактически одно и то же.

В некоторых странах (Англия, Швейцария) до сих пор используют каратную пробу, по которой чистое золото имеет пробу 24 карата; таким образом, пробе «14 карат» соответствует метрическая 583-я проба.

Для приблизительного определения пробы используют химический метод. След, оставленный изделием на пробирном камне (черный камень с отшлифованной матовой поверхностью), обрабатывают специальными растворами. Так, концентрированная 72%-ная азотная кислота полностью растворяет след от золотого сплава, если его проба меньше 333-й. Если штрих окрасился в коричневый цвет, проба золота — от 333-й до 500-й, а если изменений не было — больше 500-й. Коричневый след — это мелкоизмельченное золото, оставшееся после растворения других металлов (меди, серебра) в сплаве. Используя смесь азотной и соляной кислот, можно быстро определить приблизительное содержание золота в сплавах с пробой от 160-й до 1000-й (чистое золото). Для более точного определения пробы цвет штриха от изделия сравнивают с цветом штрихов от эталонных сплавов известной пробы. Таких сплавов (в виде специальных игл) существует множество, и отличаются они содержанием не только золота, но также меди и серебра. Дело в том, что даже при одной и той же пробе золотые изделия могут сильно отличаться по цвету. Это зависит от вида и содержания металла, с которым сплавлено золото (такой металл называют лигатурным). Так, серебро, сплавляемое с золотом в разных соотношениях, придает сплаву белый, желтый или даже зеленый оттенок. Медь делает золото красноватым, сплав, содержащий 9 % серебра и 32,5 % меди, имеет оранжевый цвет, а сплав с 20 % палладия дает так называемое «белое золото».

Реже применяются другие лигатуры. Например, кадмий придает золоту зеленоватый оттенок, цинк — белый, никель — бледно-желтый.

Измеряем диаметр атома

«Неужели это возможно в домашних условиях?» — спросите вы. Вполне возможно, только для того, чтобы рассчитать диаметр атома, надо кое-что знать. Например, что атомы многих металлов можно представить в виде маленьких, плотно упакованных шариков. В таком случае атомы-шарики занимают 74 % всего пространства, а остальные 26 % приходятся на пустоты между ними. Еще надо знать, как связан объем шара (V) с его диаметром (d) — эту формулу можно найти в учебнике или в справочнике по математике: $V = \pi d^3/6$, где $\pi = 3,14$. Наконец, надо знать очень важную для химии величину, которая называется постоянной Авогадро (N_A) — в честь итальянского ученого XIX века Амедео Авогадро (1776–1856). Эта константа показывает, сколько частиц — атомов, ионов или молекул содержится в одном моле вещества. Моль — очень удобная для химиков единица измерения, так как в одном моле любого вещества содержится одинаковое число частиц. Например, 1 моль воды (18 г), или 1 моль сахара (342 г), или 1 моль кислорода (32 г) содержит одинаковое число молекул, равное $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$. Ровно столько же атомов содержит 1 моль алюминия (27 г), или 1 моль меди (64 г), или 1 моль серебра (108 г). А 1 моль поваренной соли (58,5 г) содержит по $6,02 \cdot 10^{23}$ положительно заряженных ионов (катионов) натрия и отрицательно заряженных ионов (анионов) хлора. Понятие «моль» (раньше его называли «грамм-молекулой», а еще раньше, во времена Менделеева, — «химическим паем») удобно тем, что им можно пользоваться и не зная численного значения постоянной Авогадро, так как вещества реагируют друг с другом в соответствии с числом молей в них.

О том, как ученые определили это огромное число, мы еще поговорим, а пока вернемся к нашей ложке. Итак, пусть в предыдущем опыте нам повезло, и ложка оказалась из серебра высокой пробы с плотностью 10,5 г/см³. Теперь у нас есть все данные, чтобы определить размер «серебряного атома». В 1 см³ серебра содержится $10,5 \text{ г} : 108 \text{ г/моль} = 0,097$ моль, или $0,097 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 5,84 \cdot 10^{22}$ атомов серебра. Если не считать пустоты между атомами, то на долю самих атомов-шариков придется не 1 см³, а немного меньше — 0,74 см³. Значит, объем одного атома равен $0,74 \text{ см}^3 / 5,84 \cdot 10^{22} = 1,27 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3$. Осталось только по приведенной выше формуле рассчитать диаметр атома серебра. Он получится очень маленьким: $d \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, или 0,3 нм (нанометр — одна миллиардная часть метра — самая подходящая единица для измерения таких малых величин).

Все атомы имеют очень малые размеры. Цепочка из миллиона атомов серебра, плотно уложенных друг к другу, протянется всего на 0,3 мм. Для сравнения: если уложить в цепочку миллион маковых зер-

нышек диаметром 1 мм, то такая цепочка протянется на 1 км! Из-за малого размера атомов их невозможно увидеть даже в самый сильный оптический микроскоп. Зато ученые придумали другие приборы, позволяющие получать изображения отдельных атомов.

Примерно такие же размеры, как атом серебра, имеют небольшие молекулы — кислорода, азота, метана, воды; все они содержат несколько небольших атомов. Бывают молекулы, которые значительно больше: они содержат много атомов или атомы больших размеров (например, атомы иода). В следующем разделе мы познакомимся с одним из методов измерения размера молекул. А сейчас — некоторые интересные и полезные сведения об Авогадро и постоянной, названной его именем.

Итальянский химик Авогадро прожил очень долгую по меркам того времени жизнь. Он родился в 1776 году в Турине, в Северной Италии. Получил юридическое образование и в возрасте 20 лет был назначен секретарем префектуры. Это были годы, когда в Италии гремела слава молодого французского полководца Наполеона. Однако Авогадро не привлекала ни военная, ни юридическая карьера. Со временем он стал все больше интересоваться естественными науками — физикой и химией, которые изучил самостоятельно. В 1809 году он начал преподавать физику в городе Верчелли, недалеко от Турина, а в 1820 году был назначен профессором математической физики в Туринском университете. В университете Авогадро проработал до преклонного возраста и покинул его лишь в 1850 году. Умер Авогадро в Турине в 1856 году. О его личной жизни сохранилось очень мало сведений. Прославили же Авогадро две статьи, опубликованные в 1811 и 1814 годах. Вначале они не вызвали интереса и были почти забыты. Сегодня же имя Авогадро знают школьники всех стран, если они изучают физику и химию.

Закон Авогадро звучит очень просто: «Равные объемы газообразных веществ при одинаковом давлении и температуре содержат одно и то же число молекул, так что плотность различных газов служит мерой массы их молекул». Из этого закона следовало, что, измеряя плотность разных газов, можно определять относительные массы, а также состав молекул газообразных соединений. Благодарные потомки назвали число частиц в одном моле вещества постоянной Авогадро, которую обозначили как N_A . Кстати, само слово «моль» — итальянского, вернее, латинского происхождения. В переводе с латыни *moles* означает «тяжесть, глыба, громада». На современной двухцентовой итальянской монете изображен купол со шпилем «Антонеллиевой громады» (*mole Antonelliana*), самой высокой конструкции в Италии (167,5 м); интересно, что это сооружение считается символом Турина, родного города Авогадро. Соответственно, *molecula* (с уменьшительным суффиксом *-cula*) — «маленькая масса», как корпускула — «маленькое тело» (так во времена Ломоносова называли молекулы). Помимо указанного значения слово *moles* на латыни означает «дамба, насыпь, укрепленная

большими камнями» (вспомним слово «мол» — сооружение в гаванях для защиты судов от морских волн). Тот же корень в латинском слове *mola* — «жернов» («громадный камень») и в глаголе *molo* — «молоть». Отсюда и молот с молотком, и моляр — зуб, размалывающий твердую пищу, как жернов на мельнице, и даже вредная моль — насекомое, измельчающее, стирающее вещи в муку.

Постоянная Авогадро — огромное число, с трудом поддающееся воображению; оно, к примеру, в 4 миллиарда раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца, выраженное в миллиметрах! Это означает, что атомы и молекулы очень маленькие — раз их так много помещается в сравнительно небольшом количестве вещества. Еще в XIX веке ученым было очевидно, что, поскольку атомы и молекулы очень маленькие и никто их еще не видел, постоянная Авогадро должна быть очень велика. Постепенно физики научились определять размеры молекул и значение постоянной Авогадро — сначала очень грубо, приблизительно, затем все точнее. Прежде всего им было понятно, что обе величины связаны между собой: чем меньше окажутся атомы и молекулы, тем больше получится постоянная Авогадро.

Преподаватели и популяризаторы химии придумали множество эффектных способов, чтобы наглядно показать грандиозность этого числа. Вот некоторые из них.

В пустыне Сахара содержится менее трех молей самых мелких песчинок.

Если объем футбольного мяча увеличить в N_A раз, то в таком мяче поместится Земной шар. Если же в N_A раз увеличить диаметр мяча, то в нем поместится самая большая галактика, содержащая сотни миллиардов звезд. Кстати, число звезд во Вселенной примерно равно постоянной Авогадро.

Если взять 100 г красителя, пометить каким-либо способом все его молекулы, вылить этот краситель в море и подождать, пока он равномерно распределится по всем морям и океанам до самого дна, то, зачерпнув в любом месте Земного шара стакан воды, мы обязательно обнаружим в нем не один десяток «меченых» молекул.

При каждом вдохе человека в его легкие попадает хотя бы несколько молекул кислорода и азота, которые содержались в последнем выдохе Юлия Цезаря (44 год до н. э.).

Если взять моль долларовых бумажек, они покроют все материки двухкилометровым плотным слоем.

В древности на Востоке придумали такую легенду. В сказочном царстве находится огромная гранитная скала. Представим себе, что она имеет форму куба с ребром, равным 1 км. Раз в столетие на скалу садится ворон и чистит об нее клюв. Если предположить, что при этом скала стирается на 0,0001 г, то число лет, за которое от скалы не останется ни одной песчинки, меньше, чем постоянная Авогадро.

Измеряем длину молекулы

Понятно, что мы не сможем непосредственно измерить такую малую частичку вещества. Мы проведем опыт, из которого путем простых расчетов можно определить размер молекул. Вы, конечно, видели на поверхности воды тонкие цветные пленки, образуемые нефтепродуктами (смазочные масла, дизельное топливо и т. п.). Цвет тонких пленок возникает из-за наложения световых лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки — такое явление называется интерференцией света. По той же причине переливаются всеми цветами радуги мыльные пузыри.

Явление интерференции вы будете изучать на уроках физики. А сейчас нас интересует толщина пленки — вы никогда не задумывались, насколько она тонкая? Определить толщину пленки очень просто: надо ее объем разделить на площадь поверхности. Еще древние мореплаватели заметили, что если на поверхность воды вылить растительное масло, то оно растечется очень большим пятном (тогда же появилось довольно странное мнение о том, что таким способом можно «утихомирить» море во время бури). Вероятно, впервые измерил площадь масляного пятна на воде выдающийся американский ученый и дипломат Бенджамин Франклин (1706–1790), изображение которого красуется на стодолларовой купюре. Его самое знаменитое изобретение — громоотвод (вернее, молниеотвод). В 1774 году Франклин поехал в Европу, чтобы уладить очередной конфликт между Англией и США. В свободное от переговоров время он экспериментировал с масляными пленками на поверхности воды. К его удивлению, одна ложка растительного масла растеклась по всей поверхности небольшого пруда. Если же налить на воду не растительное, а вязкое машинное масло, пятно от него будет не таким большим: одна капля дает круг диаметром около 20 см. Площадь такой пленки равна примерно 300 см^2 , объем одной капли — около $0,03 \text{ см}^3$. Следовательно, толщина пленки равна $0,03 \text{ см}^3 / 300 \text{ см}^2 = 0,0001 \text{ см} = 0,001 \text{ мм} = 1 \text{ мкм}$. Тысячная доля миллиметра — это очень малая величина, не во всякий микроскоп разглядишь частичку такого размера.

Но есть ли у нас гарантия, что молекулы машинного масла растеклись по воде в один слой? Ведь только в этом случае толщина пленки будет соответствовать размеру молекул.

Такой гарантии у нас нет, и вот почему. Молекулы, входящие в состав машинного масла, называют гидрофобными (в переводе с греческого «гидрофобные» — «боящиеся воды»). Они довольно хорошо «сцепляются» между собой, очень неохотно — с молекулами воды. Если вещество, подобное машинному маслу, налить на поверхность воды, оно образует на ней довольно толстую (по молекулярным меркам) пленку, состоящую из сотен и даже тысяч молекулярных слоев. Помимо того, что подобные

расчеты любопытны и сами по себе, они имеют большое практическое значение. Например, по сей день не удается избежать аварий огромных танкеров, перевозящих нефть за тысячи километров от места ее добычи. В результате такой аварии в море может вылиться огромное количество нефти, что губительно скажется на живых организмах. Нефть более вязкая по сравнению с машинным маслом, поэтому ее пленка на водной поверхности может оказаться несколько толще. Так, в одной из аварий вылилось 120 000 тонн нефти, которая покрыла площадь 500 км^2 . Как показывает несложный расчет, средняя толщина такой пленки равна 200 мкм. Толщина пленки зависит как от сорта нефти, так и от температуры воды: в холодных морях, где нефть делается более густой, пленка толще, в теплых морях, где нефть становится менее вязкой, — тоньше. Но в любом случае авария большого танкера, когда в море попадают десятки тысяч тонн нефти, — это катастрофа. Ведь если вся пролитая нефть растечется тонким слоем, то образуется пятно огромной площади, и ликвидировать такую пленку чрезвычайно трудно.

А можно ли заставить вещество растекаться по воде так, чтобы образовался всего один слой молекул (такая пленка называется мономолекулярной)? Оказывается, это возможно, только вместо машинного масла или нефти надо взять другое вещество. Молекулы такого вещества должны на одном конце иметь так называемую гидрофильную (т. е. «водолюбивую») группу атомов, а на другом конце — гидрофобную. Что будет, если вещество, состоящее из таких молекул, поместить на поверхность воды? Гидрофильная часть молекул, стремясь раствориться в воде, будет тянуть молекулу в воду, тогда как гидрофобная часть, которая воды «боится», будет упорно избегать контакта с водой. В результате такого взаимного «непонимания» молекулы (если их слегка «поджать» сбоку с помощью планочки) выстроятся на поверхности воды так, как показано на рис. 3.1: их гидрофильные концы утоплены в воду, а гидрофобные торчат наружу.

Вещества, которые ведут себя таким образом, называют поверхностно-активными. К ним относятся, например, мыло и другие моющие средства; олеиновая кислота, входящая в состав подсолнечного масла; пальмитиновый спирт, который входит в состав пальмового масла и китового жира. Растекание таких веществ по поверхности воды дает значительно более тонкие пленки, чем машинное масло. Это явление было известно давно, подобные опыты проводили еще в XVIII веке. Но только в конце XIX — начале XX столетия в результате экспериментов, проведенных английским физиком Джоном Уильямом Рэлеем (1842–1919), немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рент-

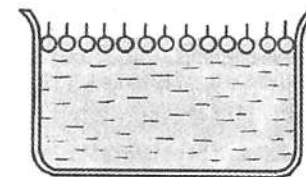


Рис. 3.1. Так ориентируются на границе вода-воздух молекулы поверхностно-активных веществ, образуя «частокон Ленгмюра» — по имени американского химика и физика Ирвинга Ленгмюра (1881–1957), который в 1916 году создал теорию строения таких слоев на поверхности жидкостей

геном (1845–1923) и рядом других ученых, было показано, что толщина пленки может достигать таких малых размеров, которые сопоставимы с размерами отдельных молекул.

В одном из таких опытов английский химик Нейл Кенсингтон Адам (1891–1973) наблюдал в 1922 году образование на поверхности воды пленок пальмитинового спирта. Оказалось, что очень маленькое количество пальмитинового спирта — всего 0,052 мг дает пленку площадью 193 см². Так как плотность спирта равна 0,818 г/см³, то объем пленки составляет 6,36·10⁻⁵ см³, при толщине всего лишь 6,36·10⁻⁵ см³ / 193 см² = 3,3·10⁻⁷ см, или 3,3 нм. Значит, молекула пальмитинового спирта по длине примерно в 10 раз больше молекул кислорода.

Размеры порядка 1 нм имеют большинство молекул и ионов знакомых нам веществ. Так, диаметр молекул водорода равен примерно 0,2 нм, иода — 0,5 нм, этилового спирта — 0,4 нм; радиус ионов алюминия — 0,06 нм, натрия — 0,10 нм, калия — 0,13 нм, хлора — 0,18 нм, иода — 0,22 нм. Но есть среди молекул и гиганты, размеры которых, по молекулярным меркам, поистине астрономические. Так, в ядрах клеток высших животных и растений находятся молекулы наследственности — дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК). Их длина может превышать 2 000 000 нм, т. е. 2 мм!

В заключение этого раздела — небольшой рассказ о том, какой остроумный (хотя и не самый точный) метод использовал в 1908 году французский ученый Жан Перрен, чтобы «взвесить» молекулы. Как известно, плотность воздуха уменьшается с высотой. Еще в начале XIX века французский ученый Пьер Лаплас вывел формулу, позволяющую рассчитать давление на разных высотах. В соответствии с этой формулой атмосферное давление падает вдвое при подъеме на каждые 6 км. Это значение зависит, конечно, от силы земного притяжения, а также от массы молекул воздуха. Если бы воздух состоял не из азота и кислорода, а из очень легких молекул водорода (они в 16 раз легче молекул кислорода), то падение атмосферного давления вдвое наблюдалось бы на высоте не 6 км, а примерно в 16 раз больше, т. е. около 100 км. И наоборот, если бы молекулы были очень тяжелые, атмосфера была бы «прижата» к поверхности Земли и давление быстро падало бы с высотой.

Рассуждая таким образом, Перрен решил вместо молекул использовать крошечные шарики краски гуммигута, взвешенные в воде. Он постарался приготовить взвесь (эмульсию) с одинаковыми по размеру шариками — около 1 мкм в диаметре. Затем он поместил капельку эмульсии под микроскоп и, перемещая винт микроскопа по вертикали, считал число шариков гуммигута на разных высотах. Оказалось, что формула Лапласа вполне применима и к эмульсиям: при подъеме на каждые 6 мкм число шариков в поле зрения уменьшалось в два раза. Поскольку 6 км ровно в миллиард раз больше 6 мкм, Перрен сделал вывод, что во столько же раз молекулы кислорода и азота легче шариков гуммигута (а их массу уже можно определить экспериментально).

ХИМИКИ АНАЛИЗИРУЮТ



Что такое химический анализ и аналитическая химия

Чтобы повторить в лаборатории то, что давно «изобрела» природа, а потом воспроизвести этот синтез на химических предприятиях в промышленном масштабе, необходимо прежде всего знать, из каких элементов построены нужные нам вещества. Этим занимается качественный анализ. Такой анализ всегда считался одной из важнейших задач химии. Он начал интенсивно развиваться в конце XVIII века. С помощью методов качественного анализа французский химик Мишель Эжен Шеврёль (1786–1889) в начале XIX века выяснил, например, из каких элементов состоит дорогой синий краситель индиго, свиной жир и даже... кости динозавра.

Но мало узнать, какие элементы содержатся в веществе. Надо еще выяснить, в каких именно пропорциях они там находятся. Это — тоже задача аналитической химии, того ее раздела, который называется количественным анализом. В течение сотен лет разрабатывались (и продолжают разрабатываться до сих пор) методы качественного и количественного анализа. В результате анализа вещества химик определяет, из чего оно состоит, какие в нем содержатся компоненты, какими атомами и в каких пропорциях они представлены. Современные приборы позволяют найти один-единственный атом примеси среди миллиардов атомов других элементов. Представьте себе несколько миллиардов шариков диаметром 1 см (для их перевозки потребуется целый железнодорожный состав). И среди них нужно обнаружить один шарик, отличающийся от других. Это намного труднее, чем найти иголку в стоге сена.

Анализы проводятся в научных институтах — например, когда требуется узнать состав вновь синтезированного соединения или вещества, выделенного из растительного сырья, а может быть, и вещества лунного грунта, доставленного на Землю космическим аппаратом! Вообще так называемая «космическая аналитика» — сравнительно новая, быстро развивающаяся область аналитической химии. С ее помощью удалось узнать много важного о Луне, планетах, метеоритах, кометах,

межпланетном пространстве. С помощью автоматических аналитических приборов произведен анализ атмосферы Венеры, грунтовых пород на Марсе (например, было установлено, что на глубине 30–60 см там находятся большие скопления льда). Обнаружены молекулы органических веществ в космическом пространстве, причем довольно сложные, на основании чего была разработана одна из теорий возникновения жизни на Земле — космическая. Теперь ученые заняты интересной аналитической задачей — попыткой обнаружить на Марсе аминокислоты и нуклеиновые кислоты, которые могли бы свидетельствовать о наличии жизни на этой планете. Ежедневные анализы совершенно необходимы и для жизнеобеспечения обитателей космических кораблей и космических станций длительного функционирования.

Но не только космосом жив человек. Чтобы контролировать состав самых разных изделий, от быстрорежущих сталей до красителей, ежедневно огромное количество анализов проводится в заводских лабораториях. Анализы делают геологи в полевых условиях, чтобы узнать, какие минералы и какие полезные ископаемые им встретились. Таможенники должны проводить анализы на взрывчатые и наркотические вещества, а военные — на присутствие в воздухе боевых отравляющих веществ. Медики-токсикологи должны определять предельно допустимые концентрации вредных веществ в окружающей среде. Еще больше забот в этой сфере у медиков-гигиенистов; кстати, они едва ли не главные при установлении предельно допустимых концентраций вредных веществ. Химики-фармацевты должны анализировать лекарственные препараты, многие из которых представляют собой смесь очень сложных по составу химических соединений. Агрохимики анализируют состояние почвы — ее кислотность, наличие полезных веществ (прежде всего — азота, фосфора и калия). Специальные службы анализируют воду в реках, озерах, на водопроводных станциях, выявляя присутствие вредных для человека и животных веществ. Другие службы проводят анализ воздуха в домах, производственных помещениях, в глубоких шахтах, чтобы выявить, нет ли в воздухе вредных и взрывчатых веществ, например, метана, а если есть, то не опасно ли его содержание (метан взрывается — на кухне или в шахте — если его в воздухе накапливается больше 5 %).

В городах анализируют чистоту воздуха. Например, в Петербурге в здании Института метрологии им. Д. И. Менделеева (здесь раньше была Палата мер и весов, которой многие годы заведовал Д. И. Менделеев) установлено большое световое табло. На нем — привычные для жителей многих городов сведения о состоянии атмосферы на данный момент — температура, атмосферное давление и влажность воздуха. Но есть на этом табло и необычные сведения — о содержании в городском воздухе вред-

ных веществ: угарного и сернистого газов, оксидов азота, озона, аммиака. Эти сведения передаются цветом: зеленым, если содержание данного вещества в воздухе ниже предельно допустимого, желтым — если превышает норму не более чем в три раза, красным — при большем превышении. Конечно, само табло ничего не анализирует — сведения передаются из специальной лаборатории. Проводятся в городах и анализы автомобильных выхлопов на содержание в них вредных газов — угарного и несгоревших паров бензина (так называемый анализ CO — CH).

Многие анализы необходимо проводить без участия человека — с помощью автоматических приборов. Автоматические станции непрерывно проводят анализ атмосферы для контроля состояния окружающей среды, чтобы выявить в воздухе различные вредные вещества (озон, оксиды азота и др.) и измерить их концентрацию. С помощью автоматических анализаторов на межпланетных станциях мы узнали состав атмосферы Венеры, Марса, некоторых других планет, и даже состав марсианского грунта.

Аналитические методы получили широкое распространение и в криминалистике. С их помощью было, например, установлено повышенное содержание мышьяка в волосах Наполеона (правда, отсюда еще не следует, что пленного императора отравили: мышьяк вполне мог содержаться в зеленой краске, которую применяли в те годы при изготовлении обоев).

Теперь не покажется удивительным, что за работы, связанные с анализом веществ, 13 ученых получили высшие научные награды — Нобелевские премии.

Первые анализы были проведены сравнительно недавно — каких-то триста лет назад. С тех пор и методика анализов, и аналитические приборы сильно изменились, часто до неузнаваемости. Но до сих пор химики работают практически с той же посудой, с какой работали их деды и прадеды. На рисунках к главе 2 показаны некоторые современные приборы, необходимые химикам в каждодневной работе.

Измерение плотности короны, проведенное Архимедом, — первый в истории пример использования аналитического метода в криминалистике — науке о приемах и средствах раскрытия преступлений. Далеко не всегда для анализа сплава можно применить метод Архимеда, основанный на измерении плотности. Особенно в тех случаях, когда дело касается анализа различных смесей или сложных химических соединений. Здесь на помощь приходят химические методы анализа. Уже в древности люди накопили определенные знания о разнообразных химических превращениях, хотя, конечно, они не понимали сути происходящих явлений. Такие знания называются эмпирическими (по-гречески «эмпейриа» — «опыт»). Так, люди всегда знали, что если положить в костер полено, то оно загорится и будет поддерживать огонь, а если положить камень, то он гореть не будет. При этом они

не имели ни малейшего представления о том, из чего «сделаны» дерево и камень, что такое огонь и какие превращения происходят при горении. Это — пример эмпирических знаний. Таких знаний постепенно накапливалось все больше, их передавали от поколения к поколению — в виде общеизвестных (а порой — и секретных, тщательно охраняемых от посторонних глаз) сведений. В Ветхом Завете в Книге пророка Захарии читаем: «И пронесу я третью часть сквозь огонь и облагорожу ее, как серебро облагораживается, и очищу ее, как золото очищается». Значит, простейшие приемы выплавки и очистки благородных металлов были известны тысячи лет назад. Много полезных практических знаний в области анализа веществ накопили алхимики, работавшие в средневековье (см. рис. 1.2). С появлением «настоящей» химии методы анализа стали развиваться особенно быстро. Вначале основное внимание уделялось, как и в древности, обнаружению и анализу драгоценных металлов. Эта отрасль тогда называлась «пробирной химией» (от слова «пробовать», отсюда и «проба» — клеймо, которое ставят на золотые и серебряные изделия). Затем начали анализировать природные минеральные воды, различные руды, промышленную продукцию. Так появилась и стала быстро развиваться новая область химии — аналитическая химия. Вначале для анализа использовали в основном «мокрые» методы: вещество растворяли в кислотах или щелочах, а затем анализировали полученные растворы. Это были трудоемкие операции, требовавшие большой затраты времени.

Тем не менее, химики-аналитики требовались в самых разных областях. Еще в 1844 году немецкий химик Карл Фрезениус (1818–1897), разработавший один из лучших для того времени методов анализа металлов, написал статью о роли аналитика в судебных решениях, о том, что юрист может ожидать от аналитика. В роли судебных экспертов выступали многие известные химики, в числе которых был и Дмитрий Иванович Менделеев. Особенно часто от химиков требовалось установить, было ли причиной смерти отравление, и если да, то чем именно оно было вызвано. В течение сотен лет самым «ходовым» и относительно доступным ядом был мышьяк — в виде его соединений. В средневековье мышьяк считали «королем ядов». Врачебной славе мышьяка во многом способствовали и писатели. Агата Кристи, например, в своих бесчисленных детективах травила героев, как правило, мышьяком. Знали об этом яде и далеко за пределами Европы. Полагают, что впервые упомянул о мышьяке как о яде основатель арабской алхимии Джабир ибн Хайян (Гебер), живший в VIII–IX веках. В китайской классической литературе, как и в европейской, описаны случаи нашумевших убийств посредством мышьяка.

Многочисленные факты случайного и умышленного отравления мышьяком побудили ученых разработать методы обнаружения отравы.

Одну из самых чувствительных реакций на мышьяк открыл в 1836 году английский химик Джеймс Марш (1794–1846), который работал в Королевской Военной академии и был ассистентом знаменитого физика Майкла Фарадея (1791–1867). Свою реакцию Марш разработал после неудачного выступления в суде в качестве эксперта по делу об отравлении мышьяком. До этого мышьяк обнаруживали методом Фрезениуса — по образованию характерного осадка с сероводородом. Но чтобы увидеть осадок, требовалось довольно много вещества. А если мышьяка очень мало?

Марш использовал простую химическую реакцию, в которой мышьяк реагировал с водородом и превращался в летучий мышьяковистый водород — арсин (на латыни мышьяк — *Arsenicum*). Газообразные продукты реакции, содержащие арсин, пропускали через стеклянную трубку, конец которой сильно нагревали горелкой. При этом арсин разлагался, и мышьяк оседал в виде очень тонкого блестящего металлического зеркала. Этот простой прибор позволял обнаруживать мышьяк в количестве до одной миллионной доли грамма!

Уже через четыре года методика Марша была использована парижским врачом, испанцем по происхождению, Матео Хозе Бонавентура Орфила (1787–1853). Он участвовал в громком деле по обвинению некоей Мари Лафарж в убийстве мужа. Выйдя замуж по расчету, она вскоре обнаружила, что муж сам хотел поправить женитьбой свои финансовые дела. Расплата наступила быстро: Мари в несколько приемов купила в аптеке мышьяк якобы для уничтожения крыс, и вскоре все было кончено. Несмотря на подозрения родственников несчастного, врач не смог вовремя распознать симптомы отравления. Но когда за дело взялся Орфила, успевший в совершенстве овладеть методом Марша, все стало ясно: в каждом исследуемом образце он обнаружил высокие концентрации мышьяка. В 1840 году вдова была осуждена.

В наше время возможности аналитической химии стали поистине фантастическими. Экспертно-криминалистические лаборатории выполняют огромное число исследований, и их заключения в значительной степени способствуют эффективному проведению следствия и судебного разбирательства. Но, конечно, химики-аналитики работают не только судебными экспертами. На результаты химического анализа опираются врачи, когда ставят диагноз больному. Помимо общего клинического анализа у человека могут определять, например, концентрацию глюкозы в крови. Раньше для такого анализа «на сахар» требовалось много времени. (И много крови!) Теперь больной сахарным диабетом может проделать анализ у себя дома, и для этого требуется всего одна маленькая капелька крови.

Еще одно важное применение аналитической химии — определение вредных веществ в окружающей среде: в выбросах промышленных

предприятий, в воздухе жилых и производственных помещений, в питьевой и речной воде, в лекарствах, продуктах питания т. д.

Использование различных химических, физических, биологических методов позволило не только значительно увеличить точность анализа и сократить время на его проведение, но и одновременно определить десятки различных компонентов в очень маленьком по размеру образце. Разработаны и неразрушающие методы анализа, когда образец не требуется ни растворять, ни даже отщеплять от него маленький кусочек, и он остается в неизменном виде. Особо чувствительные методы важны при анализе и лунного грунта, и краски со старинной картины, и микропримесей в питьевой воде. Например, в лаборатории лазерной диагностики Московского университета разработан сверхчувствительный метод анализа, позволяющий обнаружить в 1 мл водного раствора несколько пикограммов (т. е. триллионных долей грамма!) некоторых химических элементов. Такие сверхчувствительные методы анализа успешно используются и в космических исследованиях, о чем мы уже говорили ранее.

Анализ на глюкозу — за несколько секунд

Среди многочисленных болезней человека есть такие, о которых знали еще тысячи лет назад, но с которыми совершенно не умели бороться. К таким болезням относится и сахарный диабет. Сведения о нем идут из глубины веков — о нем знали еще древние греки. Греческий миф рассказывает, как Зевс наказал царя Тантала за его преступления. Тантал был низвергнут в царство мертвых — Аид и осужден на вечные «танталовы» муки. Он стоит в прозрачной воде, вечно томимый жаждой и голодом. Стоит ему наклониться, чтобы утолить жажду, как вода бесследно исчезает. То же происходит и с плодами, которые свисают с окружающих его деревьев: как только он протягивает руку, ветки с плодами поднимаются и Тантал не может до них дотянуться.

Не исключено, что основанием для рождения этого мифа послужили мучения больных сахарным диабетом. Еще в древние времена врачи обратили внимание на больных, страдавших сильнейшей жаждой, несмотря на обилие выпиваемой воды. Многие из них худели, хотя пищи было вдоволь. Считалось, что причина недуга — слишком быстрое прохождение через почки выпитой воды, поэтому болезнь называли диабетом (от греческого «диабайно» — «протекать»). В борьбе с этой болезнью врачи были совершенно бессильны. Лишь в первой половине XIX века французский химик Мишель Эжен Шеврёль выделил из мочи больных диабетом сахаристое вещество и доказал его идентичность виноградному сахару — глюкозе. Шеврёль знал толк в ана-

литической химии, так как в молодости прошел прекрасную школу химического анализа. (Среди химиков Шеврёль знаменит также тем, что прожил исключительно плодотворную и долгую жизнь: он родился за три года до штурма Бастилии, а умер через 103 года, простудившись при осмотре работ по постройке Эйфелевой башни. На своем столетнем юбилее, на который съехались химики со всей Европы, Шеврёль лихо отплясывал с молодой девушкой!)

После работ Шеврёля диабет стали называть также сахарной болезнью или сахарным мочеизнурением. Усиленное выделение мочи (в тяжелых случаях — до 18 литров в сутки!) приводило к обезвоживанию организма, что и вызывало ничем не утолимую жажду. Обнаружили и причину похудения больных. При нормальном обмене веществ основным источником энергии является глюкоза, и если это «топливо» не «сгорает» до углекислого газа и воды, выделяя энергию, человек фактически голодает, несмотря на усиленное питание. Таким образом, диабетики страдают не от отсутствия глюкозы, а из-за нарушения процессов ее усвоения в клетках организма. У больных диабетом глюкоза, вместо того чтобы поступать в клетки, как это ей положено, остается в крови.

Глюкоза образуется в организме человека из углеводов пищи, например, из крахмала, которым богаты картофель, хлеб и другие мучные продукты. Поэтому больным диабетом предписывалась строжайшая диета: они должны были отказаться от тех продуктов, которые содержат или из которых может образоваться сахар, и ограничиться в основном животной пищей, так как животные белки и жиры не могут служить материалом для образования сахара в организме. Соответствующая диета — это было все, что могли предложить врачи больному.

В XIX веке выяснили, что глюкоза не усваивается больными из-за неправильной работы поджелудочной железы. В 1869 году немецкий анатом Пауль Лангерганс (1847—1888) обнаружил в поджелудочной железе группы клеток, которые равномерно рассеяны по всей железе в виде островков. Их так и назвали — островки Лангерганса. В 1901 году русский врач и биолог Леонид Васильевич Соболев (1876—1919) доказал, что островки Лангерганса играют роль желез внутренней секреции и важны для углеводного обмена. В 1916 году вырабатываемый в островках Лангерганса гормон получил название инсулина (на латыни *insula* — «остров»). Наконец в 1921 году преподаватель фармакологии Торонтского университета (Канада) Фредерик Бантинг (1891—1941) и его ассистент Чарлз Бест (1899—1978), работая в лаборатории профессора физиологии Джона Маклеода (1876—1935), выделили инсулин в чистом виде. 23 января 1922 года инъекция инсулина спасла первого безнадежного больного — это был 14-летний юноша, находившийся

в состоянии диабетической комы. С тех пор число спасенных исчисляется миллионами, а Бантинг и Маклеод в 1923 году были удостоены Нобелевской премии по физиологии и медицине. (Достоин упоминания, что Бантинг демонстративно разделил свою долю денежной премии с Бестом, которого несправедливо обошли, а Маклеод, не принимавший участия в экспериментах, счел необходимым отдать половину своей суммы одному из сотрудников, который усовершенствовал метод выделения инсулина.)

Недостаток инсулина в организме приводит к нарушению не только углеводного, но и жирового и белкового обмена. При этом человек часто быстро худеет, даже если хорошо питается. Кроме того, нарушение жирового обмена приводит к повышению содержания ацетона в крови, который отравляет организм. В тяжелых случаях в выдыхаемом больным воздухе можно даже почувствовать запах ацетона. Один американский врач рассказал такую историю, которая произошла с ним много лет назад в баре. Он заметил, что у соседа по стойке подозрительно быстро опадает пена в кружке с пивом. Отсюда он сделал вывод о том, что у соседа — нелеченый диабет, и в выдыхаемом им воздухе содержание ацетона достаточно велико, чтобы вызвать разрушение пены. Действительно, уже очень малые количества ацетона моментально разрушают пивную пену.

Долгое время от диабета не было спасения даже самым обеспеченным людям. Этой болезнью страдал, например, великий русский поэт Ф. И. Шаляпин (1873—1938). В настоящее время диабетом в той или иной степени болен почти каждый двадцатый житель промышленно развитых стран, причем число больных с каждым годом увеличивается. В нашей стране сейчас несколько миллионов больных диабетом.

Современная медицина значительно облегчила жизнь диабетиков, а многих из них спасла от преждевременной смерти, которая была бы неизбежна, живи они на несколько десятилетий раньше. Теперь больные диабетом могут вести полноценную жизнь, принимая нужные лекарства или делая инъекции. Но для успешного лечения диабета необходимо регулярно проводить анализ на содержание в крови глюкозы — это нужно для правильной дозировки лекарств. До изобретения химических методов анализа врачам для диагностики диабета приходилось даже пробовать мочу больных на вкус! Более догадливые поступали иначе — они наливали немного мочи больного в тарелочку и ставили ее туда, где было много мух. Если мухи облепляли тарелочку, то диагноз — «сахарный диабет» — не вызывал сомнения.

Потом на помощь врачам пришли химики. Они изобрели достаточно простые методы определения глюкозы в моче и в крови. Одна-

ко такие анализы делали только в поликлиниках. Больной, имея направление врача-эндокринолога, должен прийти рано утром (анализ надо делать натощак) в поликлинику и сдать кровь на анализ. Потом в лаборатории с помощью специальных реактивов определяют в крови содержание глюкозы. Результаты передают лечащему врачу, и больной узнает о них, только придя в очередной раз на прием. Это длительная и не очень эффективная процедура; ведь при некоторых формах диабета для назначения правильной дозы лекарства больному надо проводить анализ не менее 4 раз в день! А что делать сельским жителям, для которых приехать в поликлинику, где делают анализы, — целая проблема?

Современные достижения аналитической химии позволяют преодолеть эти трудности. Химики разработали ряд простых тестов, позволяющих быстро определять концентрацию глюкозы в крови или в моче. В одном из самых простых тестов каплю мочи наносят на полоску бумаги, которая содержит четыре специальных реактива. В присутствии глюкозы идут реакции с образованием соединения, окрашенного в сине-фиолетовый цвет. По интенсивности окрашивания полоски можно приблизительно судить о концентрации глюкозы в моче (аналогичные тесты существуют и для определения глюкозы в крови). Для более точного определения концентрации глюкозы в поликлиниках используют специальный прибор — фотоэлектрический колориметр, измеряющий интенсивность окраски.

В последние годы химики-аналитики разработали более точный и простой по исполнению метод измерения. Больному достаточно иметь дома маленькую коробочку-глюкометр размером с микрокалькулятор, а также набор тест-полосок, чтобы самому в любое время определить содержание глюкозы в крови. Вот как действует глюкометр. На тест-полоску — маленькую пластмассовую пластинку (рис. 4.1) нанесены два электрода — две тонкие серебряные полоски. В конце пластинки между электродами расположена миниатюрная реакционная камера, в которую заранее помещена смесь реактивов. Перед проведением анализа тест-полоску вставляют в глюкометр, который автоматически включается, когда серебряные электроды коснутся электрических контактов внутри прибора.

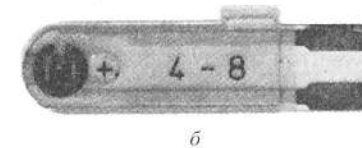
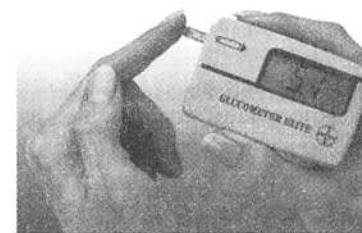


Рис. 4.1. Так с помощью электронного глюкометра (а) и тест-полоски с реактивами (б) за одну минуту проводится анализ на глюкозу в крови

Потом надо слегка уколоть палец (это самая неприятная часть процедуры, но к ней быстро привыкают, как и к мытью рук перед анализом), выдавить маленькую капельку крови и прикоснуться к ней кончиком тест-платки. Под действием капиллярных сил — тех самых, которые заставляют подземные воды подниматься к верхушкам самых высоких деревьев, — капелька крови быстро засасывается через тонкий канал внутрь «реактора». В ходе химической реакции генерируется слабый электрический ток, который и измеряется глюкометром. Так как величина тока прямо пропорциональна концентрации глюкозы, на табло прибора высвечивается содержание глюкозы в крови — в миллимолях на литр (как показано на фотографии) или в старых единицах — «миллиграмм-процентах» (т. е. в миллиграммах глюкозы на 100 мл раствора; $1 \text{ ммоль/л} = 18 \text{ мг\%}$). Когда полоску вынимают из глюкометра, прибор сам отключается. Весь анализ занимает чуть больше минуты!

Конечно, глюкометр — довольно дорогой прибор. Да и одноразовые тест-полоски недешевы. Однако первые телевизоры и холодильники тоже стоили так дорого, что прохожие только дивились, глядя на эти чудеса техники, выставленные в витринах магазинов, и только очень состоятельные люди могли позволить себе такую роскошь...

Об уксусе, пекарских порошках и «пузырьковом индикаторе»

Теория многих химических анализов проста и заключается в том, что вещества реагируют друг с другом в строго определенных соотношениях. Впервые это отчетливо понял и сформулировал в конце XVIII века немецкий химик Иеремия Вениамин Рихтер (1762–1807). В изданной в 1792 году книге он сформулировал такой закон: «Если мы получаем соединение из двух элементов, то, поскольку свойства элементов постоянны, один из элементов будет требовать всегда одного и того же количества другого элемента; так, например, если для растворения 2 частей извести требуется 5 частей соляной кислоты, то для растворения 6 частей извести потребуется 15 частей соляной кислоты... Если два нейтральных раствора смешиваются один с другим и если между ними происходит двойной обмен, то элементы должны находиться между собой в определенных объемных соотношениях». Если учесть, что «двойной обмен» — это химическая реакция между двумя соединениями, а «элементом» Рихтер называл химическое соединение, то следует признать, что он сформулировал основной закон количественного анализа. Химикам оставалось только совершенствовать методы анализа и уточнять, в каких точно соотношениях и при каких условиях реагируют различные соединения.

Интересно (и совершенно невероятно для современного читателя) звучат поучения в книге Рихтера, касающиеся элементарной арифметики. Так, в вводной главе своей книги Рихтер объясняет химикам: «Если одно число прибавляется к другому, то между ними следует поместить знак “+” (который называется плюсом), если же мы хотим произвести вычитание, то между ними ставится знак “-” (который называется минусом). Например, $19 + 424$ означает, что мы прибавляем 19 к 424, что дает 443; а запись $424 - 19$ означает, что мы отнимаем 19 от 424, что дает 405». Сейчас это знают уже первоклассники (и даже некоторые дошкольники). Но не исключено, что двести лет назад встречались химики, не знавшие азов арифметики.

Проведем несколько опытов, иллюстрирующих химический анализ. В этих опытах мы будем добавлять к одному соединению другое, которое с ним реагирует, до тех пор пока первое соединение не израсходуется полностью. Как только это произойдет, добавление второго вещества надо прекратить. Тогда по известному количеству израсходованного реагента — второго вещества — можно рассчитать, сколько же было первого. Бывает и наоборот — по известному количеству первого вещества рассчитывают количество добавляемого реагента.

«А зачем это делать, — спросят некоторые из вас, — разве не проще взвесить анализируемое вещество или измерить его объем, если это жидкость?» Конечно, проще, если это чистое вещество или раствор известной концентрации. Но тогда и анализ проводить не надо. А если нам надо определить, сколько данного соединения содержится в сложной смеси, которую трудно или даже невозможно разделить на отдельные компоненты? Или сколько различных солей содержится в минеральной воде? Здесь-то и пригодятся различные аналитические методы.

Есть и другая проблема; как было сказано, второй реагент надо добавлять к анализируемой смеси до тех пор, пока реакция не закончится. А как это узнать? Для этого служат индикаторы (от латинского *indicator* — «указатель») — вещества, позволяющие следить за протеканием химической реакции. Индикаторы бывают разными. С некоторыми из них вы познакомитесь, проводя описанные здесь несложные эксперименты. Для этих экспериментов потребуются весы, пипетка и некоторые доступные химикаты. Мы начнем с анализа самой доступной в быту кислоты — уксусной.

Уксус — это слабый водный раствор уксусной кислоты. Уксус был известен еще в глубокой древности, так как получался при брожении слабых спиртовых растворов (пиво, слабое вино), содержащих не бо-

лее 14 % спирта. Если такую жидкость оставить на воздухе, то она «скисает» и превращается в уксус. Это происходит потому, что в воздухе всегда имеются особые бактерии (их называют также «уксусным грибом»), которые, попадая в спиртовую жидкость, начинают в ней размножаться, при этом они перерабатывают спирт в уксусную кислоту. Предание гласит, что по приказу египетской царицы Клеопатры (69–30 до н.э.) в уксусе растворяли жемчужины, чтобы получать якобы целебный напиток. Само слово «уксус» происходит от греческого «оксос», что означает «кислый». Так что для древнего грека наше название «уксусная кислота» показалось бы весьма странным: ведь буквально оно значит «кислая кислота» (как «масло масленое»). На латыни уксус — *acetum*; отсюда произошло название солей уксусной кислоты — ацетаты (а также названия ацетона, ацетилен и многих других соединений).

Чистая уксусная кислота уже при 16 °С замерзает, образуя кристаллы, похожие на лед (поэтому такую кислоту называют «ледяной»). Для пищевых целей используют «уксусную эссенцию» — 80 %-ный раствор уксусной кислоты в воде. Это слишком крепкая и опасная в обращении жидкость, поэтому мы ее не будем использовать в опытах. Сравнительно безопасен столовый уксус — слабый (примерно от 5 до 10 %) водный раствор уксусной кислоты. С ним мы и проведем опыты, чтобы узнать поточнее, какова же его крепость.

Анализ будет основан на реакции уксусной кислоты с питьевой содой. Это — натриевая соль угольной кислоты (химическое название — гидрокарбонат натрия). В процессе реакции гидрокарбоната натрия с уксусной кислотой эти вещества обмениваются атомами натрия и водорода — в результате образуется натриевая соль уксусной кислоты (ацетат натрия) и свободная угольная кислота. Молекула угольной кислоты, в отличие от уксусной, очень непрочная и легко распадается на две молекулы — воды и углекислого газа. Вот почему если на соду капать кислотой (любой — не только уксусной), слышится шипение и смесь вспенивается — это выделяется углекислый газ. Он-то и будет в данном случае служить индикатором протекания реакции: как только пузырьки газа перестанут выделяться, значит, реакция закончилась и прибавление раствора уксусной кислоты надо прекратить. На этой химической реакции основано применение пекарских порошков.

Когда хозяйка кладет в сладкое тесто дрожжи, они вызывают спиртовое брожение, в результате которого в тесте образуются спирт и углекислый газ. Выделяющийся газ «поднимает» тесто, а при выпечке улетучивающийся спирт делает мучное изделие пористым и мягким. Однако если готовят тесто для выпечки вафель, печенья, коржиков

и пряников, то используют не дрожжи, а химические разрыхлители — пекарские порошки. Обычно такой порошок состоит из двух компонентов: неорганического щелочного агента — карбоната и кислотного агента. Реакция между ними и приводит к образованию углекислого газа, который поднимает тесто. Уксус здесь не годится, так как он жидкий и начинает реагировать с содой раньше времени. Вместо него обычно используют твердые органические кислоты. Состав порошка может быть разным. В старину использовали карбонат калия (его называли поташом) и молочную сыворотку, в которой много органических кислот (вы сами можете в этом убедиться, попробовав прозрачную жидкость, остающуюся после отделения творога от молока — она кислая). Кислое молоко добавляют в тесто и в наше время, а поташ уже не применяют: с ним выпечка получается темной, тяжелой, со специфическим привкусом. В качестве щелочного агента сейчас используют питьевую соду в сочетании с разными кислотными агентами. Одно время очень популярной была винная (другое название — виннокаменная) кислота, которую получали в больших количествах из так называемого винного камня — отхода виноделия. Использовали и сам винный камень — кислую калиевую соль винной кислоты. Особенность этого кислотного агента состоит в том, что он реагирует с содой только при высокой температуре, поэтому тесто можно приготовить впрок и хранить в холодильнике.

Пекарский порошок (его изобрел в середине XIX века американский профессор химии Гарвардского университета Э. Н. Хорсфорд) готовят так: смешивают две части винного камня и одну часть соды, а чтобы реагенты не начали взаимодействовать раньше времени, смесь разбавляют крахмалом или мукой, отделяя таким образом щелочной агент от кислотного. В качестве кислотных агентов используют также лимонную, яблочную, молочную и другие органические кислоты, некоторые соли фосфорной кислоты. После реакции все эти разрыхлители оставляют в тесте твердые нелетучие соли. Но известны вещества, разлагающиеся при нагревании с образованием только газообразных продуктов. Это соли аммония, в том числе карбонат и гидрокарбонат. Уже при небольшом нагревании они полностью разлагаются, выделяя углекислый газ, аммиак и воду.

Пекарский порошок продают в готовом виде в пакетиках, но если есть необходимые компоненты, его можно приготовить самостоятельно. Обычно на один килограмм муки берут две-четыре чайные ложки пекарского порошка. Более подробно об этом написано в книгах по кулинарии и домоводству.

Теперь, узнав кое-что об уксусе и соде, можно приступить к анализу. Чтобы вы лучше поняли его основную идею, проведите такой ин-

тересный опыт. Возьмите несколько одинаковых резиновых шариков и столько же небольших баночек (баночки должны иметь горлышко, на которое можно было бы легко натянуть шарик). На каждой баночке напишите ее номер. Будет хорошо, если таких шариков и баночек у вас наберется 7–8 пар. Чтобы резина шариков стала более податливой, шарики лучше предварительно надуть, а потом выпустить из них воздух. В каждую баночку залейте уксус; в первую (с номером 1) — две чайные ложки, во вторую — четыре чайные ложки, в третью — шесть и т. д. Постарайтесь, чтобы все ложки были наполнены одинаково, а чтобы не пролить уксус, воспользуйтесь небольшой воронкой.

Промойте воронку водой, высушите ее и насыпьте через воронку в каждый шарик ровно по одной чайной ложке питьевой соды (без верха); постарайтесь, чтобы соды в каждом шарике оказалось одинаковое количество.

Осторожно натяните шарики на баночки, чтобы сода не попала в уксус раньше времени. Для лучшего уплотнения туго обвяжите несколько раз крепкой ниткой горлышко банки с натянутым на нее шариком. Встряхивая резинки, добейтесь, чтобы сода из каждого шарика попала в банку (не обязательно это делать сразу со всеми шариками). Начнется вспенивание и выделение углекислого газа, который будет раздувать шарики (рис. 4.2).

Пока идет реакция, подумайте, какой шарик раздуется меньше, а какой — больше всех? Если кто-то думает, что сильнее всех раздуется шарик над последней баночкой, где было больше всего уксуса, то он ошибается. Ведь если бы это было так, то, добавив к чайной ложке соды не несколько ложек, а целую банку уксуса, мы бы получили еще больше газа. А если бы добавили ведро уксуса? А бочку?



Рис. 4.2. Химическая реакция между питьевой содой и уксусом сопровождается выделением углекислого газа, который раздувает шарик

Очевидно, что если к чайной ложке соды постепенно добавлять уксус, то с какого-то момента углекислый газ перестанет выделяться: это произойдет, когда израсходуется вся сода. А дальше лей уксус, не лей — ничего уже не изменится. Первый шарик раздулся слабее всех, так как много соды в баночке осталось неиспользованной: уксуса не хватило, чтобы вся сода с ним прореагировала. Почему так? Ведь уксуса как будто было больше — две чайные ложки, а соды — только одна. Но, во-первых, сода тяжелее уксуса, и в чайную ложку ее помещается (по массе) больше. Во-вторых, вещества вступают в химические реакции в соответствии с количеством молей в них. В третьих (и здесь это главное), уксус — это не чистая уксусная кислота, а сильно разбавленная.

Один моль питьевой соды (84 г) реагирует ровно с одним молекул уксусной кислоты (60 г). В чайной ложке помещается примерно 7 г питьевой соды, т. е. $7 \text{ г} : 84 \text{ г/моль} = 1/12$ моль. Воды же или уксуса в чайной ложке всего 5 г. Если бы это была чистая уксусная кислота, то в ложке было бы столько же молей уксусной кислоты, сколько и соды ($5 \text{ г} : 60 \text{ г/моль} = 1/12$ моль). Тогда первая же ложка с кислотой полностью прореагировала бы с содой, и все шарики раздулись бы одинаково, потому что во всех баночках оказался бы большой избыток кислоты по сравнению с содой. В химических расчетах это очень важное понятие — вещество, находящееся в избытке.

Но у нас была не чистая уксусная кислота, а ее слабый раствор — столовый уксус. Например, если бы это был 10 %-ный уксус, то его понадобилось бы для полной реакции с содой уже в 10 раз больше, чем чистой уксусной кислоты, т. е. 10 чайных ложек. В таком случае полностью реакция прошла бы только в 5-й баночке, в которой как раз было 10 ложек уксуса. В первой баночке, где было только две чайные ложки уксуса, его не хватило для реакции; здесь был избыток соды. Во второй баночке (4 ложки уксуса) сода тоже была в избытке, но ее в реакцию вступило больше, так как больше налили уксуса. Значит, газа выделилось вдвое больше, и шарик раздулся сильнее. (Только его диаметр увеличился, конечно, не вдвое, так как увеличению диаметра в 2 раза соответствует увеличение объема в $2^3 = 8$ раз.) В третьей баночке газа выделилось по объему уже в 3 раза больше, чем в первой, в четвертой — в 4 раза, в пятой — в 5 раз. А дальше объем шариков будет оставаться постоянным, потому что, начиная с шестой баночки, сода вся израсходовалась (как говорят химики, прореагировала).

Все эти рассуждения относились к 10 %-ному уксусу. Если бы он был слабее, то шарики перестали бы увеличиваться в объеме, начиная с 6-го или даже с 7-го. Более точно определить концентрацию уксуса вам поможет второй опыт.

В предыдущем опыте, добавляя к известному количеству соды уксус, мы слишком резко изменяли его количество — сразу на две чайные ложки. Чтобы анализ был точным, химики добавляют один реагент к другому малыми порциями, например, по одной капле. Поступим так и мы. Но так как мерных бюреток у нас нет, придется определять объем раствора по числу добавленных капель жидкости. Сначала определим объем одной капли. Сделать это можно по-разному. Проще всего использовать продающийся в аптеках пластмассовый одноразовый шприц на 1 или 2 мл с делениями на боковой поверхности. Отлейте с помощью шприца в маленькую баночку ровно 1 мл воды и, переливая эту воду обычной пипеткой, посчитайте, сколько капель в 1 мл

воды. Учтите, что для разных пипеток объем капли может заметно отличаться, поэтому во всех опытах используйте одну и ту же пипетку.

Если шприца нет, можно поступить иначе. Уравновесьте на весах с помощью скрепок, кнопок или других легких предметов маленький сосудик (подойдет наперсток). Положите на другую чашу весов гирьку массой 1 г и капайте в сосуд из пипетки воду по одной капле, внимательно считая их, пока весы снова не придут в равновесие. Так вы узнаете число капель в 1 г воды (обычно их бывает 20–30). Теперь легко определить объем (и массу) одной капли. Например, если в 1 г воды было 30 капель, то одна капля имеет массу 0,033 г (а объем 0,033 мл). Кстати, проверьте, одинаковы ли по объему капли воды и уксуса!

Отвесьте теперь 1 г пищевой соды и поместите ее в небольшую склянку. Осторожно капайте на соду уксус из пипетки. Не спешите, внимательно считайте капли и наблюдайте за пузырьками газа. Время от времени прекращайте добавление уксуса, чтобы дать ему прореагировать. Когда добавление уксуса больше не будет приводить к появлению новых пузырьков газа (лучше всего это фиксируется на слух, если поднести ухо поближе к смеси — прекращается характерное шипение), закончите опыт и запишите число капель уксуса, израсходованного в реакции. (Вообще записывать все без исключения результаты опытов надо обязательно; не следует перегружать голову лишней информацией, которую легко забыть.) Предположим, для полной реакции с содой потребовалось 350 капель уксуса. Остается решить задачу наподобие тех, какие дают на уроках алгебры (а не только химии). Пусть крепость уксуса составляет $x\%$, т. е. в 100 г уксуса содержится x граммов чистой уксусной кислоты (остальное — вода), а объем капли 0,03 мл (плотность уксуса считаем равной плотности воды, т. е. 1 г/см^3 , при этом мы вносим ошибку около 1 %). В 350 каплях содержится $350 \cdot 0,03 \text{ мл} \cdot 1 \text{ г/мл} = 10,5 \text{ г}$ уксуса, или $10,5 \text{ г} \cdot x \text{ г/100 г} = 0,105x \text{ г}$ чистой уксусной кислоты. Составляем пропорцию: 84 г пищевой соды полностью реагируют с 60 г уксусной кислоты, а 1 г соды реагирует с $0,105x \text{ г}$ кислоты.

Правила обращения с пропорциями вы, наверное, помните: $84 \cdot 0,105x = 1 \cdot 60$, откуда $x = 60 / (84 \cdot 0,105) = 6,8\%$. Следовательно, крепость уксуса — примерно 7 %. Точность этого анализа определяется ошибками при взвешивании соды и при определении объема капли.

В данном случае индикатором служили пузырьки газа. Но далеко не во всех химических реакциях выделяется газ. Как узнать, что реакция кончилась, если реагируют бесцветные растворы кислоты и щелочи без выделения газа? В таких случаях в ход идут кислотно-щелочные индикаторы, которые химики во всем мире используют уже почти 200 лет.

Титрование с индикатором

Как уже говорилось, индикатор указывает на присутствие в смеси того или иного вещества, и если это вещество в ходе реакции полностью израсходовано, индикатор тут же это покажет. Одни из самых распространенных индикаторов — кислотно-щелочные (или кислотно-основные); их цвет изменяется в зависимости от того, в какой среде они находятся — в кислой, нейтральной или щелочной. Одна из форм индикатора может быть и бесцветной. Обычный чай — тоже индикатор. Налейте немного чая в белую чашку и капните туда лимонный сок или растворите несколько кристалликов лимонной кислоты — в кислой среде чай сразу станет светлее. Если же растворить в чае питьевую соду, раствор в щелочной среде потемнеет (пить такой чай, конечно, не следует).

Кислотно-щелочные индикаторы весьма разнообразны; многие из них легко доступны и потому известны не одно столетие. Примером могут служить отвары или экстракты окрашенных цветков или плодов многих распространенных растений. Так, ярко-синий отвар ириса становится красным в кислой среде и зелено-голубым — в щелочной. Способностью к изменению цвета в зависимости от кислотности обладают экстракты анютиных глазок, тюльпанов, черники, ежевики, малины, красной капусты, свеклы и других растений.

В качестве индикатора попробуйте взять отвар какого-либо ярко окрашенного цветка или же темный ягодный сок, например, черной смородины. Налейте в небольшую баночку испытуемый раствор и добавьте к нему несколько капель раствора индикатора. В кислых растворах многие растительные индикаторы имеют красный цвет, а в щелочных — зеленоватый или синий. Можно также попробовать с помощью кислого раствора (уксус) и щелочного (питьевая, а лучше — стиральная сода) сделать красные или зеленоватые (синие) надписи на лепестках различных цветков.

К очевидным недостаткам таких простейших индикаторов относится «сезонность» и невозможность заготовить их впрок: растворы довольно быстро портятся — скисают или плесневеют, теряя свои свойства (более устойчивы спиртовые растворы). Менее очевидный недостаток — слишком медленное, постепенное изменение цвета природных индикаторов при добавлении кислоты к щелочному раствору или наоборот. При этом трудно или даже невозможно отличить, например, нейтральную среду от слабокислой или слабощелочную от сильнощелочной. Поэтому в химических лабораториях используют синтетические индикаторы, резко изменяющие свой цвет уже при небольшом изменении кислотности. Таких индикаторов известно множество, и каждый из них имеет свою область применения.

В лабораториях нередко используются так называемые универсальные индикаторы — смесь 5–6 индивидуальных индикаторов, подобранных таким образом, что их раствор поочередно меняет окраску, проходя через все цвета радуги при изменении кислотности раствора. Раствором универсального индикатора часто пропитывают полоски бумаги, что позволяет быстро (хотя и не особенно точно) определять кислотность (или щелочность) анализируемого раствора путем сравнения окрашенной полоски с эталонной цветовой шкалой.

Один из самых известных индикаторов — лакмус. Это твердое вещество, частично растворимое в воде и спирте; его растворы позволяют отличать кислотную среду от щелочной. История открытия и использования лакмуса весьма поучительна с точки зрения развития химического эксперимента. Еще в 1640 году ботаники описали растение *Heliotropium Turnesole*, из которого выделили красящее вещество. Знаменитый физик и химик Роберт Бойль писал о нем в 1664 году: «Плоды этого растения дают сок, который при нанесении на бумагу или материю имеет сначала свежий ярко-зеленый цвет, но неожиданно изменяет его на пурпурный. Если материал замочить в воде и отжать, вода окрашивается в винный цвет; такие виды красителя (их обычно называют “турнесоль”) есть у аптекарей, в бакалейных лавках и в других местах, которые служат для окраски желе или других вещей, кто как хочет».

Вскоре краситель, полученный из гелиотропа — садового душистого растения с темно-лиловыми цветками, стал широко применяться химиками в качестве индикатора. В кислой среде он красный, в щелочной — синий. Вначале этим красителем исследовали в основном минеральные воды, а примерно с 1670 года его начали использовать в химических опытах. «Как только вношу незначительно малое количество кислоты, — писал в 1694 году ботаник и главный аптекарь Людовика XIV Пьер Поме (1658–1699) о “турнесоле”, — он становится красным, поэтому если кто хочет узнать, содержится ли в чем-нибудь кислота, его можно использовать». В 1704 году немецкий ученый М. Валентин назвал эту краску лакмусом; это слово и осталось во всех европейских языках (кроме французского, на котором лакмус — *tourne-sol*, что дословно означает «поворачивающийся за солнцем»). Так же французы называют и подсолнечник; кстати, «гелиотроп» означает то же самое, только по-гречески. Вскоре оказалось, что лакмус можно добывать и из более дешевого сырья, например, из некоторых видов лишайника.

Сейчас лакмус лишь изредка используют в химических лабораториях. Однако в современном русском языке слово «лакмус» закрепилось и используется в выражениях типа «Отношение к товарищам во время трудного похода, как лакмусовая бумажка, проявило характер этого человека» и т. п.

Химики в качестве индикатора используют также фенолфталеин. Это сложное органическое соединение, которое продается в аптеках как слабительное средство (раньше его называли пургеном). Растворы фенолфталеина широко используются в химии для распознавания щелочей: в щелочной среде он имеет ярко-малиновую окраску, а в нейтральных и кислых средах — бесцветен. Фенолфталеин довольно плохо растворяется в воде; для улучшения растворимости небольшое количество порошка растворяют сначала в 20–30 каплях спирта или водки, а затем добавляют еще немного воды. Используя раствор фенолфталеина как индикатор, вы можете проверить им растворы питьевой и стиральной соды, мыла, нашатырного спирта, различных стиральных и чистящих порошков, а также других хозяйственных средств, какие найдете. Появление малиновой окраски будет свидетельствовать о том, что раствор данного вещества имеет щелочной характер.

С помощью указанных индикаторов вы можете провести опыты по количественному определению разных кислотных и щелочных растворов. Например, если в вашей аптечке есть слабый раствор нашатырного спирта, попробуйте определить его концентрацию. Для этого воспользуйтесь уксусом, концентрацию которого вы уже определили. Кроме того, надо знать, в каких соотношениях реагируют эти вещества. Нашатырный спирт — это водный раствор аммиака, бесцветного газа с очень резким запахом. Если аммиака в воде растворено много (например, 25 %), то такой раствор «ударяет в нос» и «ест глаза», с ним мы работать не будем. В аптечном нашатырном спирте аммиака намного меньше — примерно 10 %; его применяют для возбуждения центральной нервной системы при обморочных состояниях. Добавляют нашатырный спирт и в некоторые средства для мытья стекол. Если склянка с нашатырным спиртом закрыта неплотно, то газообразный аммиак медленно улетучивается из раствора, так что в конце концов в ней остается чистая вода. Тем более интересно узнать, насколько крепок нашатырный спирт из вашей аптечки.

Один моль аммиака (17 г) реагирует с одним молекул уксусной кислоты (60 г). В 100 г 10%-ного нашатырного спирта содержится 10 г аммиака или $10 \text{ г} : 17 \text{ г/моль} = 0,59 \text{ моль}$, а в 100 г 7%-ного уксуса содержится 7 г уксусной кислоты или $7 \text{ г} : 60 \text{ г/моль} = 0,12 \text{ моль}$. Таким образом, при равных объемах число молекул аммиака в 10%-ном нашатырном спирте примерно в 5 раз больше числа молекул уксусной кислоты в 7%-ном уксусе. Значит, при указанной крепости растворов один объем нашатырного спирта будет полностью реагировать примерно с 5 объемами уксуса. Проверим это экспериментально.

Накапайте в небольшую склянку из бесцветного стекла 30 капель нашатырного спирта и добавьте несколько капель раствора индикато-

ра. Если вы использовали раствор фенолфталеина, жидкость станет малиновой. Добавляйте к ней из той же пипетки уксус, внимательно считая капли и слегка встряхивая раствор, чтобы он хорошо перемешался. Как только индикатор обесцветится (или изменит цвет, если это растительный индикатор), прекратите добавление уксуса: весь нашатырный спирт к этому моменту израсходован. Такую операцию химики называют титрованием. Запишите, сколько капель уксуса у вас ушло на полную нейтрализацию нашатырного спирта (термин «нейтрализация» химики используют, когда говорят, что щелочь полностью прореагировала с кислотой или наоборот — кислота со щелочью; в результате реакции раствор теряет едкие свойства кислоты или щелочи, становится нейтральным, отсюда — название реакции). Если уксуса ушло в 5 раз больше, т. е. 150 капель, значит, нашатырный спирт действительно 10%-ный. Если уксуса ушло еще больше, то нашатырный спирт более крепкий, а если меньше, то более слабый. Например, если на титрование 30 капель нашатырного спирта пошло 120 капель уксуса, то раствор аммиака имеет концентрацию $(120 / 150) \cdot 10\% = 8\%$. Если же, положим, на титрование ушло 180 капель, то крепость нашатырного спирта равна $(180 / 150) \cdot 10\% = 12\%$.

Сейчас во многих лабораториях кислотность растворов (значения pH) измеряют электронными индикаторами — pH-метрами. В них нет никакого изменения цвета. Все проще: в раствор погружают небольшой шуп — датчик, и стрелка на приборе сразу указывает на какое-то число; или же это число загорается на табло индикатора, как показано на рис. 4.3. Что же это за число?

При работе с водными растворами (а в неорганической химии именно такие растворы встречаются чаще всего) кислотность или щелочность среды выражают с помощью так называемого водородного показателя pH (читается «пэ-аш»). Эту концепцию, как и сам символ,

ввел в 1909 году датский биохимик Сёрен Петер Лауриц Сёренсен (1868—1939), который в том же году обнаружил зависимость активности ферментов от кислотности среды. Кислотность создается заряженными атомами водорода — ионами водорода (обозначение H^+). Используемые обычно в биохимии (да и в химии вообще) небольшие концентрации ионов водорода, например 0,00001 моль/л, выражать таким способом неудобно. В работе, опубликованной в «Биохимическом журнале», Серенсен писал, что концентрацию ионов H^+ удобно записывать «...в форме отрицательной степени 10. Я буду использовать название “показатель водородного иона” и символ pH для численного значения показателя этой степени». То есть для концентрации ионов водорода Серенсен использовал показатель p в выражении 10^{-p} , где буква « p » обозначала «степень», причем на всех основных европейских языках: *Potenz* по-немецки, *power* по-английски, *puissance* по-французски. Теперь вместо концентрации 0,00001 можно было написать $pH = 5$. (Математики называют такое число отрицательным десятичным логарифмом.)

Обозначение pH исключительно широко применяется в химии, биологии, медицине, в других отраслях. В телевизионных рекламах показывают, как изменяется pH во рту человека после чистки зубов такой-то пастой или после жевания такой-то резинки... Абсолютно нейтральной среде соответствует значение pH, равное точно 7. Чем раствор более кислый, тем меньше pH, а в присутствии щелочи pH становится больше 7. Так, раствор сильных кислот (соляной, серной, азотной) при концентрации 0,1 моль/л имеет $pH = 1$. Это соответствует, например, всего 0,36%-ному раствору соляной кислоты. Полезно взглянуть на таблицу, в которой указаны величины pH некоторых жидкостей (для химических соединений указан pH при концентрации 0,1 моль/л; pH биологических жидкостей может сильно зависеть от состояния организма):

Желудочный сок	1,6
Лимонный сок	2,3
Столовый уксус	3,0
Сок грейпфрута.....	3,2
Апельсиновый сок	3,6
Сильно газированная вода	3,7
Яблочный сок.....	3,8
Черный кофе.....	5,0
Моча	5—8
Раствор борной кислоты	5,3
Молоко	6,7
Дистиллированная вода.....	7,0
Кровь.....	7,35—7,45

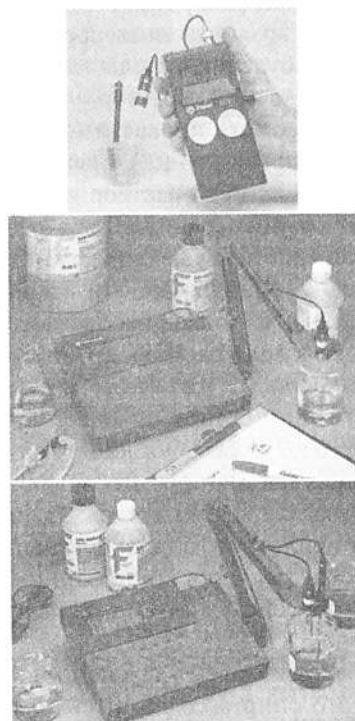


Рис. 4.3. Электронные индикаторы, анализирующие реакцию среды. Табло на верхнем индикаторе показывает слабокислую реакцию ($pH = 5,90$, примерно такую кислотность имеет обычная вода, в которой растворен углекислый газ из воздуха), на среднем — практически нейтральную реакцию ($pH = 7,01$), на нижнем — сильно-щелочную ($pH \approx 10$)

Слона	7,4–8
Желчь	7,8–8,6
Вода океанов	7,9–8,4
Питьевая сода.....	8,3
Раствор аммиака (нашатырный спирт)	11,3
Кальцинированная (стиральная) сода	11,5
Гашеная известь (насыщенный раствор)	12,4
Едкий натр	13,0

Оптимальные значения рН играют исключительно важную роль для нормальной жизнедеятельности организмов. Биохимические процессы в живых организмах протекают при строго определенной кислотности. Биологические катализаторы – ферменты способны работать только в определенных пределах рН, а при выходе за эти пределы их активность может резко снижаться. Например, активность фермента пепсина, который катализирует гидролиз белков и способствует таким образом перевариванию белковой пищи в желудке, максимальна при значениях рН около 2. Поэтому для нормального пищеварения необходимо, чтобы желудочный сок имел довольно низкие значения рН: в норме 1,53–1,67. При язвенной болезни желудка рН понижается в среднем до 1,48, а при язве двенадцатиперстной кишки может достигать даже до 1,05. Точное значение рН желудочного сока определяют путем так называемого интрагастрального исследования (от латинского слова *intra* – «внутри» и греческого «гастер» – «желудок») или с помощью рН-зонда. Если у человека понижена кислотность, врач может назначить прием с пищей слабого раствора соляной кислоты, а при повышенной кислотности – принимать противокислотные средства, например, гидроксиды магния или алюминия. Интересно, что если выпить лимонный сок, кислотность желудочного сока... понизится! Действительно, раствор лимонной кислоты лишь разбавит более сильную соляную кислоту, содержащуюся в желудочном соке. Все же пить чистый лимонный сок не следует – он может повредить пищевод.

В клетках организма значение рН около 7, во внеклеточной жидкости – 7,4. Нервные окончания, которые находятся вне клеток, очень чувствительны к изменению рН. При механических или термических повреждениях тканей стенки клеток разрушаются и их содержимое попадает на нервные окончания. В результате человек чувствует боль. Скандинавский исследователь Олаф Линдал проделал такой эксперимент: с помощью специального безыгольного шприца человеку вприскивали под кожу очень тонкую струйку раствора, который не повреждал клетки, но действовал на нервные окончания. Было показано, что боль вызывают именно катионы водорода, причем с уменьшением рН раствора боль усиливается. Аналогично непосредственно «действует на нервы» и муравьиная кислота, содержащаяся в слюне некоторых

насекомых, в стебле и листьях крапивы. Разным значением рН тканей объясняется также, почему при одних воспалениях человек чувствует боль (среда кислая), а при других – нет (среда щелочная).

В очень узких пределах должно оставаться значение рН крови; даже небольшое ее подкисление (ацидоз) или защелачивание (алкалоз) может привести к гибели организма. Ацидоз наблюдается при таких заболеваниях, как бронхит, недостаточность кровообращения, опухоли легких, пневмония, диабет, лихорадка, поражения почек и кишечника. Алкалоз же наблюдается при слишком интенсивном дыхании – гипервентиляции легких (или при вдыхании чистого кислорода), при анемии, отравлении угарным газом, истерии, опухоли мозга, избыточном потреблении питьевой соды или щелочных минеральных вод, приеме мочегонных средств. Интересно, что величина рН артериальной крови в норме должна быть в пределах 7,37–7,45, а венозной – 7,34–7,43. Различные микроорганизмы также весьма чувствительны к кислотности среды. Так, патогенные микробы быстро развиваются в слабощелочной среде, тогда как кислую среду они не выдерживают. Поэтому для консервирования (маринование, соление) продуктов используют, как правило, кислые растворы, добавляя в них уксус или пищевые кислоты. Большое значение имеет правильный подбор рН и для химико-технологических процессов.

Поддерживать нужное значение рН, не давая ему заметно отклоняться в ту или иную сторону при изменении условий удается с помощью так называемых буферных (от английского *buff* – «смягчать толчки») растворов. Такие растворы часто представляют собой смесь слабой кислоты и ее соли или слабого основания и его соли. Подобные растворы обладают способностью «сопротивляться» в определенных пределах (их называют емкостью буфера) изменению рН. Многие природные жидкости обладают буферными свойствами. Примером может служить вода в океане, буферные свойства которой во многом обусловлены растворенным в ней углекислым газом и гидрокарбонат-ионами (такие ионы дает, например, питьевая сода). Источником этих ионов, помимо растворенного в воде углекислого газа, являются огромные количества карбоната кальция в виде раковин, меловых и известняковых отложений в океане. Интересно, что фотосинтез планктона – одного из основных поставщиков кислорода в атмосферу – приводит к повышению рН среды. Клеточная жидкость, кровь также являются примерами природных буферных растворов. Так, кровь содержит около 0,025 моль/л углекислого газа, причем его содержание у мужчин примерно на 5% выше, чем у женщин. Приблизительно такая же концентрация в крови и гидрокарбонат-ионов (их тоже больше у мужчин).

При исследовании почвы рН также является одной из наиболее важных характеристик. Разные почвы могут иметь рН от 4,5 до 10. По значению рН можно судить, в частности, о содержании в почве

питательных веществ, а также о том, какие растения могут успешно произрастать на данной почве. Например, рост фасоли, салата, черной смородины задерживается при pH почвы ниже 6,0, капусты — ниже 5,4, яблони — ниже 5,0, картофеля — ниже 4,9. Кислые почвы обычно менее богаты питательными веществами, поскольку хуже удерживают в себе катионы металлов, необходимые растениям. Для раскисления кислых почв используют прием известкования — внесения веществ, постепенно связывающих избыток кислоты. Такими веществами могут служить природные минералы — мел, известняк, доломит, а также известь, шлак с металлургических заводов. Количество внесенного раскислителя зависит от буферной емкости почвы. Например, для известкования глинистой почвы требуется больше раскисляющих веществ, чем для песчаной.

Большое значение имеют измерения pH дождевой воды, которая может оказаться довольно кислой из-за присутствия в ней серной и азотной кислот. Эти кислоты образуются из оксидов азота и серы, которые выбрасываются в атмосферу в виде отходов многочисленных производств. Известно, что кислотные дожди с низким значением pH (менее 5,6) губят растительность, живой мир водоемов. Поэтому постоянно ведется pH-контроль дождевой воды.

Анализ иодной настойки

Все видели иодную настойку. Кстати, само слово «йод» по традиции пишут через «й» только в нехимических, а также в медицинских текстах. В химических статьях, справочниках, энциклопедиях и учебниках это слово пишется черед «и» — «иод», а старый символ этого элемента «J» в таблице Менделеева уже давно заменили на «I». Настойка — это водно-спиртовый раствор, содержащий, согласно фармацевтическим справочникам, 5 % иода. Но это теоретически. А как на самом деле? Обратите внимание на срок годности настойки, указанный на этикетке. Дело в том, что иод медленно реагирует со спиртом, причем реакция ускоряется на свету (вот почему его, как и многие другие лекарственные средства, надо хранить в темноте). Кроме того, если настойка длительное время стояла в неплотно закрытой посуде, концентрация иода могла измениться как из-за испарения спирта, так и из-за летучести иода.

Все это можно проверить экспериментально. Для анализа потребуется аптечная пипетка и маленькая мензурка с делениями, которую тоже можно купить в аптеке. Из реактивов потребуются тиосульфат натрия (подробнее о нем вы узнаете из рассказа о кристаллах) и крахмал. Тиосульфат реагирует с иодом, образуя бесцветное соединение; на два моля тиосульфата (496 г) расходуется один моль иода (254 г). За титрованием можно следить просто по окраске иода, но когда иода в рас-

творе остается мало, бледно-желтая окраска раствора почти не видна, и трудно заметить момент, когда раствор обесцвечивается полностью. Поэтому здесь лучше также воспользоваться индикатором — крахмалом, который добавляют к раствору в конце титрования.

Для опыта надо сначала приготовить очень жидкий крахмальный клейстер. Чтобы в клейстере не было комков и он был совершенно прозрачным, делают его так. В небольшой кастрюльке вскипятите примерно полстакана воды. Пока вода греется, возьмите немного крахмала (примерно четверть чайной ложки) и хорошо размешайте его со столовой ложкой холодной воды, чтобы не было отдельных комков. Медленно, при постоянном перемешивании, слейте мутную взвесь крахмала в кипящую воду, хорошо размешайте и охладите.

Что бывает, когда иод реагирует с крахмалом, знают, наверное, все. Если не знаете или забыли — капните в чашку сначала крахмальный клейстер, а потом иодную настойку — тотчас появится синяя окраска. Реакция эта настолько чувствительна, что с помощью иодной настойки легко обнаружить крахмал на свежем срезе картофеля или в муке. Кстати, еще в XIX веке эту реакцию использовали, чтобы уличить недобросовестных торговцев, добавлявших в сметану «для густоты» пшеничную муку. Если на образец такой сметаны капнуть иодную настойку, синее окрашивание сразу выявит фальсификацию.

Чтобы анализ на содержание иода в настойке был достаточно точным, надо приготовить довольно разбавленный раствор тиосульфата натрия, например 0,05 моль/л. Для этого в 1 литре раствора должно содержаться примерно 12,5 г кристаллического тиосульфата натрия (или 0,5 г в 40 мл раствора; 40 мл можно отмерить с помощью аптечной мензурки или шприца, хотя это утомительно и неточно, а 0,5 г постарайтесь поточнее отвесить с помощью весов).

Анализ проводят так. Налейте в чистую склянку 2–3 столовые ложки прокипяченной холодной воды. Добавьте в эту воду с помощью шприца ровно 2 мл иодной настойки (если иод у вас в ампулах, надо использовать две ампулы). Начинайте при легком перемешивании титровать полученный разбавленный раствор иода раствором тиосульфата, внося его по каплям из пипетки (вы уже знаете из предыдущих опытов, как определить объем одной капли раствора тиосульфата натрия). Когда раствор иода станет бледно-желтым, прибавьте к нему несколько капель крахмального клейстера и продолжайте добавлять тиосульфат, пока синяя окраска не исчезнет полностью. Концентрацию иода в настойке можно рассчитать по формуле $c = 0,0125V$ (моль/л) = $0,32V$ (г/100 мл, т. е. %), где V — объем раствора тиосульфата (в миллилитрах), израсходованного на титрование 2 мл иодной настойки.

Попробуйте оставить на несколько дней баночку без крышки с небольшим количеством иодной настойки (лучше не в помещении), пока часть раствора не испарится, и снова проанализируйте настойку.

Если концентрация иода стала больше, значит, спирт испарялся быстрее иода, а если меньше — значит, наоборот.

Если с анализом настойки у вас все получилось, можете перейти к более сложным анализам, например, к определению концентрации аскорбиновой кислоты.

Сколько в апельсине витамина С

В организме человека (в отличие от многих животных) аскорбиновая кислота не синтезируется, поэтому мы должны получать этот витамин с пищей (в среднем около 70 мг в сутки). Витамин С необходим для нормальной жизнедеятельности: он оказывает благотворное влияние на центральную нервную систему, повышает сопротивляемость организма при воздействии на него различных негативных факторов, в том числе возбудителей инфекционно-вирусных заболеваний, предотвращает цингу (на латыни цинга — *scorbutus*, т. е. «аскорбиновая» — дословно переводится как «против цинги»). Полезно знать, в каких продуктах много этого витамина. В основном богаты им овощи, фрукты, ягоды. Вот сколько миллиграммов аскорбиновой кислоты содержится в 100 г свежих продуктов: морковь, виноград — 5, свекла, репчатый лук, чеснок, сливы, летние яблоки — 10, салат, зимние яблоки — 15, картофель — 20, редис, помидоры, малина — 25, зеленый лук, крыжовник — 30, лимон — 40, клубника, ранняя капуста — 60, укроп — 100, петрушка (зелень) — 150, черная смородина, облепиха — 200, красный перец (сладкий) — 250, шиповник свежий — 650. Конечно, приведенные значения приблизительны, хотя бы потому что содержание витамина зависит от сорта растения, условий его роста, созревания плодов, их хранения и т. д. Тем не менее по ней вы можете ориентировочно определить, сколько аскорбиновой кислоты вы получаете в сутки из разных продуктов.

Анализ витаминов в продуктах питания — дело сложное. Но как раз витамин С — аскорбиновую кислоту — вы сможете проанализировать и в домашних условиях. Возможно, вы решили, что раз витамин С — кислота, то анализировать его будем с помощью щелочи. Но так не получится, потому что в соке различных плодов, кроме аскорбиновой, есть еще множество разных кислот: лимонная, яблочная, винная и другие. И отличить с помощью щелочи одну кислоту от другой не удастся. Однако у аскорбиновой кислоты есть свойство, которое отличает ее от всех других упомянутых кислот, — это быстрая реакция с иодом. Один моль аскорбиновой кислоты (176 г) реагирует с одним молекул иода (254 г).

Для анализа можно использовать аптечную иодную настойку. Будем считать, что она 5%-ная, это соответствует концентрации иода примерно 0,2 моль/л. Однако аскорбиновой кислоты в соке может оказаться так мало, что на титрование определенного объема сока

(например, 20 мл) уйдет всего 1–2 капли иодной настойки, при этом ошибка анализа окажется очень большой. Чтобы результат был более точным, надо либо взять много сока, либо разбавить иодную настойку; в обоих случаях число капель иода, израсходованных на титрование, увеличится, что и сделает анализ точнее. Химики предпочитают второй путь. Поступим так и мы (заодно сэкономив сок для его прямого назначения). Добавим к 1 мл иодной настойки прокипяченной воды до общего объема 40 мл, т. е. разбавим настойку в 40 раз. Концентрация такого раствора будет около 0,005 моль/л; 1 мл его соответствует 0,88 мг аскорбиновой кислоты.

Если вы раньше не определяли объем одной капли, сделайте это сейчас: с помощью аптечной мензурки или шприца отмерьте 1 мл разбавленного раствора иода и посчитайте, сколько капель, внесенных обычной пипеткой, содержится в этом объеме. Для опыта понадобится также крахмальный клейстер; как его готовить, вы уже знаете.

Прежде чем приступить к анализу сока, хорошо бы потренироваться на растворе с известным содержанием витамина С. Для этого лучше всего подходит аскорбиновая кислота в таблетках, которая продается в аптеках. Одна таблетка может содержать 0,1 или 0,5 г чистого витамина. Растворите таблетку в 0,5 л кипяченой воды (воду отмерьте с помощью пол-литровой бутылки или банки), тщательно перемешайте и отберите с помощью шприца или аптечной мензурки 25 мл этого раствора. В этом количестве раствора аскорбиновой кислоты будет в 20 раз меньше, чем в таблетке. Добавьте к этому раствору половину чайной ложки раствора крахмала и осторожно, по каплям, добавляйте из пипетки разбавленный раствор иода, постоянно взбалтывая содержимое. Внимательно считайте капли и следите за цветом раствора. Как только вся содержащаяся в растворе аскорбиновая кислота прореагирует с иодом, следующая же его капля окрасит раствор в синий цвет. Титрование надо вести до появления устойчивого синего окрашивания. Определив число капель и, следовательно, объем израсходованного раствора иода, вы легко рассчитаете, сколько аскорбиновой кислоты было в стакане. Например, если на титрование ушло 6 мл раствора иода, то аскорбиновой кислоты в растворе было $0,88 \text{ мг} \cdot 6 = 5,28 \text{ мг}$, а в исходной таблетке — в 20 раз больше, т. е. 105,6 мг. Если ваша таблетка содержала 0,1 г (100 мг) аскорбиновой кислоты, то это означает, что точность вашего анализа (около 5 %) вполне достаточна, чтобы переходить к дальнейшим опытам.

Отожмите из лимона или апельсина 25 мл сока или возьмите такое же количество готового сока из пакета (только он должен быть светлым, так как в темном соке вы не увидите появления окраски иода с крахмалом). Титруйте сок так же, как и в «учебном» опыте с таблеткой. Если на указанное количество сока уйдет, допустим, 10 мл раствора иода, значит, в 25 мл сока было 8,8 мг аскорбиновой кислоты,

а в 100 мл сока — 35,2 мг (содержание аскорбиновой кислоты обычно так и выражают — в миллиграммах на 100 мл или на 100 г продукта). Сравните полученный вами результат с концентрацией, что указана на упаковке сока. Если есть небольшие расхождения — не страшно: ведь анализ наш приблизительный, ошибки возникают из-за неточного определения объема сока, объема капли, концентрации иода и т. д. Если же с таблеткой все получилось правильно, а с соком — нет, значит, либо на упаковке неверные сведения, либо из-за неправильного или слишком долгого хранения сока витамин в нем частично разрушился — возможно, еще до того, как сок разлили в пакеты. Дело в том, что витамин С очень неустойчивый, легко разрушается кислородом воздуха, особенно на свету, а также в присутствии следов железа. При тепловой обработке продуктов (например, при варке картофеля или капусты) в них может остаться меньше половины витамина С.

Анализ в эмалированной кружке

Если вещество окрашено, химики для его анализа часто используют оптические свойства раствора: чем выше концентрация растворенного вещества, тем сильнее раствор этого вещества поглощает свет. Так, стакан со слабо заваренным чаем, оставаясь прозрачным, будет слабо поглощать свет, а стакан с крепким чаем, делаясь непрозрачным, будет очень сильно поглощать свет. Эту простую зависимость степени поглощения света от концентрации растворенного вещества можно выразить формулой

$$D = \epsilon cl,$$

где D — оптическое поглощение (оно измеряется специальным прибором — фотометром);

ϵ — (читается «эпсилон») коэффициент поглощения (для каждого вещества он свой);

l — длина пути (в сантиметрах), которую прошел свет в растворе;

c — концентрация вещества (в молях на 1 литр раствора).

Фотометр — прибор сложный, он есть только в лабораториях. Но, оказывается, для приблизительной оценки концентрации вещества иногда можно обойтись и без фотометра, проводя измерения, как говорится, «на глазок». Неужели это возможно?

Вот какая история произошла с моими знакомыми в турпоходе. Путешественники остановились на привал в лесу, у самой реки. Пора было готовить еду, но речная вода не внушала доверия — она явно пахла чем-то «керосиновым». К счастью, неподалеку оказался родник. Однако и с ним не все было в порядке: камни вокруг были какие-то ржавые, да и сама вода пахла «железом», как будто она долго текла по старой водопроводной трубе. Впрочем, многие слышали, что железо полезно для

организма и есть особо богатые им минеральные воды (недаром известный курорт, расположенный недалеко от Пятигорска, называется Железноводском). Однако один из туристов — врач по профессии — заявил, что в минеральных водах железа обычно немного, редко больше 10 мг в литре. Если железа в воде намного больше, то она, безусловно, вредна и лучше не рисковать. Поскольку простого способа «убрать» из воды железо не существует, врач предложил вскипятить речную воду, заодно обработав ее марганцовкой — на случай, если в воде есть еще и микробы. Однако энтузиазма это предложение не вызвало. Вот если бы поточнее узнать, сколько железа в родниковой воде... Но как это сделать?

И тогда другой турист, который был химиком, вспомнил об анализе соединений железа, который ему часто приходилось выполнять в лаборатории. Там он добавлял к анализируемому раствору специальные реагенты, которые при взаимодействии с железом давали яркую окраску, а потом с помощью фотометра измерял поглощение света этим раствором в стеклянной кювете. Но ведь здесь не было ни химических реагентов, ни прозрачных кювет, ни фотометра. Зато были дубы! И химик рассказал товарищам, что он собирается сделать.

На нижней стороне дубовых листьев, обычно к концу лета, часто появляются красивые круглые орешки-галлы. Иногда их бывает так много, что листья буквально провисают под их тяжестью. Сначала галлы зеленые, потом они краснеют и выглядят как маленькие яблочки, прилипшие к листу. Самому дубу галлы ни к чему — они образуются на листьях дуба от укуса крохотной мушки — орехотворки. Самка мушки, откладывая яйца, ранит дубовый лист, вызывая образование на нем патологических наростов. Развивающиеся личинки надежно защищены под кожицей этих наростов. Когда орешки-галлы созревают, из них выводятся маленькие крылатые насекомые с четырьмя прозрачными крылышками. Галлы интересны тем, что содержат много танина — смеси дубильных веществ (танин содержится и в дубовой коре, но там его в 2–3 раза меньше).

Еще в древности орешки-галлы применяли в медицинской практике, да и сейчас раствор танина используют как прекрасное средство от ожогов: на «задубленной» им обожженной коже не образуются пузыри. Применяли галлы и для выделки кож, называя их «дубильными орешками». Но самое известное их применение было связано с изготовлением чернил; отсюда другое название галлов — «чернильные орешки». Для получения чернил к соку из галлов добавляли железный купорос или другие соли железа. На воздухе полученный раствор приобретал глубокий фиолетово-черный цвет. Реакция эта очень чувствительная: окрашивание происходит даже с очень малым количеством железа. Еще в XVII веке Роберт Бойль установил, что «одна крупинка купороса, растворенная в таком количестве воды, которое в шесть тысяч раз превышает ее вес, способна дать с дубильным орешком пурпурную настойку». Добавление к чернилам камеди — густого сока некоторых

деревьев, например, вишни — придавало чернилам красивый блеск. Вот один из старинных рецептов приготовления черных чернил: ка-меди — 3 части, железного купороса — 2 части, чернильных орешков — 3 части, воды — 30 частей. Чернила эти очень устойчивы: сохранились, например, написанные ими средневековые рукописи.

Химик снял с листьев несколько орешков и выжал из них сок в кружку, наполненную родниковой водой. Каково же было удивление окружающих, когда вода сразу стала фиолетово-черной! Значит, в воде действительно много железа. Опыт произвел впечатление, но о том, что в воде есть железо, туристы догадывались и раньше. А вот как определить без приборов его концентрацию? Химик знал, что для окрашенных соединений, которые танин образует с солями железа, коэффициент ϵ в приведенной выше формуле равен примерно 4000. Знал он также, что глаз человека способен увидеть окраску раствора в том случае, если его оптическое поглощение D не меньше примерно 0,1. Поскольку анализ был приблизительным, большей точности не требовалось.

Сначала с помощью тех же галлов химик проверил, что в речной воде, как и следовало ожидать, железа нет. После этого он начал разбавлять «чернильный» раствор речной водой. Сначала раствор был разбавлен вдвое, потом еще вдвое, но он оставался почти таким же темным — его оптическое поглощение было все еще слишком велико. Но затем содержимое кружки стало быстро светлеть, вот уже отчетливо стали видны царапинки на ее белом эмалированном дне и, наконец, после шестого разбавления раствор приобрел едва заметный лиловый оттенок.

Опыт был закончен. Оставалось провести некоторые простые расчеты. Когда окраска в кружке едва заметна, оптическое поглощение раствора примерно равно 0,1. Высота жидкости в кружке — около 10 см, но так как свет проходит слой жидкости дважды — сначала вниз, а потом, отразившись от дна, — вверх, то длина его пути составляет 20 см. Теперь, подставляя числа в формулу:

$$c = D/\epsilon l,$$

можно рассчитать концентрацию (в моль/л):

$$c = 0,1 / (4000 \cdot 20) = 1,25 \cdot 10^{-6}.$$

Поскольку раствор был разбавлен вдвое последовательно 6 раз, исходная концентрация железа была в 64 раза больше ($2^6 = 64$), т. е. железа было $8 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Один моль железа — это 56 г, следовательно, в литре родниковой воды было $56 \text{ г/моль} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, или, после округления (анализ-то неточный), примерно 5 мг железа. Это, конечно, немало, однако, как заметил врач, в минеральной воде железа бывает и больше, поэтому пара стаканов такой воды никакого вреда человеку не принесет.

Химик выполнил свою задачу, обеспечив туристов водой. Врач же рассказал им еще много интересного о железе и его роли в жизни человека. Но это уже совсем другая история...

ХИМИКИ ИЗУЧАЮТ И ВЫРАЩИВАЮТ КРИСТАЛЛЫ



Кристаллы в природе и в лаборатории

Если вы когда-либо были в музее минералогии или на выставке минералов (если нет — не упустите при случае такой возможности!), вы не могли не восхититься изяществом и красотой форм, которые принимают «неживые» творения природы. А кто не любовался снежинками — кристаллами льда, разнообразие которых поистине бесконечно (рис. 5.1). Еще в XVII веке знаменитый астроном Иоганн Кеплер написал трактат «О шестиугольных снежинках». Спустя три столетия американский натуралист У. Бентли, более пятидесяти лет занимавшийся фотографированием снежинок под микроскопом, издал альбом, в котором представил тысячи фотографий, причем ни одна из них не повторяла другую.

Наука о кристаллах началась с изучения горного хрусталя. Его блестящие бесцветные кристаллы впервые были найдены еще в древности среди вечных снегов в Швейцарских Альпах. Некоторые кристаллы были настолько большими, что их с трудом могли поднять несколько силачей (рис. 5.2).

Горный хрусталь — это чистый кристаллический кварц, соединение атомов кремния и кислорода. Но не менее красивы кристаллы кварца, окрашенные в различные цвета благодаря присутствию в них некоторых примесей: фиолетовые аметисты, желтые цитрины, коричневатый

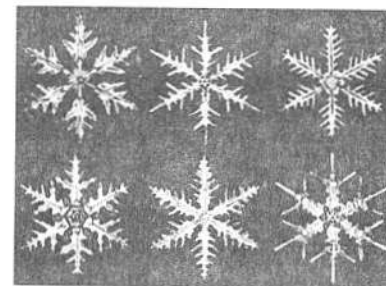


Рис. 5.1. Эти красивые снежинки — лишь малая часть симметричных фигур, образуемых растущими кристаллами льда



Рис. 5.2. Большой кристалл горного хрусталя

дымчатый кварц, переливающиеся всеми цветами радуги опал и яшма. В Оружейной палате Московского Кремля можно увидеть одежду и короны русских царей, сплошь усыпанные кристаллами-самоцветами. Особенно много среди них аметиста (рис. 5.3). Огромными аметистами густого фиолетового цвета была украшена корона русской царицы Ирины Годуновой. В церквях аметистами нередко украшали иконы, алтари, кресты, панагии.

Самые знаменитые кристаллы — алмазы, которые после огранки превращаются в бриллианты (рис. 5.4). В течение многих веков люди пытались разгадать тайну этих драгоценных камней. Когда же было наконец установлено, что алмаз — одна из разновидностей углерода,

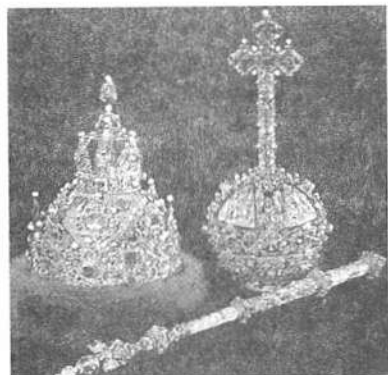


Рис. 5.3. Царский Большой наряд: шапка, держава, скипетр, украшенные кристаллами самоцветов



Рис. 5.4. Большая императорская корона российских царей, украшенная жемчугом и множеством бриллиантов

в это поверили не сразу! Действительно, алмаз — символ не только богатства, но и необыкновенной твердости. Если же взять другую, наиболее распространенную в природе кристаллическую разновидность углерода — графит, то на память прежде всего приходят грифели карандашей — черные, жирные на ощупь и очень мягкие. Оказалось, что сверкающие кристаллы, с которыми связано столько романтических (и кровавых) историй, и невзрачный черный графит состоят из одних и тех же атомов углерода. Решающий опыт провел в 1772 году знаменитый французский химик А. Л. Лавуазье. Он обнаружил, что при сжигании алмаза и обычного угля получается одно и то же вещество — углекислый газ.

Блестящие кристаллы алмаза находили на территории современной Индии еще 7 тысячелетий тому назад. Людей поражали их блеск, прозрачность (до изобретения стекла было еще далеко) и необычайная твердость. Алмаз унаследовал свое название от греческого слова «адамас», что означает нерушимый, непреодолимый. Не удивительно, что в древности этому камню при-

писывали чудесные свойства, он был предметом поклонения. Самые большие и красивые образцы вставляли в глазницы гигантских статуй Будды.

Приписывали алмазу и самые невероятные свойства. Не избежал фантастических вымыслов и римский ученый Гай Плиний Старший, давший первое подробное описание алмаза. В своей работе «Естественная история ископаемых тел» он пишет, что если поместить кристаллик алмаза между молотом и наковальней, то скорее они разлетятся вдребезги, чем повредится «царь камней». На самом деле алмаз очень хрупок и совершенно не выдерживает ударов.

Чаще всего крупные алмазы находят в виде неправильной глыбы, мало отличающейся по форме от обычного булыжника. Именно таким был и самый большой из найденных когда-либо алмазов — «Куллинан». Его обнаружили 26 января 1905 года в Южной Африке в руднике «Премьер» и назвали по имени президента компании «Премьер Дайамонд Майн» сэра Томаса Куллинана (в 1922 году эта компания вошла в состав знаменитой ныне «Де Бирс»). Этот камень размером с кулак весил более 600 граммов! Причем его форма свидетельствовала о том, что это лишь часть более крупного камня. Когда ценнейший подарок доставили английскому королю Эдуарду VII, тот был явно разочарован. «Попадись этот камень мне, — сказал король, — я бы принял его за обыкновенную стекляшку и презрительно отшвырнул ногой!» Но прожил «Куллинан» всего три года — его раскололи и распилили на сотни кусков и кусочков. Из них после огранки получили 105 бриллиантов, из которых девять были весьма крупными. Самый большой, массой 106 г, названный «Куллинан I», был вмонтирован в верхнюю часть скипетра английского монарха. Этот самый большой в мире ограненный алмаз хранится вместе с другими сокровищами английской короны в Тауэре. Второй по величине бриллиант, «Куллинан II» (63,5 г), был вмонтирован в корону Британской империи.

Кстати, массу алмазов и бриллиантов выражают не в граммах, а в каратах; 1 карат = 0,2 г. И мало кто знает, что алмаз характеризуется необычайно высокой для неметаллов теплопроводностью; поэтому крупные алмазы на ощупь всегда холодные — как куски металла.

Геологам всегда было интересно, как давно в недрах Земли образовались алмазы. Но как это определить? Недавно в руки геологов попали южноафриканские алмазы, содержавшие включения граната в виде красивых мелких кристалликов, в которых оказались небольшие примеси самария. Этот редкоземельный элемент имеет разновидность (изотоп), который очень медленно распадается (период полураспада составляет 106 миллиардов лет). При этом он превращается в другой редкоземельный элемент — неодим. По количеству этого неодима,

зная скорость его образования, можно определить возраст алмаза, т. е. время, когда в него попал самарий. Как показали расчеты, самарий попал в гранат 3,2–3,4 миллиарда лет назад. И если возраст Земли оценивается примерно в 4,6 миллиарда лет, то этот кристалл алмаза ненамного моложе нашей планеты.

И алмаз, и графит – кристаллы. Почему же их свойства так резко отличаются? Это объясняется разным способом соединения атомов углерода друг с другом. В алмазе все связи между атомами углерода одинаковые и прочные, твердым получается и сам кристалл. Кристалл же графита имеет слоистое строение, в нем атомы углерода прочно связаны друг с другом только в одном слое. Такой кристалл похож на пачку бумаги, которую очень трудно разрезать пополам, но легко рассыпать на отдельные листочки.

Алмазы образуются в недрах Земли в условиях очень высоких температур и давлений. Спустя почти два столетия после опыта Лавуазье ученые смогли создать в лаборатории условия, при которых из графита можно получить алмаз. В настоящее время производство искусственных алмазов исчисляется десятками тонн! Есть среди них и ювелирные, но основная масса искусственных алмазов идет на изготовление разнообразных инструментов.

Искусственным путем люди научились получать очень многие драгоценные камни. Например, подшипники для часов и других точных приборов уже давно делают из искусственных рубинов. Получают искусственно и прекрасные кристаллы, которые в природе вообще не существуют. Например, многие слышали о фианитах (их название происходит от сокращения ФИАН – Физический институт Академии наук, где их впервые получили). Бесцветные фианиты на глаз трудно отличить от алмаза – так красиво они «играют» на свету.

Как растет кристалл

Ученых давно интересовало, как образуются кристаллы, почему разные вещества дают кристаллы разной формы, а некоторые вовсе не образуют кристаллов, что надо сделать, чтобы кристаллы получились большими и красивыми. Исследования показали, что кристаллы – это вещества, в которых мельчайшие частички (атомы, ионы или молекулы) упакованы в определенном порядке. Именно этот порядок определяет форму кристалла. А зависит он как от геометрической формы частиц (ионов или молекул), из которых построен кристалл, так и от того, как они друг к другу притягиваются, какими местами могут соприкасаться, а какими – нет. Некоторые вещества кристаллизуются легко, другие – с большим трудом или вовсе не образуют кристаллов. Почему так?

Представьте себе, что вы укладываете паркет, а товарищ подает вам плитки. Легче всего работать с плитками квадратной формы – как ни поверни такую плитку, она все равно подойдет к своему месту, и работа пойдет быстро. Труднее выложить паркет из прямоугольных дощечек, особенно если у них с боков имеются пазы и выступы – тогда каждую дощечку можно уложить на место одним единственным способом. А теперь представьте себе, что помогающий вам товарищ очень торопится и подает плитки быстрее, чем вы успеваете аккуратно укладывать. Понятно, что правильного узора теперь не получится: где-то плитку перекосит, и дальше все пойдет криво, где-то появятся пустоты (как в известной компьютерной игре «Тетрис», когда «стакан» заполняется деталями слишком быстро и вы не успеваете уложить их аккуратно, без промежутков). Ничего хорошего не получится и в том случае, если в большом зале начнут укладывать паркет сразу десятков мастеров – каждый со своего места. Даже если они будут работать не спеша, крайне сомнительно, чтобы соседние участки оказались хорошо состыкованными, и в целом вид у покрытия получится весьма неприглядным: в разных местах плитки будут расположены в разном направлении, а между отдельными участками ровного паркета появятся дыры.

Примерно те же процессы происходят и при росте кристаллов, только сложность здесь еще и в том, что частички должны укладываться не на плоскости, а в объеме. Но ведь никакого «паркетчика» здесь нет – кто же укладывает частички вещества на свое место? Оказывается, они укладываются сами, потому что непрерывно движутся и ищут самое подходящее для себя место, где им будет наиболее «удобно». А удобнее им там, где они сильнее всего связаны с другими частицами в кристалле.

Кристаллизацию обычно ведут при охлаждении раствора. При каждой температуре в данном количестве растворителя (у нас это вода) может раствориться не более определенного количества вещества (рис. 5.5).

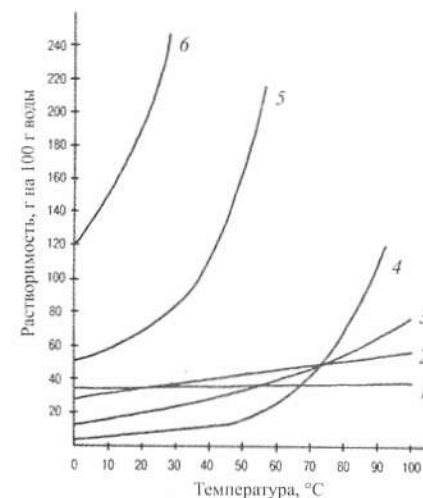


Рис. 5.5. Зависимость растворимости некоторых веществ от температуры (обратите внимание на то, что растворимость поваренной соли почти не меняется с температурой):

1 – хлорид натрия (поваренная соль); 2 – хлорид калия; 3 – медный купорос (обезвоженный); 4 – алюмокалиевые квасцы (безводные); 5 – тиосульфат натрия (безводный); 6 – нитрат аммония (аммиачная селитра)

Например, в 100 г воды при +90 °С может раствориться 54 г хлорида калия — и ни граммом больше. Будем теперь охлаждать раствор. С понижением температуры растворимость большинства веществ уменьшается. Так, при +80 °С в 100 г воды можно растворить уже не более 51 г этой соли. Куда же денутся остальные 3 г? Они выпадут в осадок. Если с осадка слить воду и рассмотреть его в сильную лупу, то мы увидим множество мелких кристалликов. Как они образовались? При охлаждении раствора частички вещества (в данном случае это ионы калия и хлора), которым уже не хватает воды, чтобы находиться в растворенном состоянии, слипаются друг с другом, образуя крошечные кристаллы-зародыши. Если охлаждение медленное, зародышей образуется немного и, обрастая постепенно частичками вещества со всех сторон, они превращаются в красивые кристаллики правильной кубической формы (рис. 5.6).

При быстром же охлаждении центров кристаллизации образуется много, а частички из раствора будут «сыпаться» на поверхность растущих кристалликов, как горох из порванного мешка; конечно, правильных кристаллов при этом не получится, потому что множество быстро растущих кристалликов так же мешают друг другу, как несколько мастеров-паркетчиков в одной комнате. Посторонние твердые примеси в растворе также могут играть роль центров кристаллизации, поэтому чем чище раствор, тем больше шансов, что центров кристаллизации будет немного. Итак, чем чище раствор и чем медленнее он охлаждается, тем лучше. Охладив насыщенный при +90 °С раствор хлорида калия до комнатной температуры, мы получим в осадке уже 20 г, потому что при +20 °С в 100 г воды растворяется только 34 г. Хорошо бы получить один большой кристалл правильной формы массой 34 г! К сожалению, это не так просто: даже если в растворе начнет расти один-единственный кристалл (что сомнительно), он, лежа на дне сосуда, вырастет только сверху и с боков. Поэтому такой кристалл неминуемо получится однобоким.



Рис. 5.6. Большой кристалл хлорида калия (такая же форма и у кристаллов хлорида натрия — поваренной соли)

Есть и другой метод получения из растворов правильных кристаллов — это постепенное удаление воды. «Лишнее» вещество при этом кристаллизуется. И в этом случае чем медленнее удаляется вода, тем лучше получаются кристаллы. Можно, например, просто оставить открытый сосуд с раствором при комнатной температуре на длительный срок — вода при этом будет испаряться очень медленно (особенно если сосуд с раствором прикрыть не-

плотно листом бумаги, который заодно будет защищать раствор от пыли). В промышленных масштабах большие кристаллы часто получают охлаждением расплавленного вещества (рис. 5.7). Форма этого кристалла (его называют «булей») определялась условиями его роста. Если «булю» расколоть, получатся прозрачные кубические кристаллы, такие, как затравочный кристалл вверху, на котором начиналась кристаллизация. Такую же форму имеют рубиновые «були», выращенные при высокой температуре; из искусственных рубинов делают, например, подшипники для осей в часах.

Конечно, хочется получить большой и красивый кристалл побыстрее — но тут уж ничего не поделаешь: придется запастись терпением. В виде утешения можем сообщить, что кристаллы искусственных драгоценных камней тоже растут очень медленно, иногда годами. Если же вы поспешите, то вместо одного красивого кристалла получите массу мелких. Под микроскопом они выглядят замечательно — так же, как замечательно выглядит при сильном увеличении обычный песок, в котором можно найти даже микроскопические драгоценные «камни». Кстати, при сильном увеличении оказывается, что многие невзрачные порошки состоят из очень красивых кристалликов, которые слишком малы, чтобы их можно было увидеть невооруженным глазом. Вам, возможно, приходилось видеть перегоревшие лампочки, в которые попал воздух: стеклянная колба в них покрыта внутри белым или слегка желтоватым налетом. Это оседает на стенки сгоревший в воздухе тугоплавкий металл вольфрам; он соединился с кислородом воздуха и образовал оксид вольфрама. Если взглянуть на невзрачный порошок оксида вольфрама при увеличении в десятки тысяч раз (это возможно при помощи специального электронного микроскопа), то обнаружится удивительная картина (рис. 5.8): молекулы оксида, оседая на стекле, успевают выстроиться в строгом порядке и образуют прекрасно оформленные кристаллики. Трудно сказать, кому и по какому поводу впервые пришлось в голову разглядывать с помощью электронного микроскопа налет на стенках перегоревшей лампы. Но потом ученые заинтересовались этим явлением и стали специально сжигать вольфрам в различных по составу смесях и разглядывать, что при этом получается. Оказалось, например, что если кислород смешать не с азотом, как в

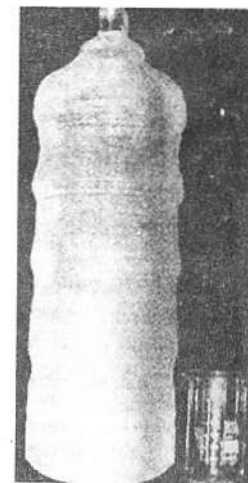


Рис. 5.7. Кристалл хлорида калия, выращенный из расплава

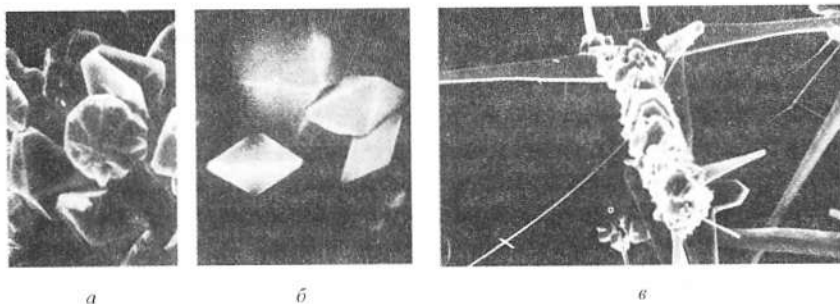


Рис. 5.8. Кристаллы оксида вольфрама (при очень сильном увеличении), образовавшиеся в процессе сгорания вольфрамовой спирали на воздухе (а) и в смеси кислорода и аргона (б), оксида магния – белого порошка, который образуется при горении магния (в) (на старых кинолентах сохранились кадры фотосъемки, на которых фотограф для освещения объекта зажигает порошок магния, после чего видны клубы белого дыма, состоящего из таких мельчайших кристалликов)

обычном воздухе, а с благородным газом аргоном, то кристаллы оксида вольфрама получают в форме восьмигранников – октаэдров.

Подобные эксперименты – не обязательно праздное любопытство (хотя такое тоже случается; как сказал один известный академик, наука – лучший способ удовлетворить свое любопытство за государственный счет). Изучая различные условия формирования кристаллов разных соединений, можно понять, каким законам подчиняются эти процессы, и в результате научиться выращивать нужные кристаллы определенной формы.

Вещества для опытов с кристаллами

Проще всего выращивать кристаллы из водных растворов. Но для этой цели годятся далеко не все растворимые в воде кристаллические соединения. Трудно, например, вырастить большие кристаллы поваренной соли, так как ее растворимость в воде почти не зависит от температуры. Поэтому трудно получить большой затравочный кристалл (что это такое, будет рассказано чуть позже). Не менее трудно получить и большие кристаллы сахара. Здесь причина другая: насыщенный раствор сахара (сахарный сироп) очень вязкий, а вязкие жидкости кристаллизуются с большим трудом. Например, глицерин имеет температуру плавления $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, но попробуйте получить его в кристаллическом виде – вряд ли вам это удастся. Дело в том, что при комнатной температуре глицерин очень вязкий, а при охлаждении становится совсем густым. При этом молекулам глицерина, которые к тому же не очень симметричны, весьма трудно выстроиться в строгом порядке

и образовать кристаллическую решетку. Вместо этого они застывают как попало, образуя прозрачную массу, похожую на стекло. Такое состояние вещества так и называют – стеклообразным. Примером может служить обычное оконное стекло. Если стекло долго держать сильно нагретым, когда частицы в нем достаточно подвижны, в нем начнут расти кристаллы. Такое стекло теряет прозрачность.

Какие же доступные вещества можно использовать для выращивания кристаллов? Вам будет интересно познакомиться с некоторыми из них. В аптеках продаются квасцы (более точно – алюмокалиевые квасцы или двойной сульфат калия – алюминия). Квасцами с древних времен называют различные соли серной кислоты, содержащие два металла, один из которых обычно – алюминий, хром или железо, а второй – калий, натрий и др. Откуда такое название? Еще в «Повести временных лет», датируемой XI веком, описан квас как «особый кислый напиток». До сих пор в польском языке слово «квас» означает «кислота». Так что если вам случится побывать в Польше и зайти в химическую лабораторию, то не вздумайте пить из склянки, на которой написано «Kwas»! В ней не утоляющий жажду вкусный напиток, а кислота.

Квасцы действительно обладают некоторыми свойствами кислот. Например, они имеют кислый вкус. Только не вздумайте проверять это сами! Вкус многих химических соединений (в том числе и исключительно ядовитых, например, синильной кислоты) известен потому, что в прошлом химику, открывшему новое соединение, полагалось описать различные его свойства, в том числе и вкус. Сейчас пробовать на вкус различные вещества в лабораториях считается верхом химической безграмотности.

Алюмокалиевые квасцы применяют при крашении тканей, в кожевенной промышленности – при выделке кож, в бумажной – при проклеивании бумаги (на непроклеенной бумаге – газетной, фильтровальной – чернила будут расплываться). В медицине квасцы применяют как кровоостанавливающее средство – в виде карандаша, а прокаленные (жженные) квасцы, которые хорошо впитывают влагу, используются при повышенной потливости.

В красивых прозрачных кристаллах квасцов содержится также вода, причем в довольно большом количестве, но она не «выливается» из кристаллов, даже если их очень сильно потрясти. Дело в том, что молекулы воды в кристаллах квасцов химически связаны; эту воду так и называют – кристаллизационная. Если квасцы оставить открытыми в сухом воздухе, они начнут выветриваться: это означает, что вода в кристалле связана не очень прочно и постепенно улетучивается. При этом кристаллы теряют свою прозрачность и превращаются в белый

порошок. (Как видим, для выветривания ветер вовсе не обязателен. Геологи выветриванием называют процесс постепенного разрушения горных пород под действием различных природных факторов — перепада температур, дождя и т. д.).

Хорошие кристаллы получаются из медного купороса — красивого синего порошка. Это вещество хорошо известно садоводам, так как его используют для борьбы с вредителями растений. Купорос — тоже старинное название некоторых солей серной кислоты. Современное название медной соли серной кислоты — сульфат меди. В медном купоросе тоже содержится кристаллизационная вода. Если медный купорос сильно нагреть, он полностью потеряет воду и превратится в невзрачный серый порошок безводного сульфата меди. Но стоит только смочить этот порошок водой или просто оставить на влажном воздухе, как синяя окраска появится снова. Так химики узнали, что своим красивым цветом медный купорос и многие другие соединения меди обязаны совместному присутствию положительно заряженных атомов — ионов меди и молекул воды. Кроме медного бывают железный и цинковый купоросы.

Растворимые соли меди, к которым относится и медный купорос, ядовиты не только для вредителей растений, но и для человека. Поэтому при работе с этим веществом надо быть аккуратным, старайтесь организовать работу так, чтобы полностью исключить возможность попадания крупинок синего порошка на пищевые продукты. Для этого используйте посуду, которая не применяется для пищевых целей. Лучше всего такую посуду пометить, например, наклеить на стенку кусочек пластыря с надписью: «Для опытов». После работы с медным купоросом вымойте руки — это соединение хорошо растворяется в воде и потому легко смывается с кожи, особенно если вымыть руки с мылом.

Очень интересные опыты можно поставить с тиосульфатом натрия. Если это вещество не содержит воды, оно имеет вид белого порошка. Если же в тиосульфате есть кристаллизационная вода, он образует прозрачные кристаллики, напоминающие сахарный песок. Тиосульфат натрия хорошо знаком всем фотолюбителям. Они часто называют его «гипосульфитом» и используют в качестве фиксажа (закрепителя) при проявлении фотопленок и печатании черно-белых фотографий. Раствор тиосульфата натрия «закрепляет» полученное фотографическое изображение. Раньше существовало еще одно название этого вещества — «антихлор»: растворы тиосульфата натрия очень быстро обезвреживают ядовитый газ хлор. Это свойство использовали солдаты во время Первой мировой войны: при газовой атаке хлором они дышали через марлю, смоченную раствором тиосульфата.

Тиосульфат натрия не ядовит. Его используют в медицине: наружно — для лечения различных кожных заболеваний, в том числе чесотки; внутрь — при отравлении мышьяком, ртутью, свинцом, синильной кислотой и ее солями; вводят внутривенно — при аллергических и некоторых других заболеваниях. Но это не значит, что вы можете разбрасывать тиосульфат где попало. Даже работая с относительно безвредными веществами, надо быть внимательным и аккуратным! Кроме того, кристаллики тиосульфата очень похожи на крупный сахарный песок, поэтому будьте внимательны, чтобы никто не мог случайно перепутать химикат с пищевым продуктом. На воздухе тиосульфат натрия тоже выветривается, при этом на прозрачных кристалликах появляется белый налет.

И медный купорос, и тиосульфат натрия можно приобрести в магазинах: первый — в торгующих удобрениями, второй — фототоварами.

Выращиваем кристаллы

Многие видные ученые, внесшие большой вклад в развитие химии, минералогии, других наук, начинали свои первые школьные опыты именно с выращивания кристаллов. Опыты эти относительно просты, но их результаты могут вызвать удивление и восхищение даже у людей, весьма далеких от химии и никогда прежде не интересовавшихся этой наукой. Мы уже говорили о том, что кристаллы могут расти при охлаждении горячего раствора или при испарении воды в холодном растворе. Мы будем использовать оба метода. Первый метод используем для получения затравки — кристаллика, из которого будет выращен один большой кристалл, а для его роста воспользуемся уже вторым методом. Чтобы в растворе с растущими кристаллами было меньше центров кристаллизации, работайте с хорошо вымытой посудой, чистой кипяченой водой, старайтесь не загрязнять реактивы и растворы посторонними веществами.

Начнем с выращивания кристаллов квасцов. Как получить хороший кристалл для затравки? Если просто растворить в горячей воде как можно больше вещества (до насыщения) и оставить раствор остывать, температура будет понижаться слишком быстро и образуется слишком много мелких кристаллов. А нам хотелось бы получить кристаллы покрупнее. Чтобы замедлить охлаждение, возьмите маленький термос (объемом 1–2 стакана), насыпьте в него несколько столовых ложек вещества, предназначенного для выращивания кристаллов, залейте кипятком, неплотно закройте термос крышкой и осторожно взболтайте для более быстрого растворения вещества. Поставьте термос в безопасное место на ночь. Несмотря на все предосторожности, вряд ли в тер-

месе вырастет один большой кристалл. Как правило, на следующий день в нем окажется много мелких кристаллов, но среди них вам могут попасться и довольно крупные. Очень важно не прилагать никаких механических усилий, чтобы вынуть кристаллы из термоса — разобьете стекло обязательно! Если в нем образовалась сплошная корка кристаллов, приставшая к стенкам и дну, слейте раствор в отдельную посуду, добавьте в термос немного горячей воды и, взбалтывая ее, дождитесь, пока кристаллы не отделятся друг от друга и не выплывут вместе с водой. Не расстраивайтесь, если во время этой операции кристаллы частично растворятся — их легко будет потом «исправить».

Если дома маленького термоса не найдется или вам не разрешат использовать его для опытов, не переживайте. Неплохие результаты получатся, если приготовить горячий насыщенный раствор в пробирке (ее может заменить аптечная склянка подходящей формы из-под лекарства), снабдив ее снаружи хорошей теплоизоляцией. Теплоизоляцию можно сделать из ваты, пенопласта, поролона, других веществ. Обвяжите хорошо слой теплоизолирующего материала ниткой или проволокой, вставьте полученное неустойчивое сооружение в кружку или банку, чтобы пробирка стояла вертикально. Аккуратно насыпьте в пробирку примерно на 1/5 ее высоты квасцов, залейте до половины кипятком, закройте пробкой или бумагой, а сверху прикройте ватой или другим теплоизолирующим материалом. Дайте пробирке постоять несколько часов.

Аккуратно вытряхните кристаллы, полученные после охлаждения раствора, на лист чистой бумаги (если они не выпадут из пробирки, опустите ее на короткое время в горячую воду). Образовавшиеся кристаллики, пожалуй, вызовут у вас разочарование: какие-то все они кособокие, некрасивые, да и довольно маленькие. Ничего не поделаешь: кристаллов выросло много, и они мешали друг другу при росте. Но зато из этих кристаллов всегда можно выбрать один покрупнее и желательнее не очень уродливый, а уж настоящая красота придет к нему позже. Итак, выберите самый хороший, с вашей точки зрения, кристалл. Остальные вам больше не понадобятся и будут принесены «в жертву» вашему избраннику.

Теперь надо изготовить кристаллизатор, в котором дальнейший рост выбранного кристалла будет происходить по второму способу — путем медленного испарения воды. В качестве кристаллизатора можно использовать стакан, чашку, кружку, стеклянную консервную банку. Еще понадобится банка с пробкой или плотной крышкой — в нее надо пересыпать все остальные кристаллы (остаток неиспользованных квасцов или купороса) и залить все раствором, который у вас остался. В этой банке будет храниться насыщенный раствор квасцов:

назовем его запасным раствором. В запасной раствор надо будет периодически подливать чистую холодную кипяченую воду, следя за тем, чтобы на дне всегда оставалось некоторое количество нерастворившихся кристалликов — тогда запасной раствор над ними всегда будет насыщенным, т. е. таким, в котором при данной температуре вещество больше не растворяется.

Займемся теперь самим кристаллизатором, в котором будет расти кристалл. Сделайте к кристаллизатору крышку — картонный кружок с небольшим отверстием в центре. Возьмите выбранный вами кристалл, обвяжите его тонкой белой ниткой (лучше синтетической), свободный конец нитки пропустите снизу вверх через отверстие в крышке и закрепите нитку на крышке с помощью пластилина или спички так, чтобы кристалл повис в центре сосуда-кристаллизатора, не касаясь дна и стенок (рис. 5.9). Аккуратно залейте кристаллизатор насыщенным запасным раствором квасцов из второй банки, чтобы жидкость полностью покрыла висящий кристалл. Внимание: если раствор будет ненасыщенным, висящий кристаллик растворится и опыт придется начинать сначала. Поэтому следует выдержать запасной раствор над кристаллами не менее суток. И еще одно предупреждение: если банку с запасным раствором вы по какой-либо причине перенесете в более теплое место, раствор в ней сразу станет ненасыщенным; его снова надо будет выдержать сутки перед тем, как подливать в кристаллизатор. Вообще банка с запасным раствором и кристаллизатор должны стоять поблизости, при одной температуре.

У вас может возникнуть и такая проблема: после охлаждения горячего раствора вы не найдете среди выпавших кристаллов достаточно большого и хорошего, чтобы его можно было подвесить на нитке. В таком случае просто положите кристаллик побольше на дно кристаллизатора и залейте его насыщенным запасным раствором. Раз в день поворачивайте кристаллик с боку на бок, и через некоторое время он подрастет — тогда его без труда можно будет подвесить.

Кристалл, подвешенный на нитке, имеет то преимущество, что может свободно расти во все стороны, поэтому со временем он примет правильную форму, свойственную данному веществу. Для алюмокалиевых квасцов эта форма — октаэдр. Даже если сначала кристалл имел неправильную форму, он рано или поздно все равно превратится в октаэдр.

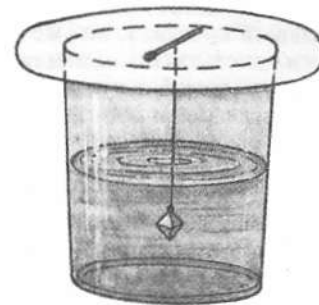


Рис. 5.9. Так растет подвешенный на нитке кристалл в насыщенном растворе при медленном испарении воды

Более того, если кристалл с правильной формой специально испортить, например, отбить у него вершины, повредить ребра и грани, то при дальнейшем росте в насыщенном растворе такой кристалл начнет самостоятельно «залечивать» свои повреждения! Ученые проводили такие опыты: правильный красивый кристалл, например октаэдр, обточили так, что получился шар. И все равно из него в растворе снова образовался кристалл такой формы, которая характерна именно для этого вещества. Только учтите, что если «покалеченный» кристалл слишком большой, у вас может просто не хватить запасного раствора для восстановления его первоначальной формы — ведь во время «лечения» кристалл продолжает непрерывно расти. Поэтому понаблюдайте, как это происходит с маленьким затравочным кристаллом, который вы подвесили на ниточке: вы увидите, как постепенно «нужные» грани будут увеличиваться, вытесняя «неправильные».

Итак, кристалл начал расти. Во избежание неправильного роста, постарайтесь, чтобы температура кристаллизатора не менялась со временем, чтобы растущий кристалл был всегда покрыт слоем насыщенного раствора, который надо периодически подливать, и чтобы стенки и дно кристаллизатора, нить и сам растущий кристалл не обрастали новыми маленькими кристалликами. Для этого время от времени проводите чистку кристаллизатора: сливайте на время раствор из него и удаляйте наросты кристаллики, перенося их в запасной раствор. Лучше всего кристалл растет, когда он со всех сторон окружен раствором. В лабораториях для этого раствор перемешивают, а вот ребята из химического кружка при криворожской станции юных техников приспособили для той же цели... старый будильник (рис. 5.10).

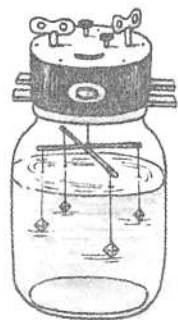


Рис. 5.10. Кристаллы, насаженные на ось минутной стрелки будильника, медленно вращаются, омываясь насыщенным раствором вещества

Размер кристалла, который можно вырастить таким образом, теоретически безграничен. Известны случаи, когда энтузиасты выращивали кристаллы такой величины, что могли их поднять только с помощью товарищей. Вы же ограничены количеством имеющегося вещества. Важен также и размер кристаллизатора: лучше, чтобы в конце опыта, когда запасного раствора останется мало, кристалл оказался бы как можно ближе к стенкам кристаллизатора — тогда запас вещества будет использован максимально эффективно. Этому же способствуют прямые стенки кристаллизатора — без сужения вверху. И еще: большой кристалл рано или поздно оборвет нитку. Ничего страшного — он будет расти на дне кристаллизатора, только не забывайте при этом раз в несколько дней поворачивать его на другой бок, чтобы

все грани росли равномерно. Готовый кристалл покройте бесцветным лаком, чтобы предохранить его от выветривания. Точно так же поступают и при выращивании кристалла медного купороса. Он, в отличие от кристалла квасцов, несимметричен, но тоже очень красивый. Не забывайте после работы с медным купоросом тщательно мыть руки!

Переохлажденные растворы

Вы уже знаете, что в США температуру принято измерять в градусах Фаренгейта. В поисках постоянных точек для придуманной им температурной шкалы Фаренгейт наблюдал замерзание и плавление различных веществ. Однажды, проводя опыты с чистой водой, Фаренгейт обнаружил удивительное явление: вода в закрытой посуде не замерзла в течение ночи на сильном морозе! Но стоило ему открыть банку, как вода начала стремительно замерзать: возникло множество игольчатых, быстро растущих кристаллов льда. Кристаллизация происходила также и при резком встряхивании банки. Повторив опыты с водой и различными растворами, Фаренгейт убедился, что это не такое уж редкое явление. Оно было названо переохлаждением.

В начале XIX века петербургский академик Иоганн Тобиас (в России его имя переименовали на Товий Егорович) Ловиц (1757—1804) наблюдал похожее явление — пересыщение раствора. Оказалось, что в чистом закрытом сосуде горячий насыщенный раствор можно охладить, а кристаллы из него не выпадут. Но если в такой пересыщенный раствор внести маленький кристаллик, в нем начнется массовый рост больших кристаллов. Ловиц так образно описал это явление: «Мне представилось, будто находящиеся в растворе соляные частицы борются за преимущество первой выделиться из воды и что та частица, которой это удалось, подобно полководцу, подает сигнал другим следовать за собой».

Раствор, который содержит в определенном количестве растворителя больше растворенного вещества, чем это «положено» при данной температуре, называется пересыщенным раствором. Пересыщенный раствор невозможно получить даже очень длительным перемешиванием кристаллов с растворителем, он может образоваться только путем охлаждения горячего насыщенного раствора. Поэтому такие растворы называют также переохлажденными. В них что-то мешает началу кристаллизации, например, раствор слишком вязкий или для роста кристаллов требуются большие зародыши, которых в растворе нет. Но если в переохлажденный раствор внести готовый зародыш, например, маленький кристаллик того же вещества, то начнется бурная кристаллизация. Интересно, что быструю кристаллизацию вызывает кристалл только того вещества, которое подвергается кристаллизации, а к постороннему веществу раствор совершенно безразличен.

Этот красивый опыт мы проведем с тиосульфатом натрия. Насыпьте немного данного вещества в пробирку (примерно до середины) и плотно закройте ее кусочком ваты. Осторожно опустите нижнюю часть пробирки в горячую, но не кипящую воду; при этом уровень горячей воды должен быть выше уровня кристаллов в пробирке. Когда содержимое пробирки нагреется примерно до $+56\text{ }^{\circ}\text{C}$, кристаллы «расплавятся». В действительности это не плавление, а растворение тиосульфата натрия в «собственной» кристаллизационной воде. С повышением температуры растворимость тиосульфата натрия, как и большинства других веществ, увеличивается, и при $+56\text{ }^{\circ}\text{C}$ его собственной кристаллизационной воды оказывается достаточно, чтобы растворить в ней весь имеющийся тиосульфат. Если кристаллы тиосульфата частично выветрились и имеют белый налет, добавьте к ним перед нагреванием несколько капель воды. Медленно и осторожно, избегая резких толчков, поставьте пробирку в стакан или баночку для охлаждения. Если пробирка была чистая, то при ее охлаждении кристаллы не выпадут.

«Поможем» пересыщенному раствору тиосульфата перейти в нормальное состояние (напомним, что «нормальным» при комнатной температуре состоянием для нашего вещества является твердое). Для этого прикрепите небольшой кристаллик тиосульфата к концу стеклянной палочки с помощью кусочка пластилина. Осторожно откройте пробирку и внесите в нее палочку так, чтобы кристаллик коснулся поверхности раствора. Произойдет настоящее чудо: от кристаллика побежит фронт кристаллизации, который быстро дойдет до дна пробирки (рис. 5.11). Так что уже через несколько секунд жидкость в пробирке полностью «затвердеет». Вы можете перевернуть ее — из пробирки не выльется ни одной капли! Твердый тиосульфат можно снова расплавить в горячей воде и повторить все заново. Понаблюдайте внимательно, как растут кристаллы в пересыщенном растворе — зрелище очень красивое. Попробуйте поставить пробирку с переохлажденным раствором в ледяную воду, а потом внести затравку: кристаллы будут расти медленнее, но более крупными.

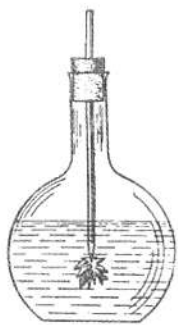


Рис. 5.11. Так начинают расти кристаллы тиосульфата в пересыщенном растворе тиосульфата

Этот опыт вполне можно показывать как фокус с «волшебной палочкой», которая превращает «воду» в «лед». Можно вообще обойтись без палочки, а незаметно бросить кристаллик в пробирку, сопровождая это соответствующими «заклинаниями». А можно сделать и так: прикрепленный к концу палочки кристаллик покрыть очень тонким слоем воска или парафина (предварительно парафин надо расплавить). Если палочка чистая, ее можно внести в раствор — и ничего

не произойдет. Но стоит надавить концом палочки на дно, как слой воска нарушится, раствор получит доступ к затравочному кристаллу и начнется быстрая кристаллизация, только на этот раз — со дна пробирки. Конечно, палочку теперь из застывшей массы не вытащить, пока вещество не будет снова расплавлено. Момент надавливания палочкой на дно можно также обставить как фокус, который практически невозможно разгадать: например, зрители хором считают до десяти, и на счет «десять» жидкость начинает твердеть. В общем, тут все зависит от вашей фантазии. Единственное замечание: в ходе повторных опытов вода понемногу испаряется, поэтому время от времени следует добавлять в пробирку несколько капель чистой воды. Если у вас есть немного глицерина, его полезно добавить (1–2 капли) в пробирку: глицерин помогает пересыщенному раствору оставаться в жидком состоянии в течение длительного времени.

«Золотой дождь» из кристаллов

Этот опыт мы ставить дома не будем, так как для его подготовки нужны специальные реактивы. Но вы можете провести опыт в школьном кружке или же просто прочитать здесь о нем и узнать кое-что интересное. Опыт этот имеет красивое название «золотой дождь». заключается он в том, что в пробирку с водой вносят небольшое количество (несколько миллиграммов) желтого порошка и помещают пробирку в кипящую воду. Порошок полностью растворяется. После охлаждения в растворе образуются замечательные тончайшие листочки, как будто изготовленные из чистого золота. При осторожном взбалтывании раствора они начинают плавать в жидкости, поблескивая на свету.

Что же это за порошок? К золоту он не имеет никакого отношения. (Помните поговорку «Не все то золото, что блестит»?) Желтое вещество — это соединение свинца с иодом — иодид свинца.

Опасны ли опыты с иодидом свинца? Вы, конечно, слышали, что свинец и его соединения очень ядовиты. Попадая в организм даже в малых количествах, свинец почти не выводится, а накапливается, в основном в костях, и при этом ядовитое действие усиливается год от года. В то же время свинец очень широко используется — из свинца и его сплавов делают оболочки кабелей, пластины аккумуляторов, типографские краски. Многие слышали о ядовитом этилированном бензине — в него для повышения мощности двигателя добавляют очень ядовитую этиловую жидкость, содержащую тетраэтилсвинец. После сгорания бензина свинец (в основном в виде соединения с бромом) попадает в выхлопные газы и загрязняет окружающую среду, особенно обочины дорог. Поэтому и не рекомендуется собирать грибы и ягоды вблизи автомобильных дорог.

Однако ядовиты только растворимые соединения свинца, например, раствор свинца в уксусной кислоте (так называемый «свинцовый сахар», из которого делают свинцовую примочку). Эти соединения при попадании в организм способны пройти сквозь стенку кишечника и всосаться в кровь. Но иодид свинца растворяется очень плохо: при комнатной температуре в 1 г воды растворяется всего 0,0007 г этого вещества, тогда как опасная для человека доза свинца измеряется граммами. Поэтому иодид свинца в малых количествах не опасен (по сравнению с более растворимыми соединениями свинца).

В качестве другого похожего примера можно привести металл барий, все растворимые соединения которого очень ядовиты. Но когда человеку делают рентген желудка, ему дают предварительно выпить «бариевую кашу» — водную взвесь сульфата бария, который в воде не растворяется, и поэтому полностью выводится из организма. Едят же эту «кашу» потому, что барий не пропускает рентгеновские лучи и таким образом позволяет разглядеть на экране очертания желудка и кишечника в виде тени на светлом фоне. Еще один аналогичный пример — каломель, нерастворимое соединение ртути. Раньше каломель применяли в медицине как слабительное, желчегонное и мочегонное средство. Сейчас ее используют только наружно — в виде мазей.

Выращиваем кристаллы меди

В последнем опыте с кристаллами мы вырастим из медного купороса кристаллы... меди. Да-да, это не опечатка: именно металлической меди! Но разве можно вырастить кристаллы металла? А почему бы и нет? Кристаллы меди получают даже на уроках химии, проводя реакцию железа с раствором медного купороса. Когда в раствор соли меди погружают железный гвоздь, железо, как более активный металл, вытесняет медь из ее соединения. При этом гвоздь покрывается красным медным налетом. Так вот, это самые настоящие кристаллы меди. Только они такие маленькие, что различить отдельные кристаллики можно только с помощью очень сильного (электронного) микроскопа.

Бывают кристаллы металлов и покрупнее. Например, на поверхности только что застывшего расплавленного цинка или на его изломе, а также на новом оцинкованном ведре отчетливо видны кристаллы этого металла. Русский металлург Дмитрий Константинович Чернов (1839–1921), один из основателей современного металловедения, описал в 70-х годах XIX века кристалл стали, найденный им внутри 100-тонного металлического слитка. В полости застывшей стальной отливки вырос ветвистый кристалл длиной более 40 см — самый большой из известных металлических кристаллов.

Теперь вы уже знаете, в каких случаях кристаллы получаются мелкими и что надо сделать, чтобы они выросли крупнее. На поверхности гвоздя медь выделяется очень быстро, поэтому и кристаллы ее слишком мелкие. Огромная стальная болванка застывала очень медленно, поэтому и кристалл в ней вырос большой. Значит, чтобы вырастить кристалл меди побольше, процесс выделения металлической меди из раствора на поверхности железа надо замедлить. Сделать это можно таким способом. Возьмите небольшую стеклянную банку. На дно ее положите несколько кристаллов медного купороса (лучше взять кристаллы покрупнее). Как выращивать такие кристаллы, вы уже знаете, а после выращивания одного большого кристалла медного купороса у вас наверняка еще осталось некоторое количество этого вещества в виде насыщенного раствора — из него путем медленного испарения можно получить несколько кристаллов для данного опыта. Засыпьте кристаллы на дне банки слоем тонко помолотой поваренной соли толщиной несколько сантиметров. На соль положите кружок фильтровальной бумаги, который должен доходить до стенок банки. А уже на этот кружок положите еще один — железный, диаметром чуть поменьше. Такой кружок можно вырезать, например, из крышки старой консервной банки. (Только не порежьтесь о ее острые края!) С крышки с помощью наждачной бумаги надо счистить тонкий слой олова. Приготовьте в отдельной посуде насыщенный раствор поваренной соли и аккуратно налейте его в банку так, чтобы он покрывал железный кружок. Закройте банку крышкой поплотнее, поставьте ее куда-нибудь в сторону и ждите. Что произойдет, можно предсказать заранее. Медный купорос начнет медленно растворяться в рассоле. Рассол — не чистая вода, растворимость купороса в нем меньше. Ионы меди будут очень медленно подниматься вверх (этот процесс называется диффузией). За ним можно наблюдать сквозь прозрачные стенки банки по движению окрашенной границы. Обратите внимание на то, как изменится цвет ионов меди в присутствии хлорид-ионов поваренной соли. Достигнув железной пластинки, ионы меди начнут превращаться в атомы металла. Но так как процесс этот будет происходить очень медленно (потому что ионы меди подходят к пластинке с малой скоростью), образующиеся понемногу атомы меди будут успевать выстраиваться в красивые блестящие кристаллы металлической меди. Иногда эти кристаллы сростаются, образуя гроздь — дендриты. Меняя условия опыта (температуру, размер кристаллов купороса, толщину слоя соли и т. п.), можно менять условия кристаллизации меди. Когда вы закончите опыт (а он может продолжаться 1–2 недели и больше), извлеките полученные медные кристаллы. Чтобы они оставались такими же блестящими и не потускнели со временем, их надо покрыть бесцветным лаком или же хранить в плотно закупоренной баночке (например, из-под пенициллина), залитой доверху водой, в которую добавлено несколько капель уксуса. Это предохранит поверхность меди от окисления кислородом воздуха.

ХИМИКИ РАЗГАДЫВАЮТ ТАЙНЫ СВЕЧЕНИЯ



Свет «горячий» и «холодный»

Из многих загадок природы явления, связанные со светом и цветом, — одни из самых удивительных. Поразительно многообразие цветов в природе. Чтобы убедиться в этом, не обязательно ехать в тропические страны (или в зоопарк), где глаза разбегаются от богатства красок на оперении экзотических птиц и бабочек. Походите по осеннему лесу или парку: «пышное природы увяданье», которое так любил А. С. Пушкин, радует глаз тысячами оттенков зеленого, желтого, красного. Все это — результат химических реакций, интенсивность протекания которых в зеленой траве и зеленых листьях зависит от продолжительности светового дня и температуры окружающей среды.

Изменение цвета веществ при химических реакциях привлекало внимание людей с давних пор, когда химии как науки не было еще и в помине. Используя метод проб и ошибок, древние научились, например, окрашивать белую ткань в прекрасный пурпурный цвет, не зная ничего о сущности происходящих при этом химических превращений. Не знали они и о том, что окраску предмета мы можем обнаружить лишь в результате избирательного поглощения краской отдельных цветов из смеси всех «цветов радуги», т. е. из белого света. Если предмет, освещаемый естественным «белым» светом, полностью его отражает и не поглощает лучи какого-либо одного цвета, то он кажется нам белым, как снег (недаром существует красивое слово «белоснежный»). Если же предмет поглощает все «радужные цвета» и ничего не отражает, то он будет черным даже при самом сильном освещении. Все это стало известно сравнительно недавно, а в древности некоторые философы были уверены, что мы видим предметы потому, что человеческий глаз, испуская свет, как бы «ощупывает» им различные тела.

Многие из вас знают, как запомнить последовательность «радужных цветов» — с помощью смешной фразы, в которой первая буква каждого слова совпадает с первой буквой соответствующего цвета радуги: «Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан». Физики придумали другую, более смешную, фразу: «Как Однажды Жак-Звонарь Город-

ской (или Головой?) Сломал Фонарь». А компьютерные оформители и дизайнеры, которые пользуются программой PhotoShop, придумали свою фразу: «Каждый Оформитель Желает Знать, Где Скачать Фотошоп». Вы можете попробовать придумать что-нибудь свое, не менее смешное, и даже провести небольшой конкурс. Только следует иметь в виду, что на самом деле эти семь цветов никто в радуге практически не видит. Например, в английской детской песенке перечислены только шесть цветов. Правда, следует учесть, что в английском языке нет слова, соответствующего русскому слову «голубой»: этот цвет обозначается сочетанием «light-blue» или «sky-blue», т. е. «светло-синий» или «небесно-синий».

*«Red and Orange,
Green and Blue,
Shiny yellow,
Purple too.
All the colors that we know
Live up in the rainbow».*

Что в переводе означает:

*«Красный и Оранжевый,
Зеленый и Синий,
Ярко-желтый,
А также Фиолетовый.
Все цвета, которые мы знаем,
Живут в радуге».*

Вообще понятие «семь цветов радуги» и «деление» видимого спектра на семь цветов — достаточно условное. Реально в радуге редко можно увидеть больше четырех цветов. Вероятно, Ньютон, который экспериментировал с разложением света с помощью призмы и подсчитывал число получившихся цветных полосок, достаточно произвольно выбрал «магическое число» 7, хотя, с другой стороны, для человека, всерьез интересовавшегося алхимией, этот выбор мог быть отнюдь не случайным. Число 7 с древности считалось особенным: число дней недели равно семи; звуки музыкальной гаммы состоят из семи ступеней (но если брать полутона, то в хроматической гамме получится не 7, а 12 тонов, а кроме того, известны и другие способы деления звукового ряда: пентафоника, додекафония...); во времена Ньютона были известны семь планет (Меркурий, Венера, Земля, Луна, Марс, Юпитер, Сатурн); это число упоминается в старой алхимической поговорке «семь металлов создал свет по числу семи планет» (в древности

были широко известны именно семь металлов — золото, серебро, медь, железо, свинец, олово, ртуть), а также во многих других пословицах и поговороках («семь пядей во лбу», «семеро с ложкой, один с сошкой» и т. д.). Кстати, вот еще один повод устроить соревнование: кто за определенное время вспомнит больше таких пословиц и поговорок.

Но вернемся к химии... Не счесть химических реакций, в результате которых образуются или исчезают окрашенные вещества. Недаром некоторые из них в старину называли хамелеонами: подобно этим животным, они изменяли свой цвет в зависимости от условий опыта. Некоторые химические элементы обязаны своим названием окраске, которая характерна для них или для их соединений. Например, название хлора произошло от греческого слова, означающего «желто-зеленый»; хром на том же языке — «краска» (из яркоокрашенных соединений хрома можно получать хорошие краски); название металла рублидия и камня рубина произошло от латинского *ruber* — «красный» (соединения рублидия окрашивают пламя в темно-красный цвет); раствор металла родия в царской водке окрашен в розовый цвет (по-гречески «родон» — «роза»); соединения индия окрашивают пламя в синий цвет, напоминающий цвет синей краски индиго; «иодес» по-гречески — «фиолетовый», такой цвет имеют пары иода; «ирис» по-гречески — «радуга»: соединения металла иридия окрашены в различные цвета; соединения металла цезия окрашивают пламя в голубой цвет, *cesius* на латыни — «небесно-голубой».

Вы, конечно, знаете, что без света нет и цвета; недаром говорят, что в темноте все кошки серы. Химия цвета, точнее, химия красителей — большая отдельная область науки, ей посвящено много книг, в том числе и популярных. Здесь же мы поговорим о том, без чего нет цвета, т. е. о свете, вернее, об источниках света. Испокон веков свет и тепло были неразрывно связаны. Сколько люди помнили себя, они знали только два источника света и тепла — огонь на земле и солнце на небе. Они догадывались, что без солнечного света и тепла жизнь невозможна, поэтому не удивительно, что у многих древних народов солнце было одним из главных богов. В древнеегипетской мифологии солнце — вселенский царь, который сотворил всех существ, в том числе и людей, а земной царь — солнечный сын. Но избыток огня так же губителен, как и его отсутствие; люди видели, что бывает в жаркие засушливые годы, слишком хорошо знали они и разрушительную силу пожаров. Вы, наверное, слышали древнегреческий миф о Гелиосе — боге солнца: греки рассказывали, как ежедневно на четверке коней, в золотой колеснице, выезжает солнечный бог на небо. Он старается не подниматься слишком высоко, чтобы не сжечь небо, и не опускаться слишком низко, чтобы не спалить землю. Но однажды заведенный

в мире порядок был нарушен, и вместо солнечного бога в колесницу сел его смертный сын Фаэтон. Напрасно отговаривал Гелиос сына от этой затеи. Слишком хотелось юному и горячему Фаэтону доказать всем вокруг, что он сын бога солнца. Не справился юноша с конями, и они понесли, не разбирая дороги, и чуть не погубили землю. Погиб и дерзкий Фаэтон.

Менее известен древнекитайский миф об искусном стрелке, которого звали И: когда на небе появилось сразу десять солнц, И избавил людей от засухи, поразив из лука девять из них. Об уничтожении героем-лучником «лишних» солнц можно прочитать и в мифах народов нижнего Амура и Сахалина.

В противоположность солнечному теплу и свету, ночью землю освещал «холодный» свет луны и звезд. Происхождение всех этих природных источников света было неведомо людям вплоть до новейших времен. Еще в 1620 году английский философ Фрэнсис Бэкон, систематизировав известные данные о тепле и холоде, отнес к теплым, или положительным, инстанциям «солнечные лучи, преимущественно летние и полуденные», а к холодным, или отрицательным, инстанциям — «лучи луны, звезд и комет».

Свет, не связанный с нагреванием тел, т. е. «холодный свет», поражал воображение людей в не меньшей степени, что свет «горячий». Упоминание о «холодном свете» встречается в легендах, сказках и песнях разных народов; этот свет связывали с чудесами и волшебством. В сказке поэта и просветителя Петра Павловича Ершова (1815—1869) «Конек-горбунок» есть строки, посвященные «чудесному огню»:

*Огонек горит светлее,
Горбунок бежит скорее.
Вот уж он перед огнем.
Светит в поле словно днем.
Чудный свет кругом струится,
Но не греет, не дымится.
Диву дался тут Иван.
«Что, — сказал он, — за шайтан!
Шапок пять найдется свету,
А тепла и дыма нету.
Эко чудо-огонек!»*

Сейчас «холодным светом» никого не удивишь: вечером на улицах можно видеть рекламные огни, которые «светят, но не греют»; светятся экраны телевизоров и компьютеров, таблички «ВЫХОД» — в залах театров и кинотеатров, светятся цифры и стрелки на некоторых часах, светятся ночью волны в океане и светлячки в лесу — всего не перечис-

лишь. Что же вызывает свечение тел? Происходят ли при этом химические реакции?

Мы расскажем о нескольких естественных и искусственных источниках света. Их излучение — следствие физических, химических и биологических процессов. Соответственно в исследованиях, изобретениях, технических разработках этих источников принимали участие ученые разных специальностей.

Излучение раскаленных тел

Самый «универсальный» способ заставить тело испускать свет — сильно нагреть его. Так излучают свет сильно нагретый металлический прут, спираль электроплитки, электрическая лампочка, Солнце и звезды, свечка, факел и другие горящие вещества (рис. 6.1). Чем выше температура, тем более энергично движутся атомы в веществе. При достаточно сильном нагреве атомы любого вещества, сталкиваясь друг с другом, способны возбуждаться, при этом находящиеся в них электроны приобретают дополнительную энергию. Чем выше температура, тем с большей силой сталкиваются атомы, тем больше энергии способны запасти электроны.



Рис. 6.1. Яркое зарево в ночном небе от горящего водорода, которым был наполнен немецкий дирижабль «Гинденбург». Катастрофа произошла 6 мая 1937 года во время визита дирижабля в американский штат Нью-Джерси. Примерно 190 000 м³ водорода сгорело менее чем за 5 минут, унеся жизни 35 человек. Причина пожара так и не выяснена. Современные дирижабли (и воздушные шары) наполняют негорючим (хотя и дорогим) гелием

Однако долго «излишек» энергии они удержать не могут: через очень короткое время (а практически — мгновенно) электроны теряют запасенную энергию, возвращая ее в виде фотона — «частицы» света (по-гречески «фотос» — родительный падеж слова «фос» — «свет»). Разные электроны разных атомов при нагреве запасают (а затем испускают) разную энергию. Поэтому нагретое тело излучает фотоны разного цвета. Чем меньше энергия фотона, тем «краснее» свет, а чем энергия выше, тем свет «голубее». При очень слабом нагреве вещества фотоны имеют такую низкую энергию, что глаз их не воспринимает: они «греют», но не светят. Свет, состоящий из таких фотонов, называется инфракрасным, потому что он находится за пределами красной области спек-

тра и невидим (на латыни *infra* — «под», инфракрасный свет как бы находится «под» видимым светом). Много инфракрасных лучей испускает, например, хорошо протопленная печка.

Если постепенно повышать температуру тела, оно начинает светиться, и по цвету его свечения опытный металлург может определить температуру раскаленного металла. При +500... +600 °С появляется темно-красный цвет, чуть заметный в темноте, при +600... +800 °С цвет становится вишнево-красным, при +800... +1000 °С — ярко-красным, при +1000... +1100 °С — желтым, а если вещество нагреть еще сильнее, оно начнет испускать белый свет (недаром говорят: «довести до белого каления»). Конечно, сильно раскалить можно далеко не все тела. Даже многие металлы сгорят на воздухе намного раньше. И тем более это не получится с деревом или пластмассой. Возьмем, например, спираль от электроплитки (она сделана из тугоплавкого сплава) и начнем пропускать через нее все более сильный электрический ток. Сначала спираль остается темной, хотя и горячей, а потом начинает светиться. Сперва свет будет чуть заметен в темноте («красное каление»). Затем, с повышением температуры, цвет станет ярко-красным, потом желтым, а когда вещество будет нагрето «до белого каления» (как угли электрической дуги), в его излучении появятся все цвета радуги. Правда, спираль плитки до белого каления нагреть не удастся — сплав никеля и хрома (нихром), из которого она сделана, еще раньше расплавится или сгорит на воздухе. А вот тугоплавкую и химически стойкую платину можно нагреть очень сильно; на расплавленную платину (+1770 °С) невозможно даже смотреть с близкого расстояния — настолько яркий свет она испускает. Еще сильнее — до многих тысяч градусов можно нагреть вещества в газообразном состоянии. Сильно раскаленное тело, кроме инфракрасных и видимых лучей, испускает также ультрафиолетовые лучи (они находятся за пределами фиолетовой части спектра; на латыни *ultra* — «сверх»). Чем выше температура тела, тем оно ярче светит и тем больше испускает ультрафиолетовых лучей. Так светятся все нагретые тела, в том числе наше Солнце и звезды; по цвету звезды астрономы могут определить ее температуру (вероятно, вам не надо говорить, что Луна и планеты сами не светятся, а лишь отражают солнечный свет).

Когда горит свеча или факел, светятся мельчайшие раскаленные частички угля в пламени. Их температура не так высока, поэтому пламя красноватое. В пламени природного газа, если воздуха для горения достаточно, раскаленных частичек угля практически нет, поэтому такое пламя почти бесцветное. Когда в XIX веке появились первые газовые фонари, их пламенем сильно нагревали специальные «калильные сетки», изготовленные из оксидов тория и других редких металлов. Раскаленные сетки испускали яркий свет, которым освещали по ночам улицы. Вечером специальные рабочие должны были зажечь каждый фонарь, а утром — погасить его. Конечно, это было неудобно. С появлением до-

статочной дешевой электроэнергии инженеры, разрабатывая конструкцию электрической лампочки, перебрали массу различных материалов для светящегося волоска: ведь чем сильнее его нагреть током, тем ярче он будет светиться, тем ближе его свет будет к дневному. После многих неудач остановились на тугоплавком металле вольфраме, который плавится при очень высокой температуре (+3420 °С). Но это все равно намного меньше, чем температура поверхности Солнца (+6000 °С). Кроме того, спираль нельзя очень сильно нагревать, так как задолго до своего плавления вольфрам начинает испаряться и лампочка быстро перегорает. Первые лампочки светили тусклым красноватым светом, а срок службы у них измерялся всего лишь десятками часов. Чтобы поднять температуру спирали, лампочки стали заполнять газами, которые с вольфрамом не реагируют. Молекулы газов чисто механически мешают атомам вольфрама покидать спираль. Чем тяжелее молекулы газа, тем лучше они справляются со своими обязанностями. Современные криптоновые лампочки светят намного ярче, а гореть могут тысячи часов (такие лампочки легко отличить по их грибовидной форме).

Однако и это не удовлетворило ученых. Они научились «залечивать» вольфрамовую спираль в том месте, где она становится тоньше и вот-вот может перегореть (как известно, «где тонко, там и рвется»). Конечно, никто лампочку для этого не разбирает: «лекарство» закладывают в нее еще на заводе. Это «лекарство» — крошечный кристаллик обыкновенного йода, водно-спиртовой раствор которого есть в каждой домашней аптечке. Как же йод «лечит» раскаленную спираль? Химики

обнаружили, что если в лампу ввести немного иодных паров, они образуют с атомами вольфрама, которые уже покинули спираль, летучие химические соединения. Когда эти соединения случайно оказываются вблизи раскаленной спирали, они от сильного жара распадаются, атомы вольфрама возвращаются куда им положено — на спираль, а молекулы йода, оставаясь в газовой фазе, начинают искать новых «беглецов», чтобы водворить их на прежнее место. Благодаря этой хитрости температуру вольфрамовой спирали в таких лампах (их еще называют галогенными) (рис. 6.2) можно значительно повысить. Вы, возможно, видели, насколько ярче

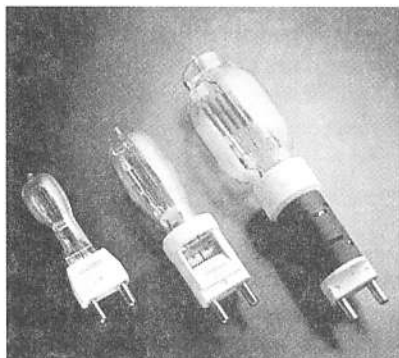


Рис. 6.2. Эти сравнительно небольшие по размеру галогенные лампы дают исключительно яркий свет: их мощность (она написана на цоколе) составляет 2000, 5000 и 10 000 ватт, а максимальный диаметр колбы — всего 38, 60 и 90 мм соответственно. Одна такая лампа может осветить огромный зал

горят галогенные лампы (например, в фарах новых моделей автомобилей, в кинопроекторах) по сравнению с обычными.

Кстати, с помощью такого «йодидного» метода сейчас получают некоторые металлы очень высокой степени чистоты. Для этого загрязненный металл нагревают в парах йода, при этом образуется летучее соединение йода только с атомами данного металла. Полученное газообразное соединение переносят в другую часть реактора, где его вводят в контакт с раскаленной проволокой из того же металла, но только предварительно хорошо очищенного. Когда летучее соединение металла с йодом начинает на этой проволоке разлагаться, выделяющиеся пары йода отводят в то место реактора, где находится загрязненный металл, а на проволоке начинают расти кристаллы выделенного металла очень высокой чистоты (рис. 6.3).

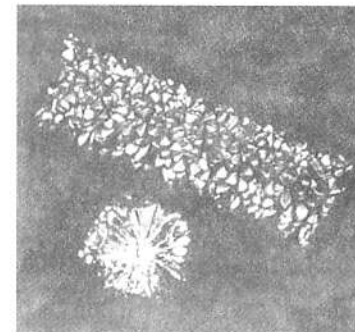


Рис. 6.3. Кристаллы циркония, очищенные «йодидным методом»

Возбуждать электроны в атомах, чтобы они начали испускать свет, можно и по-другому. Например, в лампах дневного света свет испускают ртутные пары, а энергию атомы ртути получают за счет электрического разряда. Если трубку для такой лампы сделать из специального стекла, пропускающего ультрафиолетовый свет, то лампа будет гореть бледно-синим светом, испуская также невидимые ультрафиолетовые лучи, которые убивают микробов. Такие лампы называют бактерицидными, их устанавливают в больницах и поликлиниках и периодически включают для стерилизации помещений.

Если трубку для лампы сделать из обычного стекла, но покрыть ее изнутри специальным белым порошком — люминофором (о люминофорах мы еще поговорим), то этот порошок, поглощая вредный для глаз ультрафиолет, сам начнет светиться белым светом. Иногда этот свет имеет приятный желтоватый оттенок, который придает ему сходство с солнечным светом, соответственно бывают люминесцентные лампы дневного, белого, тепло-белого и холодно-белого света. Эти лампы значительно экономичнее ламп накаливания: современная 11-ваттная люминесцентная лампа дает света столько же, сколько 75-ваттная лампа накаливания! Срок службы люминесцентных ламп также в несколько раз больше. Еще одно преимущество — давление паров ртути в люминесцентной лампе низкое, поэтому ее трубка чуть теплая, случайно до нее дотронувшись, невозможно обжечься, значит, уменьшается опасность возгорания или оплавления пластмассового светильника. Но есть у люминесцентных ламп и неприятная особен-

ность: в них содержится немного ртути, и когда такие лампы просто выбрасывают на свалку, где они быются, это приводит к загрязнению воздуха и почвы ядовитым металлом.

Если к парам ртути в лампе добавить под давлением инертный газ, а трубку сделать из тугоплавкого кварцевого стекла, можно значительно повысить температуру и получить лампу типа «горное солнце». Именно такими лампами нас облучают в поликлиниках, когда врач назначает «кварц». Сейчас кварцевые ультрафиолетовые лампы можно купить в магазине и использовать для загара в зимнее время (особенно в северных районах страны, где мало естественного солнечного ультрафиолета). Однако необходимо очень строго придерживаться инструкции, чтобы не получить ожога (особенно надо беречь глаза), а еще лучше — проконсультироваться с врачом: не всем искусственный ультрафиолет полезен.

Ртутные лампы высокого давления, наподобие тех, что применяют в кабинетах физиотерапии, исправно работают и для освещения улиц. Это двойные лампы: внутри у них кварцевая лампа, а снаружи — большой стеклянный баллон, также покрытый изнутри люминофором, который излучает свет, несколько напоминающий дневной. Такие лампы могут иметь мощность в десятки киловатт; их используют для освещения площадей, стадионов, железнодорожных узлов — везде, где требуется

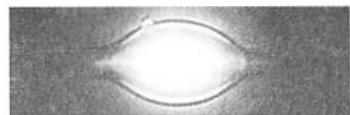


Рис. 6.4. Горящая ослепительно белым светом ксеноновая лампа сверхвысокого давления

создать хорошее освещение на большой площади. Для этой цели используют также ксеноновые лампы сверхвысокого давления (рис. 6.4). В такой лампе электрический разряд создается между двумя массивными вольфрамовыми электродами, которые впаяны в кварцевый баллон. Лампа заполнена тяжелым

газом ксеноном. Она излучает не только в видимой, но и в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра и потому используется в качестве источника света в различных приборах.

Многие жители больших городов заметили, что в последние годы небо по ночам имеет красновато-оранжевый цвет, особенно в облачную погоду. Это происходит потому, что для освещения улиц и площадей стали использовать натриевые лампы, в которых светятся пары не ртути, а натрия. Свет, излучаемый раскаленными парами натрия, знаком любой хозяйке, у которой хоть раз «убегал» и попадал на горящую конфорку посоленный суп. Желтый свет паров натрия довольно сильно отличается от солнечного света, поэтому к натрию добавляют другие металлы, что делает свет желто-оранжевым. Натриевые лампы экономичнее, так как при той же затрате электроэнергии дают значительно большую освещенность.

Люминофоры — источники «холодного» света

Химики синтезировали множество соединений, которые могут светиться, оставаясь холодными. Такие вещества называют люминофорами (от латинского *lumen* — «свет» и греческого «форос» — «несущий»). Чтобы люминофор светился, его атомы надо возбуждать, т. е. подводить энергию. Делать это можно разными способами. Самый распространенный способ возбуждения — светом, видимым или ультрафиолетовым. Общее название свечения, вызванного таким способом, — фотолюминесценция. У нее есть две разновидности. Так, если возбужденное светом вещество излучает свет очень короткое время — порядка 10^{-8} – 10^{-9} секунды после поглощения возбуждающего фотона, то такое излучение называется флуоресценцией. Свое название этот вид излучения получил от названия минерала флюорита, у которого данное явление было впервые обнаружено. Кристаллы флюорита довольно редки, однако многие из вас, возможно, видели синеватое свечение кристаллов нафталина на солнечном свете, зеленоватое свечение растворов флуоресцеина или эозина (эти красители иногда добавляют к шампуням и экстрактам для ванн), яркое свечение бакенов, цветных афиш, деталей одежды, специальных красок для фломастеров (маркеров) и т. д. Все они содержат так называемые дневные флуоресцирующие красители — сложные органические соединения, поглощающие ультрафиолетовые и синие солнечные лучи и излучающие зеленые, оранжевые или красные. Школьник младших классов, ранец которого окрашен яркой флуоресцентной краской, может с меньшей опасностью переходить дорогу, так как шофер увидит его издали. Еще не так давно в метрополитене некоторых городов использовались турникеты, принцип действия которых основывался на эффекте флуоресценции. В турникеты тогда надо было опускать круглые пластмассовые жетоны, в которые был подмешан флуоресцирующий краситель. Внутри турникета была спрятана ртутная лампочка — источник ультрафиолета, под действием которого пролетающий мимо жетон на мгновение вспыхивал яркой флуоресценцией — в Москве сине-голубой, в других городах она могла быть иного цвета. Специальный фотоэлемент реагировал на эту вспышку и открывал проход. Глядя в щель автомата, можно было заметить эту яркую вспышку.

Сильной флуоресценцией обладает хинин — сложное органическое соединение исключительно горького вкуса, содержащееся в коре хинного дерева. Хинин используют как лекарство от малярии, а также добавляют к различным тонизирующим напиткам. Малые добавки хинина придают напиткам чуть горьковатый привкус, а также... способность ярко светиться под действием ультрафиолетовых лучей!

Флуоресцирующие красители входят в состав многих моющих средств. Здесь они выполняют роль оптических отбеливателей, о которых



Рис. 6.5. Так светится под ультрафиолетовыми лучами 100-рублевая купюра

(рис. 6.5). Светятся разным цветом на темном фоне отдельные элементы купюры — надписи, узоры, а также вкрапленные в бумагу волокна.

Иногда фотолюминесценция не исчезает сразу после прекращения действия источника возбуждения. Такая её разновидность называется фосфоресценцией (от греческих слов «фос» — «свет» и «форос» — «несущий»). Она может длиться от долей секунды до нескольких часов и даже суток. Фосфоресценцию органических молекул можно наблюдать только в специальных лабораторных условиях. А вот с неорганическими фосфорами (ударение на 2-м «о») знаком каждый: ими покрыты (конечно, изнутри) лампы дневного света, а также баллоны ртутных светильников на улице. По своему составу это чаще всего соединения металлов с кислородом, серой, фосфором и кремнием (химика такие соединения называют оксидами, сульфидами, фосфатами и силикатами). Кроме этих веществ в состав люминофора вводят так называемые активирующие добавки сурьмы, марганца, олова, серебра, меди и других тяжелых металлов. Порошок люминофора светится, когда на него попадает ультрафиолетовое излучение, которое возникает в парах ртути под действием электрического разряда. От ламп дневного света не требуется, чтобы они обладали послесвечением, т. е. светились после отключения от сети; главное для них — высокая световая отдача, приятный для глаза цвет и стабильность. Люминофоры для ламп дневного света выпускаются в огромном количестве. В мировом выпуске всех классов люминофоров их доля составляет примерно 90 %.

Некоторые промышленные люминофоры обладают довольно длительным послесвечением, измеряемым многими минутами. Это позволяет использовать их для покрытия циферблатов и стрелок часов, а также деталей других измерительных приборов. Если предметы, покрытые люминофором длительного действия, «насветить» несколько минут на солнце, то потом в темноте они будут светиться не один час — сначала ярко, потом все более тускло. В конце 1980-х годов группа энтузиастов-школьников перед поездкой в летнюю химическую школу в подмосковном городе Пущино «сбросилась» и купила в магазине химреактивов на улице 25 Октября в Москве (сейчас нет в помине ни этого названия улицы, ни магазина) люминофор типа ФКП-ОЗК (активированный медью сульфид цинка) по цене 36 рублей за килограммовую банку — немалые

деньги по тем временам. Но они были потрачены не зря: порошок люминофора ребята смешали с эпоксидной смолой и намазали этой смесью невесть откуда добытый череп собаки. Когда смола застыла, череп можно было использовать в самых разнообразных ситуациях; например, «насветив» как следует под яркой лампой, внести неожиданно в соседнюю комнату, где в темноте показывали слайды. Эффект был потрясающий... После положенных в такой ситуации визгов (несколько наигранных) «исполнители» во всем признались: назвали и марку люминофора, и его формулу, и даже цену. Руководителям оставалось только прочитать небольшую лекцию о «холодном свете».

Люминофоры для экранов телевизоров, мониторов, осциллографов относятся к катодолюминофорам — они возбуждаются пучком электронов. Как и фотолюминофоры, они известны с XIX века. Еще в 1893 году для исследования катодолюминесценции было предложено использовать электронно-лучевую трубку с маленьким окошком из тонкой алюминиевой фольги, обладающей способностью пропускать электроны (катодные лучи) наружу. Это позволило изучать действие электронов на различные вещества прямо на воздухе, а не в вакууме. В результате было просмотрено большое число образцов и выбраны те, которые светятся под действием электронов лучше. В настоящее время по масштабам мирового производства (сотни тонн в год) катодолюминофоры занимают второе место после ламповых люминофоров. Некоторые из них перестают светиться после прекращения возбуждения очень быстро; если бы, к примеру, люминофор на экране телевизора светился хотя бы секунду после того, как с него ушел «рисующий» изображение электронный луч, картинка на экране была бы полностью смазана. Кстати, катодолюминофоры могут слабо светиться и под действием обычного света: если поднести в темноте к экрану выключенного черно-белого телевизора яркую лампу, а затем выключить ее, то некоторое время экран будет слабо светиться. Другим люминофорам, наоборот, свойственно послесвечение, что позволяет, например, делать фотографии быстро протекающих процессов с экрана осциллографа. Это так называемые экраны с «памятью» (они есть в некоторых осциллографах, радиолокационных трубках). Для получения цветного изображения используют люминофоры с другими активаторами. Например, в цветных телевизорах синее свечение экрана может давать сульфид цинка, активированный серебром, зеленое — то же соединение, активированное медью, красное — сульфид редкого металла иттрия, активированный еще более редким металлом — европием. Разработаны и другие композиции, в которых сочетание трех основных цветов в различных соотношениях дает миллионы разнообразных оттенков. Используются они и при производстве компьютеров — для экранов цветных мониторов. К катодолюминофорам близки рентгенолюминофоры, которыми покрыты экраны в рентгеновских кабинетах — они

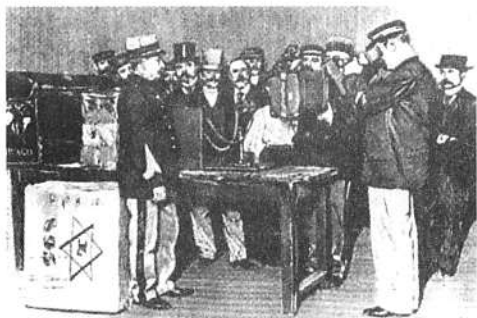


Рис. 6.6. На фотографии 1897 года французский таможенник просматривает содержимое чемодана, помещенного между источником рентгеновского излучения и прибором, который он держит в руках и внутри которого – экран, светящийся под действием рентгеновских лучей. Обратите внимание на два обстоятельства: во-первых, снимок сделан спустя всего несколько месяцев после открытия Рентгеном новых лучей; во-вторых, многочисленные наблюдатели и сам таможенник никак не защищены от источника лучей – рентгеновской лампы, которая видна на снимке. Сейчас даже при выполнении рентгеновского снимка в стоматологической поликлинике на пациента надевают просвинцованный защитный фартук, а в ходе флюорографии медицинский сотрудник выходит в соседнюю комнату

радиолюминофоры сыграли в свое время огромную роль в изучении явления радиоактивности: до изобретения электроизмерительных приборов (ионизационной камеры, счетчика Гейгера–Мюллера) ими покрывали небольшие пластинки-экраны и затем в полной темноте, иногда ночи напролет, подсчитывали число вспышек (сцинтилляций), чтобы определить интенсивность излучения от разных источников (более подробно об этом будет рассказано в следующей главе). Для покрытия экранов использовали ярко светящийся, но дорогой препарат платины. Под действием радиации в нем возбуждается яркая желто-зеленая люминесценция. В настоящее время используют значительно более дешевые люминофоры, например, активированный медью сульфид цинка. У кого-то, возможно, еще остались часы, в которых стрелки и цифры покрыты таким светящимся составом постоянного действия – в нем содержится в малых количествах радиоактивное вещество; из-за опасений нанести вред здоровью – и тех, кто такие часы бы носил, и в еще большей мере тех, кто такие часы бы изготавливал, – их сейчас не выпускают.

светятся под действием рентгеновских лучей (рис. 6.6).

В отдельный класс выделяют электролюминофоры – вещества, светящиеся под действием электрического поля. Они непосредственно преобразуют электрическую энергию в световую, потребляя очень малую мощность и обладая очень большим сроком службы. Однако светимость электролюминофоров мала, поэтому их используют обычно для световой сигнализации. Например, надпись «ВЫХОД», светящаяся зеленым светом в концертных залах, театрах и кинотеатрах, – это как раз пример электролюминофора.

Наконец, последний класс люминофоров – радиолюминофоры, свечение которых возбуждается излучением естественных или искусственных радиоактивных препаратов. Такие люминофоры могут светиться годами. Ра-

Холодное «химическое» свечение

Совершенно особую группу светящихся веществ составляют соединения, испускающие свет за счет энергии химических реакций. Это явление называется хемилюминесценцией. Общеизвестно свечение гнилушек, светляков, некоторых морских организмов. Еще в древние времена моряки наблюдали свечение моря. Карфагенский флотоводец Ганно описал море, «горевшее ярким пламенем». А вот воспоминания Чарльза Дарвина: «Как-то в очень темную ночь вся поверхность моря светилась слабым светом. Корабль гнал перед собой две волны, точно из жидкого фосфора, а в кильватере тянулся молочный свет. Насколько хватало глаз, светился гребень каждой волны, а небосклон у горизонта, отражавший сверкание этих синеватых огней, был не так темен, как небо над головой». Это светились простейшие одноклеточные организмы. Светиться способны и многие морские животные, обитающие как на поверхности моря, так и на глубине.

Испускают свет не только морские организмы. Светятся гнилушки и пни в лесу, яркий мерцающий свет испускают самцы светляков. Это примеры биолюминесценции – свечения в живых организмах. Причина всех описанных явлений – химические реакции, идущие с выделением энергии. Обычно в ходе химических реакций энергия выделяется в виде тепла, но в редких случаях часть химической энергии переходит в световую. В живых организмах реакции, в том числе и с выделением света, регулируются особыми молекулами – ферментами. Давно известны и неферментативные химические реакции, в ходе которых наблюдается «холодное свечение». Еще в 1669 году немецкий алхимик из Гамбурга Хенниг Бранд (1630 – после 1710) случайно открыл белый фосфор по его свечению в темноте (рис. 6.7). Впоследствии химики выяснили, что белый фосфор легко испаряется и светятся его пары, когда они реагируют с кислородом воздуха. Это свечение подробно исследовали в 1920-х годах в Ле-

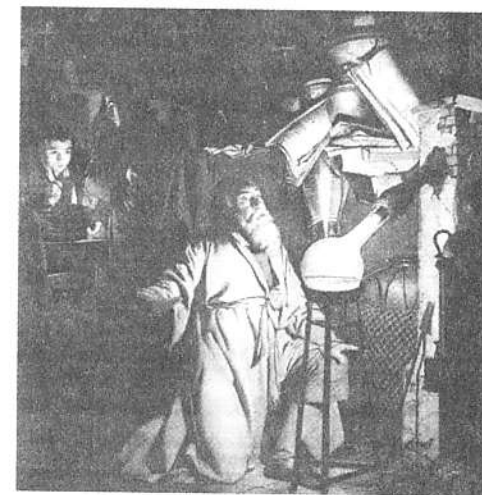


Рис. 6.7. Так на картине английского художника Дж. Райта (1771) изображен момент открытия фосфора, свечение которого поразило старого алхимика и его помощника

нинградском физико-техническом институте в лаборатории Николая Николаевича Семенова (1896–1986). В результате был открыт совершенно новый класс химических реакций; за это открытие Н. Н. Семенов совместно с английским химиком Сирилом Норманом Хиншелвудом (1897–1967) был удостоен Нобелевской премии по химии.

Свечение паров фосфора, хотя и привело к важному научному открытию, не имеет практического значения. Однако химики обнаружили, что при окислении некоторых органических веществ, например, перекисью водорода, наблюдается настолько яркая хемилюминесценция, что ее можно видеть даже при дневном освещении. Это явление уже используется для производства игрушек и украшений. Их делают в виде прозрачных пластмассовых трубочек, внутри которых находится раствор органического вещества, обладающий способностью светиться при окислении, а также стеклянная ампула с перекисью водорода. Непосредственно перед «применением» продавец (или покупатель) надламывает находящуюся в пластмассовой трубочке хрупкую ампулу, что и «запускает» реакцию. Цвет свечения может быть разным — оранжевым, голубым, зеленым и т. д. — в зависимости от находящегося в растворе красителя. Чем быстрее идет реакция окисления, тем ярче свечение. Но когда реакция идет быстро, она быстро и прекращается, а с ней прекращается и свечение. Если же реакция идет медленно, то длится она, конечно, дольше, но свечение получается менее ярким (так, если смесь держать в морозильнике, то свечение заметно даже через полгода после «запуска» реакции). Обычно выбирают «золотую середину», что в данном случае означает довольно яркое (можно читать в темноте) свечение, которое затухает в течение примерно 12 часов — для карнавала или дискотеки этого вполне достаточно. Туристы, побывавшие в итальянском парке «Гардаленд» (аналог американского «Диснейленда»), рассказывают, что видели одновременно сотни светящихся украшений, сделанных в виде цветков, бабочек, жуков и других насекомых, в которых шеголяли посетители (в основном, дети) после наступления темноты. Эффект усиливался множеством усиков-световодов, передающих свет на 10–20 см от его источника — ампулы с реагентами. Зрелище впечатляющее! К сожалению, после прекращения химической реакции свечение затухает и возобновить его уже невозможно.

ХИМИКИ ИЗУЧАЮТ РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ



«Страшное» слово — радионуклид

Масса — не единственное свойство, по которому можно отличить изотопы одного и того же химического элемента, этих химических «близнецов». Исследования показали, что изотопы всех элементов по своему поведению можно разделить на две группы. Одни ведут себя смирно: какими они появились на свет, такими и остались. Причем появиться они могли и много миллиардов лет назад — когда возникла Вселенная, и совсем недавно. Поведение же других изотопов химических элементов прямо противоположное: они непрерывно «меняют лицо», превращаясь в изотопы других элементов. Такие превращения принято называть радиоактивным распадом. Почему распад — понятно: «смена лица» фактически приводит к уничтожению атомов данного элемента, к их распаду. А радиоактивными эти превращения названы потому, что они сопровождаются испусканием особых лучей. Что же это за лучи?

Конец XIX века был богат на открытия, связанные с обнаружением разного рода «излучений». В 1895 году немецкий физик В. К. Рентген (1845–1923) открыл лучи, названные впоследствии его именем. Они возникали, когда быстро летящие в вакууме отрицательно заряженные частицы — электроны ударялись о препятствие. Мы уже говорили о том, что почти одновременно с открытием рентгеновских лучей появилась соответствующая аппаратура, которая сразу же нашла практическое применение, прежде всего — в медицине. Сейчас рентгеновские лучи широко используются во всем мире. Редко можно найти человека, который бы ни разу в своей жизни не побывал в рентгеновском кабинете — хотя бы для того, чтобы сделать снимок зуба; рентгеновские лучи легко проходят через мягкие ткани, но задерживаются костями и другими твердыми предметами (рис. 7.1, 7.2).

Совершенно другой тип лучей обнаружил в 1896 году французский физик Анри Антуан Беккерель (1852–1908). Эти лучи испускались «сами по себе» некоторыми редкими минералами. Выдающаяся французская исследовательница польского происхождения Мария



Рис. 7.1. Эта фотография руки охотника, пострадавшего от случайного выстрела мелкой дробью, была сделана профессором Майклом И. Пьюпином из Колумбийского университета в Нью-Йорке в феврале 1896 года – вскоре после первого сообщения Рентгена об открытии им новых лучей (28 декабря 1895 года). Но не Пьюпин был первым, кто применил рентгеновские лучи в медицинских целях: еще раньше М. Ястровиц в Берлине обнаружил новым методом осколки в руке стеклодува, Г. Кайзер в Вене – дробь в руке лесника, А. Шустер в Манчестере – иголку в ступне балерины (кстати, после газетных сообщений об этом успехе масса мнительных людей во всем мире начала обращаться к врачам с жалобами на болезненные ощущения в разных частях тела, где у них, по-видимому, застряли иголки...)



Рис. 7.2. Монета номиналом 10 марок, выпущенная в ФРГ в 1995 году и посвященная 100-летию со дня открытия Рентгеном нового вида излучения, которое автор назвал X-лучами (буква X в центре монеты). В России и Германии эти лучи называют рентгеновскими. На монете изображен также первый в мире рентгеновский снимок руки человека (этим человеком была жена Рентгена – Берта). В 1901 году Рентген получил первую Нобелевскую премию по физике «за открытие лучей, которые носят его имя» (официальная формулировка Шведской академии наук)

Склодовская-Кюри (1867–1934) назвала это явление радиоактивностью. На латыни *radius* – «палочка, спица в колесе», а также «радиус круга, луч»; *radiare* – «испускать лучи, сиять»; в английском лексиконе слово *radiant* («излучающий») появилось еще в XV веке. То есть придуманный Кюри термин должен был означать самопроизвольное («активное») излучение некоторыми веществами. Долгое время не понимали, откуда эти лучи берутся. Потом удалось выяснить, что их испускают неустойчивые разновидности атомов обычных химических элементов. Следует отметить, что в 1903 году одна из первых Нобелевских премий по физике была присуждена А. А. Беккерелю, М. Склодовской-Кюри и ее мужу Пьеру Кюри (1859–1906) за исследование радиоактивных явлений.

Неустойчивые разновидности атомов, испускающие радиоактивные лучи, называются радионуклидами. Иногда их называют также радиоактивными изотопами. При распаде каждого неустойчивого атома из него вылетают с большой скоростью одна или несколько частиц, обладающих высокой энергией. Поток этих частиц и называют радиоактивным излучением, или попросту радиацией. В теле человека такие частицы могут вызывать различные повреждения, и если повреждений за короткое время окажется много, организм не сумеет их «залечить» – человек заболит лучевой болезнью. Наличием радиоактивных превращений объясняется непрерывное облучение, которому подвергаются на Земле и люди, и животные в течение всей их жизни – хотя бы они этого или нет. Это так называемый радиационный фон, причем заметная его доля приходится на «внутреннее» облучение человека.

Судите сами. Как уже говорилось, в человеке, весящем 70 кг, содержится много различных химических элементов. Больше всего в нем кислорода, углерода, водорода, азота, кальция, фосфора и калия. Все эти элементы мы привыкли считать вполне стабильными и потому безопасными с точки зрения радиации. Однако есть у этих элементов и радиоактивные разновидности – радионуклиды. У одних элементов их больше, у других – меньше.

Из 340 изотопов различных элементов, найденных в природе, 70 – радиоактивны. Большинство содержащихся в организме человека элементов – кислород, водород, азот, кальций, фосфор – природных радионуклидов практически не имеют, или их так мало, что связанное с ними излучение можно вовсе не учитывать. Иначе обстоит дело с углеродом и калием. Природный углерод содержит небольшую примесь (примерно 10^{-10} %) «радиоуглерода» (о нем еще будет подробный рассказ). В теле взрослого человека в минуту распадается почти 200 тысяч атомов радиоуглерода!

Обычный калий тоже содержит примесь радионуклида (его называют калий-40), в результате чего каждую минуту в теле человека распадается около 300 тысяч атомов калия-40.

Много радионуклидов существует в природе, но еще больше их получено искусственно. Некоторые радионуклиды распадаются очень медленно; это космические долгожители, время распада которых сравнимо со временем существования Вселенной. Например, время жизни радиоактивного калия (^{40}K) измеряется миллиардами лет. Когда Вселенная была намного моложе, когда еще не было ни Земли, ни Солнца, радиоактивного ^{40}K было довольно много. Сейчас в обычном калии его осталось чуть больше 0,01 %.

Конечно, за время своего существования все живое приспособилось к радиоактивному облучению. Более того, не исключено, что такое облучение и явилось одной из причин мутаций в ходе эволюции живой природы. Если это так, то не будь в природе радиации, не было бы на Земле такого богатейшего разнообразия животной и растительной жизни, не было бы и нас с вами. Так что не следует считать радиацию всегда и безусловно вредной — все хорошо в меру. Возьмем, к примеру, солнечную ультрафиолетовую радиацию: когда ее мало — люди плохо себя чувствуют, у детей развивается рахит; когда ее слишком много — кожа «обгорает» и «слезает», могут даже образоваться волдыри.

И все же — насколько опасны радионуклиды? Стоит ли верить рекламе чудодейственных средств, якобы выводящих радионуклиды из организма?

Прежде всего внесем ясность в некоторые определения. Химические свойства разных изотопов данного элемента почти не отличаются; например, присутствие в составе поваренной соли (хлорида натрия) двух изотопов хлора не приводит ни к каким последствиям. Кстати, природный натрий на 100 % состоит из единственного стабильного нуклида ^{23}Na . Другое дело, нестабильные, радиоактивные изотопы. Их распад сопровождается испусканием частиц с высокой энергией, которые могут быть опасны для организма. В то же время они широко используются в медицине, промышленности, и без них мы уже обойтись не можем. Искусственно получены очень многие радионуклиды. Важнейшие свойства радионуклидов определяются типом испускаемых частиц, их энергией, а также периодом полураспада ($T_{1/2}$), т. е. временем, в течение которого распадается половина имеющихся нестабильных атомов.

Если период полураспада некоего вещества равен, например, одной минуте, то через 15–20 минут от него не останется и следа. Другое дело более долгоживущие радионуклиды. Например, для стронция-90 $T_{1/2} = 28,7$ года, поэтому этот радионуклид сохраняет активность в течение нескольких столетий.

Откуда же берутся радионуклиды? Источников их возникновения — несколько, причем одна часть — это естественные источники, а другая — «дело рук» человека. Начнем с естественных источников, на долю которых приходится 2/3 от всей радиации, получаемой человеком. Некоторые радионуклиды возникли при образовании нашей Вселенной одновременно со стабильными нуклидами, и благодаря большому периоду полураспада они до сих пор полностью не распались. Типичный пример — упомянутый калий-40. Его период полураспада — 1,3 миллиарда лет. Организм животных, а также человека, содержит примерно 0,3 % калия (кстати, это больше, чем натрия). Если человек весит 70 кг, то на долю калия приходится 210 г, из которых 0,021 г — это радионуклид ^{40}K . Зная массу и период полураспада, легко рассчитать, что в организме человека каждую секунду распадается примерно 5 тысяч атомов ^{40}K , а в сутки — 430 миллионов атомов! Тем не менее эта скорость распада настолько мала, что не представляет опасности для живых организмов. Некоторые ученые даже считают, что снижение облучения любой ценой окажет эффект, прямо противоположный желаемому.

Второй природный источник радионуклидов — космические лучи, под действием которых в верхних слоях атмосферы из одних нуклидов непрерывно образуются другие, в том числе и радиоактивные. Например, из атомов азота образуются углерод-14 ($T_{1/2} = 5730$ лет) и радиоактивный изотоп водорода — тритий ($T_{1/2} = 12,3$ года). В результате реакций обмена все живое содержит и эти радионуклиды. Атомов углерода-14 в организме человека в секунду распадается примерно столько же, сколько и атомов калия-40 (третия — намного меньше).

Третий основной источник радионуклидов в природе — медленно распадающиеся в земной коре изотопы урана и тория. Сами эти соединения в чистом виде практически не представляют опасности, однако в результате их распада образуется множество значительно более активных радионуклидов с относительно малым периодом полураспада. Один из них, и самый опасный, — радон ($T_{1/2} = 3,8$ дня). Это инертный газ, поэтому он постепенно, не вступая в химические реакции, просачивается из глубин земного шара к поверхности и попадает в воздух, а оттуда — в наши легкие. В разных географических районах выделение радона может очень сильно отличаться. И хотя в среднем радона в атмосфере очень мало, именно на него приходится более 50 % дозы облучения, которую в среднем получает человек в течение жизни. Происходит это так. Во время выдоха из легких выходит почти весь радон, который мы перед этим вдохнули с воздухом. Однако небольшая часть его успевает все же распасться, образуя нелетучие радионуклиды по-

лония и свинца. Именно они и дают основной вклад во «внутреннее облучение» человека. Эти же радионуклиды могут попасть в легкие и с твердыми частицами пыли, табачного дыма и т. п., на которые они оседают при распаде радона в воздухе. Радон способен накапливаться в плохо проветриваемых помещениях первого этажа и подвалах, если для него есть туда доступ из земли; выделяется он и из некоторых строительных материалов через мельчайшие трещинки. Поэтому доза облучения радоном очень сильно зависит от того, в каком месте и в каком доме живет человек. Когда в Швеции для экономии энергии стали строить дома с улучшенной изоляцией (а большинство шведов живет вовсе не в небоскребах), оказалось, что у жителей этих домов увеличилась доза облучения, полученная от радона.

Теперь об искусственных источниках радиации. Их тоже несколько. Со времен Марии и Пьера Кюри человек научился концентрировать, накапливать в чистом виде природные источники радиации, увеличивая таким способом их радиоактивность (на единицу массы) в миллиарды раз. Вначале к этим источникам относились без должного внимания, поскольку не подозревали об их опасности. Так, когда обнаружили яркое свечение сульфида цинка и других веществ под действием излучения солей радия, эти смеси со времен Первой мировой войны начали использовать для производства светящихся в темноте составов для покрытия стрелок часов и компасов, авиационных приборов и т. п. На предприятиях, производивших радиоактивные светосоставы, работники не имели никакой специальной защиты. Они наносили радиоактивную краску кисточкой, а чтобы заострить ее кончик, время от времени облизывали его губами! И лишь после того как обнаружилась закономерная связь между частым заболеванием раком губы и опасным производством, выпуск таких изделий был прекращен. Тем не менее еще не так давно во многих странах продавались наручные часы с радиевым светосоставом. Более того, когда-то радионуклиды считались целебными при приеме внутрь! Так, с 1920 по 1930 годы в США продавалось патентованное «безвредное» средство «Радитор», на этикетке которого красовалась такая надпись: «Содержит радий и мезоторий в трижды дистиллированной воде». И только в 1932 году, когда выяснилась смертельная опасность таких «лекарств», они были запрещены.

Второй источник искусственных радионуклидов — работа ядерных реакторов (промышленных и исследовательских), а также термоядерные взрывы. В этом случае происходит не концентрация уже имеющих на планете источников радиации, а синтез новых радионуклидов, значительная часть которых в природе не обнаружена. Несколько

десятилетий назад огромное количество радионуклидов было выброшено в атмосферу во время массовых испытаний ядерного оружия. Так, в 1954 году (начало испытаний термоядерных бомб) содержание трития в дождевой воде увеличилось в тысячи раз. Сейчас основную опасность могут представлять крупномасштабные аварии на атомных электростанциях, небрежное, а порой преступное обращение с радионуклидами. Тем не менее в среднем доза облучения человека от работы таких станций весьма мала, что наглядно представлено в табл. 1. В ней приведены данные для «среднего американца»; в нашей стране соотношение может быть немного другим (особенно это касается искусственных источников).

Таблица 1

Основные источники облучения человека

Источник	Вклад в суммарную дозу, %
Природные источники	
Радон	55
Космические лучи	8
Излучение Земли	8
«Внутреннее облучение» человека	11
Искусственные источники	
Рентгеновские лучи	11
Ядерная медицина	4
Промышленные товары	3
Профессиональное облучение, радиоактивные осадки, работа АЭС, другие источники	Менее 1

Итак, мы выяснили, что полностью уберечься от радионуклидов никак нельзя, да и незачем: некоторые из них — составная часть нашего тела. Как, например, вывести из организма радионуклид калий-40? Теоретически это возможно: надо питаться только такой пищей, в которой этот изотоп калия отсутствует: тогда довольно быстро «чистый» калий вымоет из организма весь калий-40. Приготовление такой пищи

лишь для одного человека обойдется, вероятно, не меньше, чем запуск экспедиции на Луну. А как вывести из организма, скажем, стронций-90, попавший туда «незапланированно», например, во время аварии? Ведь стронций концентрируется в костях вместе с очень близким к нему по химическим свойствам кальцием. Попытки «вымыть» стронций из костей могут привести к более печальным последствиям, чем лучевая болезнь, которую все же лечат. Наконец, каждый радионуклид обладает своей химической индивидуальностью, поэтому «средство, выводящее из организма все радионуклиды», так же нереально, как и алхимический «эликсир», превращающий стариков в юношей, а медь — в золото.

Мы уже говорили, что многие природные радионуклиды, хотя и живут сравнительно недолго — какие год, какие всего неделю, а некоторые и того меньше, — непрерывно образуются в результате распада других радионуклидов. Так они и превращаются друг в дружку, и такие превращения (их называют радиоактивными рядами) могут следовать друг за другом десятки раз. Цепочка превращений прекращается, когда образуется стабильный, то есть нерадиоактивный изотоп какого-либо элемента.

Радиоактивный распад подчиняется определенным законам, о которых мы немного сейчас и поговорим.

Как быстро распадаются атомы

Формулы, количественно характеризующие радиоактивный распад, в школе не изучают. Тем не менее они достаточно просты и позволяют провести интересные расчеты.

Если бы мы задались целью проследить за конкретным атомом радионуклида, мы бы не смогли предсказать, когда он распадется. Этот случайный процесс. Однако даже в мельчайшей пылинке содержится огромное число атомов, и если эти атомы радиоактивны, то их распад подчиняется строгим математическим закономерностям: в силу вступают статистические законы, которые описывают количественные изменения большого числа объектов. И оказывается, что каждый радионуклид можно охарактеризовать вполне определенной величиной — периодом полураспада ($T_{1/2}$). Есть радионуклиды-долгожители, для которых периоды полураспада исчисляются миллионами и даже миллиардами лет. Известны и короткоживущие радионуклиды, распадающиеся полностью за ничтожные доли секунды. Очевидно, что если имеется, например, 1 г радиоактивного вещества, то чем меньше период его полураспада, тем большей радиоактивностью будет обладать вещество.

Сейчас мы выведем формулу, которая показывает, как уменьшается число атомов радионуклида (а вместе с ним — и его радиоактивность) со временем. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ имеется N_0 атомов радионуклида с периодом полураспада $T_{1/2}$. Как следует из определения периода полураспада, по прошествии промежутка времени $t = T_{1/2}$ останется $N_0/2$ атомов. Когда пройдет еще столько же времени ($t = 2T_{1/2}$), останется половина от $N_0/2$ атомов, т. е. $N_0/4$ и т. д. Рассуждая далее аналогично, получим ряд уменьшения числа атомов (табл. 2).

Таблица 2

Прошедшее время	Число оставшихся атомов
$t = 0$	$N = N_0$
$t = T_{1/2}$	$N = N_0/2$
$t = 2T_{1/2}$	$N = N_0/4 = N_0/2^2$
$t = 3T_{1/2}$	$N = N_0/8 = N_0/2^3$
$t = 4T_{1/2}$	$N = N_0/16 = N_0/2^4$
$t = nT_{1/2}$	$N = N_0/2^n$

Последняя строчка легко выводится из предыдущих «по аналогии». Таким образом, если прошло n периодов полураспада ($n = t / T_{1/2}$), то останется $N = N_0 / 2^{t/T_{1/2}}$ атомов. Это и есть основная формула, по которой можно рассчитать, сколько атомов радионуклида останется через определенный промежуток времени t , если известно его начальное количество N_0 и период полураспада $T_{1/2}$. Точно такая же формула позволяет рассчитать изменение радиоактивности со временем:

$$a = a_0 / 2^n,$$

где a_0 — начальная радиоактивность.

Здесь надо пояснить, что радиоактивность a — это число атомов, распадающихся в образце в единицу времени; радиоактивность пропорциональна имеющемуся числу атомов, поэтому она изменяется со временем так же, как и N .

На практике радиоактивность образца обычно характеризуют не общим числом происходящих в нем распадов, а пропорциональным ему числом импульсов I , которые регистрирует прибор, измеряющий радиоактивность ($I = ka$, где k — коэффициент пропорциональности). Очевидно, что и в этом случае формула имеет вид

$$I = I_0 / 2^n.$$

По приведенным формулам можно определить, сколько останется радиоактивного вещества через определенное время или какова будет его активность, если известны период полураспада и начальное количество (или начальная активность) радионуклида. С другой стороны, зная начальную и конечную активность, а также время t , можно определить период полураспада.

Следует отметить, что приведенные формулы верны не только для целых, но и для дробных значений n . Правда, при нецелых n для расчетов потребуются знание логарифмов и использование калькулятора, производящего действия со степенями и логарифмами. Если же n — целое (т. е. прошло целое число периодов полураспада), то расчеты значительно упрощаются и часто их можно проделать даже в уме.

В качестве примера решим такую задачу. В лаборатории для биохимических исследований доставили препарат, меченный фосфором-32 (для этого радионуклида $T_{1/2} = 2$ недели). Начальная активность образца составляла 512 импульсов в минуту в расчете на 1 мкг препарата. Можно ли будет использовать этот препарат для исследований через 12 недель, если для надежного измерения активности препарата должно быть не ниже 10 импульсов в минуту на 1 мкг?

Для решения этой задачи рассчитаем активность препарата к указанному сроку. По условию $I_0 = 512$ имп./(мин · мкг), $T_{1/2} = 2$ недели, $t = 12$ недель, $n = 12/2 = 6$. Подставляем эти значения в формулу и получаем, что через 12 недель (примерно 3 месяца) активность снизится до $I = 512 / 2^6 = 512 / 64 = 8$ имп./(мин · мкг). Следовательно, сотрудникам лаборатории отпущен сравнительно небольшой срок для решения стоящих перед ними научных задач — через 3 месяца придется заказывать новую партию дорогостоящего препарата. Отметим, что активность препарата, конечно, зависит от его общего количества, поэтому она отнесена к 1 микрограмму вещества; эта активность могла быть задана и в любых других единицах. Разумеется, числовые данные в этой задаче специально подобраны так, чтобы предельно облегчить расчеты. Например, если бы t было равно не 12, а, допустим, 12,8 неделям, пришлось бы возводить 2 в степень $12,8 / 2 = 6,4$, что невозможно без калькулятора.

А вот более важный пример. Во время чернобыльской аварии из горящего реактора было выброшено большое количество очень опасного для человека радионуклида иод-131 ($T_{1/2} = 8$ суток). Опасен ли сейчас этот радионуклид? Поскольку с момента аварии прошло более 20 лет (т. е. более 900 периодов полураспада), количество иода-131 уменьшилось более чем в 2^{900} (или в 10^{400}) раз. Это означает, что если бы в момент аварии (апрель 1986 года) вся Вселенная состояла только из иода-131, то уже через несколько лет от него не осталось бы ни единого атома!

Подобные расчеты для ученых не представляют большого труда. А вот точное и надежное измерение очень малых активностей является серьезной проблемой, которая занимает ученых уже целое столетие — с момента открытия самого явления радиоактивности. Повысив точность измерений слабых радиоактивных излучений, они добились значительных успехов в определении возраста многих археологических находок. Один из самых ярких примеров — радиоуглеродный метод анализа, о котором речь пойдет ниже.

Что такое радиоуглерод и откуда он берется

Вы, возможно, слышали или читали, что наша планета подвергается непрерывному облучению космическими частицами. Если бы не атмосфера, пропускающая к земной поверхности лишь небольшую часть космического излучения, жизнь на Земле была бы невозможна, а ее поверхность мало отличалась бы от поверхности Луны. В верхних слоях атмосферы под действием космических лучей идут самые разнообразные превращения одних элементов в другие. Одно из них — превращение атомов азота в атомы радиоактивного углерода-14. Подсчитано, что каждую минуту над 1 см^2 земной поверхности образуется в среднем всего 145 атомов ^{14}C . Если учесть площадь поверхности Земли, то получится, что ежегодно в атмосфере образуется примерно 8 кг радиоуглерода. Земля, как известно, существует миллиарды лет, и если бы углерод-14 был стабилен, то его масса на Земле исчислялась бы десятками миллионов тонн. Однако он радиоактивен и в результате распада снова превращается в азот. Период полураспада ^{14}C довольно велик и составляет 5730 лет. Всего на Земле имеется 60 тонн радиоуглерода, из которых ежегодно распадается 8 кг — столько же, сколько его образуется (в этом случае говорят о радиоактивном равновесии, при котором скорость образования нуклида равна скорости его распада). Конечно, для земного шара 60 тонн — это очень малая величина; причем, в атмосферном углекислом газе количество радиоуглерода составляет лишь около 1 тонны, или $3 \cdot 10^{-11} \%$ от «обычного» углерода ^{12}C (остальной радиоуглерод в основном растворен в воде).

Большинству из вновь образованных атомов ^{14}C предстоит долгая жизнь — на многие тысячи лет. Какая их ждет судьба?

Прежде всего они довольно быстро окислятся кислородом и превратятся в молекулы углекислого газа. Этот радиоактивный углекислый газ равномерно перемешается с огромным количеством обычного

углекислого газа. Известно, что углекислый газ атмосферы — основной источник углерода, который усваивается растениями в процессах фотосинтеза. Растениями питаются животные, поэтому вся живая

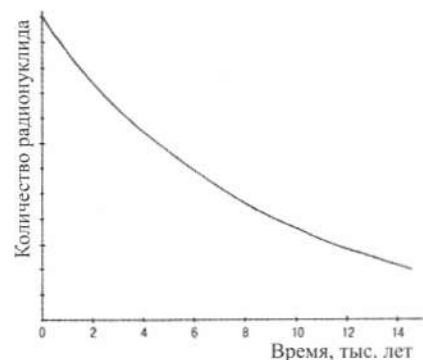


Рис. 7.3. Так уменьшается со временем количество радиоуглерода в образце, если в него не попадает «свежий» ^{14}C из атмосферы

органическая материя содержит радиоуглерод, хотя и в ничтожных количествах. Очень важно, что в результате обменных процессов, протекающих в природе, содержание ^{14}C в растениях и животных на протяжении их жизни остается постоянным. Но как только обмен с окружающей средой прекращается, содержание радиоуглерода начинает медленно снижаться — в 2 раза каждые 5730 лет, как это показано на рис. 7.3.

«Радиоуглерод» входит также в состав неорганических соеди-

нений, которые растворены в воде морей и океанов, в подземных водах и могут обмениваться углеродом с углекислым газом атмосферы. В основном это растворимые гидрокарбонаты, которыми так богаты минеральные воды.

Как только в животном или растении обмен с углекислым газом атмосферы прекращается, количество радиоуглерода в нем со временем начинает убывать в соответствии со строгой математической зависимостью.

Подробное рассмотрение закономерностей образования и распада радиоуглерода позволило американскому физикохимику Уилларду Франку Либби (1908–1980) совершить в конце 40-х годов выдающееся открытие, за которое через несколько лет он получил Нобелевскую премию по химии «За введение метода использования углерода-14 для определения возраста в археологии, геологии, геофизике и других областях науки».

Радиоуглеродный метод датировки

В 1955 году в Женеве состоялась Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. Выступил на ней с докладом и Либби. Его выступление началось необычно. Он вышел на трибуну с большим чемоданом, вынул из него старую обувь и объявил, что

ее носил вождь инков 800 лет назад. Затем извлек из чемодана обломок весла и сказал, что это весло изготовлено в Древнем Египте 3000 лет назад. Каким образом удалось это определить? Теоретические основы радиоуглеродного метода датировки довольно просты. Однако для их практического использования пришлось провести очень большую работу, которую нельзя считать законченной и к настоящему времени, как это будет видно из приведенных примеров.

Прежде всего надо было установить, действительно ли содержание ^{14}C в обычном углероде одинаково для всех живых организмов. С этой целью были исследованы образцы древесины из свежесрубленных деревьев в разных местах земного шара. Оказалось, что содержание ^{14}C в них одинаково: в каждом грамме углерода, выделенного из наружного слоя древесины этих деревьев, в течение одной минуты распадается приблизительно 16 атомов ^{14}C , и этот распад сопровождается слабым радиоактивным излучением. Его интенсивность так мала, что образующиеся при распаде частицы задерживаются алюминиевой фольгой толщиной всего 0,1 мм. Поэтому для измерения слабой радиоактивности газ, содержащий ^{14}C (например, в виде углекислого газа или метана), запускают непосредственно внутрь измерительного прибора — счетчика Гейгера или используют чувствительные сцинтилляционные счетчики, в которых число распадов фиксируется по числу световых вспышек (сцинтилляций) в специальном веществе.

Измерение радиоактивности — очень чувствительный метод определения количества вещества. Например, если искусственно (в ядерном реакторе) получить углекислый газ (CO_2), в котором все атомы углерода — это атомы ^{14}C , то даже после разбавления в несколько триллионов (!) раз азотом в газе можно будет обнаружить радиоактивность. Возраст образца устанавливают так. Берут определенную его часть, сжигают и измеряют радиоактивность образовавшегося углекислого газа. Если в этом газе в расчете на 1 г углерода происходит в минуту 8 распадов (каждый из них регистрируется счетчиком), то такому образцу 5730 лет, если 4 распада — 11 460 лет и т. д. По формуле можно рассчитать возраст образца при любой его активности; и не важно, будет ли число распадов в минуту целое или дробное, важно другое — определить эту активность как можно более точно. Вот здесь-то и кроется одна из главных трудностей радиоуглеродного метода датировки. Поскольку активность образцов очень мала и значительно меньше фонового излучения, необходима специальная защита от внешней радиации и очень долгое измерение (иногда в течение многих суток). Еще сравнительно недавно для надежного анализа образца, возраст которого ориентировочно исчислялся несколькими тысячелетиями, требовалось не менее 20 г углерода. Если это были угли из костра древнего

человека или старые деревянные предметы, то здесь проблем обычно не возникало — углерода для исследований было в избытке. Например, в Северной Америке при раскопках нашли останки поваленных деревьев, все верхушки которых были направлены в одну сторону. Это явление казалось необъяснимым: кому и зачем понадобилось валить столько деревьев, да еще все в одну сторону. Радиоуглеродный метод анализа древесины этих деревьев показал, что они росли примерно 11 тысяч лет назад — как раз в то время, когда на Земле был последний ледниковый период. Стало ясно, что деревья повалил медленно двигавшийся ледник. Кстати, уточнение времени последнего ледникового периода на Земле считается главным результатом исследований по методу Либби.

Но если образец — уникальное изделие, например, старая картина, то, конечно, никому бы не пришло в голову сжечь значительную ее часть, чтобы установить возраст, хотя теоретически это возможно (картины писали на холсте, а холст сделан из растительных волокон).

Трудности возникали и в тех случаях, когда возраст образца превышал несколько десятков тысяч лет; в них так мало осталось атомов ^{14}C , что их трудно с достаточной точностью определить даже с помощью лучших счетчиков. Проблемы возникают и со слишком «молодыми» образцами, содержание радиоуглерода в которых мало отличается от состава современных образцов.

Разработка в 1970-е годы нового метода определения радиоуглерода с использованием ускорителя ионов позволила увеличить чувствительность измерений более чем в 1000 раз. Метод основан на превращении атомов углерода-14 в пучок ионов, который с помощью электрических и магнитных полей отделяется от всех других атомов, что и позволяет с высокой точностью измерять число атомов ^{14}C . Теперь вместо десятков граммов для анализа достаточно всего нескольких миллиграммов, а иногда и долей миллиграмма образца.

При разработке радиоуглеродного метода ученым пришлось столкнуться и с другими трудностями, часто довольно неожиданными. Так, для проверки и корректировки метода был проведен анализ годовых колец некоторых деревьев, возраст которых исчисляется тысячами лет (секвойя, остистая сосна и др.). Между годовыми кольцами обмен углеродом практически отсутствует, поэтому можно было ожидать закономерного снижения содержания ^{14}C при движении от края ствола к его центру в точном соответствии с формулой радиоактивного распада. Однако выяснилось, что количество радиоуглерода в атмосфере не всегда было точно таким, как сейчас, — так что пришлось вводить специальные поправки. Массовые испытания ядерного оружия в 50–60-е годы также изменили содержание ^{14}C в воздухе.

Очень серьезную проблему представляет загрязнение анализируемого образца. При этом случайное попадание «старого» углерода (например, в виде мела) в «современный» не так опасно — ошибка в этом случае будет невелика. Но если в старый образец, в котором содержание радиоуглерода за время его существования уменьшилось, скажем, в 100 раз, попадет хотя бы 1 % примеси «современного» углерода, то общее количество ^{14}C в образце удвоится, что приведет к очень большой ошибке в определении возраста. (Она будет равна $T_{1/2}$, т. е. примерно 6 тысячам лет!) С подобными «загрязнениями» исследуемых объектов приходится иметь дело довольно часто. Например, когда в штате Орегон (США) при прокладке горной дороги нашли в пещере 300 пар древней обуви, археологи решили для лучшей сохранности покрыть их слоем шеллачного лака. К счастью, лака хватило только для 294 пар. Поэтому лишь оставшиеся шесть пар оказались пригодными для определения их возраста радиоуглеродным методом, так как в лаке есть «свежий» нуклид ^{14}C , который смазал бы всю картину.

С еще одной загадкой ученые столкнулись, когда с помощью радиоуглеродного метода они попытались определить возраст травы, которая росла возле шоссе с оживленным движением. Получалось так, что траве... много тысяч лет! Разгадка оказалась довольно простой, но поучительной: придорожная трава усваивала углекислый газ, источником которого в значительной степени были выхлопные газы автомобилей. Эти газы выделялись при сгорании бензина, бензин же получают из нефти. А так как нефть образовалась миллионы лет назад, в ней нуклид ^{14}C не сохранился. Вот почему содержание ^{14}C в придорожной траве оказалось сильно заниженным.

Радиоуглеродный метод проверялся на образцах, возраст которых был достоверно известен — по историко-археологическим данным. Это были, например, кусочки дерева из гробниц фараонов (от 3900 до 5600 лет назад) или из развалин Помпеи (2000 лет назад). Результаты измерений подтвердили точность радиоуглеродного метода.

Тайна Туринской плащаницы

В качестве последнего примера использования радиоуглеродного метода рассмотрим более подробно историю определения возраста знаменитой Туринской плащаницы — покрывала, в которое, согласно Евангелию, было завернуто после казни тело Христа и на котором якобы остался отпечаток его лица и тела (рис. 7.4, 7.5).

В 1978 году в итальянском городе Турине была выставлена для всеобщего обозрения плащаница — льняное полотнище длиной 4,3 и шириной 1,1 м с пятнами, похожими на фигуру человека. Эта плащаница

появилась во Франции в середине XIV века, много раз перевозилась из одной церкви в другую, в XVI веке побывала даже в пожаре, но была спасена, а последние 400 лет хранилась в Турине. С тех пор не угасали споры о ее подлинности. Еще в 1390 году папа Климент VII объявил плащаницу подделкой, тогда как папа Павел VI назвал ее в 1978 году самой важной реликвией в истории христианства.

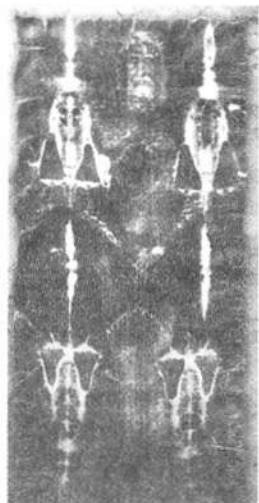


Рис. 7.4. Фотография Туринской плащаницы



Рис. 7.5. Две фотографии головы, изображенной на плащанице: слева — так она выглядит на проявленной фотопленке; справа — на холсте

1 см и длиной 7 см, которую разделили на три части массой по 50 мг, завернули каждую часть в алюминиевую фольгу и упаковали в пронумерованные капсулы из нержавеющей стали. Эти капсулы вместе с тремя контрольными образцами передали представителям трех ведущих ла-

Первую фотографию плащаницы разрешили сделать в 1898 году, и вот уже более ста лет не умолкают споры ученых. Однако совершенствующиеся год от года средства научного анализа (изучение структуры и состава волокон, способа их плетения, наличие на них пыльцы определенных растений, анализ пятен краски и крови и т. д. и т. п.) не только не прояснили вопрос, но еще больше его запутали. Аргументов «за» подлинность плащаницы было не меньше, чем аргументов «против». Главным вопросом, конечно, было время изготовления полотна. Долгое время архиепископ Турина не давал разрешения на радиоуглеродный анализ, и его можно понять, поскольку ученые требовали довольно большого куска. Но когда чувствительность радиоуглеродного метода значительно повысилась, а требования ученых соответственно снизились, было разрешено отрезать от края плащаницы, где не было следов изображения, небольшой кусочек. И вот утром 21 апреля 1988 года в присутствии архиепископа Турина кардинала Баллестреро и большой группы ученых от плащаницы отрезали полоску шириной

бораторий из Аризоны (США), Оксфорда (Англия) и Цюриха (Швейцария). Представители лабораторий не знали, что находится в каждой капсуле — это держалось в секрете; в контрольных образцах была ткань из нубийского захоронения XI–XII веков, ткань, снятая с мумии Клеопатры (начало II века), и нити со старинной ризы, изготовленной во время правления французского короля Филиппа IV (1290–1310).

Во всех лабораториях образцы подвергли прежде всего микроскопическому исследованию и тщательной очистке с целью удаления возможных примесей (в разных лабораториях использовали микропылесос, промывку растворителями с применением ультразвука, обработку моющими средствами, горячими кислотами и щелочами). Затем образцы сжигали, образовавшийся углекислый газ превращали в чистый углерод — графит, в котором и определяли содержание ^{14}C с помощью масс-спектрометра.

Отчеты всех лабораторий были собраны в одном месте — Британском музее и проанализированы, а результаты анализа опубликованы в одном из самых уважаемых научных журналов мира — *Nature* («Природа»); поскольку в работе приняло участие множество исследователей, не удивительно, что у статьи 21 автор! Хотя результаты разных лабораторий несколько отличались, они все же были достаточно близки и указывали на то, что возраст плащаницы составляет примерно 690 лет с ошибкой около 30 лет (возраст по радиоуглеродному методу принято отсчитывать назад от 1950 г.). Хорошо согласовывались данные и контрольных образцов — для их возраста были получены значения 937 лет, 1964 года и 724 года. После введения поправок на изменение содержания ^{14}C в атмосфере в прошлые столетия ученые вынесли решение: с вероятностью не менее 95 % ткань плащаницы изготовлена между 1260 и 1390 годами. Таким образом, папа Климент VII как будто оказался прав: плащаница изготовлена именно тогда, когда о ней появилось первое документированное упоминание. Так радиоуглеродный метод датировки, казалось бы, положил конец спорам, которые длились шесть веков.

Однако в науке редко случается так, чтобы то или иное серьезное заявление не встретило бы возражений. Не стал исключением и анализ возраста плащаницы. Вы помните, как сильно можно было ошибиться с определением возраста травы радиоуглеродным методом, если не учитывать особенности ее роста и «питания» выхлопными газами. Там реальный возраст объекта исследования оказался значительно меньше, чем по данным анализа. Не исключены ошибки и «в другую сторону». Когда результаты исследований ткани плащаницы были опубликованы, российские ученые Д. А. Кузнецов, А. А. Иванов

и П. Р. Велецкий в 1996 году выдвинули против них такой довод. Как известно, плащаница в 1552 году побывала в пожаре. При этом естественно предположить, что ее ткань могла сильно пропитаться дымом. Дым содержит очень мелкие частицы, от которых ткань не всегда можно отмыть, тем более если эти частицы были в ткани сотни лет. Углерод же, содержащийся в частицах дыма, имеет тот же возраст, что и горевшее дерево. Ученые провели модельный эксперимент, воспроизводивший условия средневекового пожара. Конечно, они взяли не плащаницу, а кусок ткани. Оказалось, что в условиях пожара соотношение атомов стабильного и нестабильного углерода в ткани заметно меняется, а это вносит ошибку в радиоуглеродный метод анализа. Такое загрязнение «старого» (времен Христа) углерода ткани плащаницы более «молодым» (средневековым) вполне могло привести к «омоложению» и самой плащаницы, если судить о ее возрасте по количеству нераспавшегося радиоуглерода.

Совсем недавно подлил масла в огонь американский исследователь из Калифорнийского университета Раймонд Роджерс. В 2005 году он опубликовал о Туринской плащанице сенсационную статью. Ее содержание вкратце сводится к следующему. По его данным, в 1988 году для исследования радиоуглеродным методом взяли исключительно неудачный образец: заплатку, которая была сотни лет назад пришита к обгоревшей ткани и затем подкрашена настолько искусно, что стала неотличима от остальной части плащаницы. Поэтому такое трудоемкое исследование было проведено фактически впустую! А изучение Роджерсом некоторых очень медленных химических изменений, которые в течение веков происходят в любых тканях, привело его к выводу о том, что ткань плащаницы имеет возраст (с учетом возможных ошибок) от 1300 до 3000 лет. То есть плащаница вполне могла быть изготовлена в I веке, когда жил Иисус.

Однако не исключено, что споры вокруг плащаницы будут продолжаться, и это нормально для научного исследования.

Как радиация помогла измерить число Авогадро

Вы уже знаете, что 1 моль вещества содержит огромное число частиц — примерно $6 \cdot 10^{23}$ атомов, ионов или молекул. Как же удалось их подсчитать? Методов определения числа Авогадро было придумано много, но только один из первых методов был основан на прямом подсчете атомов. Конечно, полное число атомов в моле вещества не сосчи-

тать даже за все то время, что существует человечество. Но, во-первых, можно считать атомы не в моле, а в небольшой его части, а во-вторых, считать не все атомы, а только небольшую, но заранее известную их часть. Однако начнем по порядку.

В 1903 году один из наиболее талантливых физиков-экспериментаторов XX века Эрнест Резерфорд (1871–1937) показал, что открытый незадолго до этого новый химический элемент радий испускает положительно заряженные частицы, летящие с большой скоростью. Необходимо было выяснить, много ли таких частиц (их назвали альфа-частицами) испускает радий за 1 секунду. Как это сделать? В 1908 году Резерфорд выяснил это очень остроумным способом; в работе ему помогал молодой немецкий физик Ханс Гейгер (1882–1945), именем которого назван счетчик радиоактивного излучения. Для работы они использовали простой прибор, названный спинтарископом. В нем имеется маленькая стеклянная пластинка, покрытая специальным составом — люминофором. Если в темноте к пластинке с люминофором поднести близко радий или какое-либо его химическое соединение, покрытие начнет ярко светиться. Чем меньше радия в образце и чем дальше он расположен от пластинки, тем слабее свечение. Но самое удивительное открывается взгляду, если смотреть на пластинку через сильное увеличительное стекло, а лучше — в микроскоп: вместо равномерного свечения будут видны то там, то тут отдельные яркие вспышки, которые тут же гаснут (рис. 7.6). Впечатление такое, как будто на фоне черного неба видно множество вспыхивающих и гаснущих звезд. Зрелище незабываемое!

Это явление объясняется тем, что каждая альфа-частица, достигшая люминофора, вызывает в нем кратковременную вспышку света. Если частиц много, то и вспышек будет много. Если же частиц мало, то вспышки будут редкими, и их вполне можно будет сосчитать. Каждая вспышка сигнализирует о том, что распался один атом радия, на основании чего Резерфорд заключил: «Впервые в истории стало возможным регистрировать отдельные атомы вещества».

В этом и состояла идея: сосчитать число альфа-частиц, попадающих на пластинку за определенное время на определенном расстоянии от источника излучения, а затем рассчитать общее число частиц, вылетающих из образца. Для этого в лаборатории Резерфорда изготовили прибор,

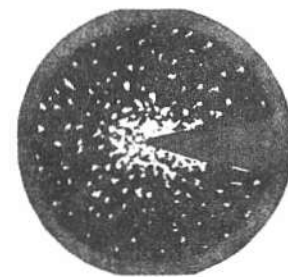


Рис. 7.6. Так выглядят вспышки на экране от попавших в него альфа-частиц

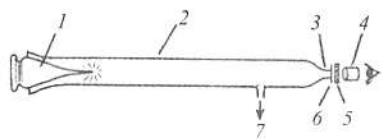


Рис. 7.7. Прибор для определения скорости распада радия:

1 – пробка с укрепленным на острие радиоактивным образцом; 2 – вакуумированная стеклянная трубка; 3 – калиброванное отверстие на конце короткой части трубки; 4 – увеличительное стекло; 5 – стеклянная пластинка со слоем люминофора (со стороны отверстия); 6 – листочек слюды, закрывающий отверстие; 7 – откачка воздуха насосом

темнота, поэтому экспериментатору приходилось заранее провести не меньше часа в темном помещении, чтобы его зрение стало более чувствительным, а следовательно, более восприимчивым к слабым вспышкам света. Физиологи знают, что привыкание (адаптация) глаза к темноте в тысячи раз повышает его чувствительность.

Но это была не единственная и не главная трудность в эксперименте. Оказалось, что альфа-частицы, испускаемые радием, пролетают в воздухе всего несколько сантиметров: им «мешают» лететь по прямой молекулы азота и кислорода в воздухе. Значит, надо было с помощью насоса удалить воздух из трубки, т. е. создать в ней вакуум. А как это сделать, если в трубке на другом ее конце имеется отверстие? Через него воздух будет быстро проникать в трубку, и никакого вакуума создать в ней не удастся. Для таких прекрасных экспериментаторов, как Резерфорд и Гейгер, это не составило особой проблемы. С помощью воска они приклеили снаружи к отверстию листочек слюды. Он был такой тонкий, что практически не задерживал альфа-частицы, которые свободно проходили через него. В то же время воздух уже не мог попасть в трубку и нарушить вакуум.

И вот, наконец, все готово к эксперименту: вакуум достиг нужной глубины, глаза привыкли к темноте. Осталось поудобнее устроиться перед микроскопом и включить секундомер...

Вот одна альфа-частица пролетела сквозь заклеенную слюдой дырочку – вспышка! Проходит несколько секунд – еще одна вспышка, потом третья, четвертая. Опыт длился 10 минут, после чего экспериментатора сменил его помощник: чтобы не было ошибки, опыт надо повторить не один раз, а потом взять среднее значение. Оказалось, что за 10 минут наблюдается в среднем 49 вспышек, значит, столько же альфа-частиц прошло за это время через отверстие. А сколько их всего вылетело за 10 минут из «кончика иголки»?

который он назвал «стреляющей трубкой» (рис. 7.7). Крошечное количество радиоактивного вещества (оно содержало всего 0,055 мг радия) поместили на кончик иголки, укрепленной на одном конце трубки. На другом конце трубки на расстоянии 1,5 м было маленькое отверстие диаметром 1,25 мм, через которое альфа-частицы вылетали из трубки и тут же ударялись о пластинку с люминофором, что сопровождалось вспышкой. Для успешного проведения этого опыта требовалась полная

Расчет очень прост. Альфа-частицы летят из образца равномерно во все стороны. Значит, во сколько раз площадь отверстия меньше площади всей сферы (диаметром 1,5 м), во столько же раз число разлетевшихся частиц больше числа подсчитанных вспышек. Площадь отверстия (она равна $\pi d^2/4$; вы, наверное, уже знаете эту формулу) легко сосчитать по его диаметру d ; она равна 1,23 мм². Площадь сферы радиусом r (она равна $4\pi r^2$), выраженная в квадратных миллиметрах, получается огромной: $2,83 \cdot 10^7$ мм² – в 23 миллиона раз больше площади отверстия. Значит, во столько же раз больше альфа-частиц вылетело из образца, т. е. $49 \cdot 23 \cdot 10^6 = 1,13 \cdot 10^9$ – больше миллиарда! В этом и заключалась хитрость опыта: регистрировалась лишь ничтожная часть частиц, испускаемых радиоактивным источником. Теперь, зная массу радия в образце и время измерения, совсем просто вычислить, сколько альфа-частиц испускает за 1 секунду 1 грамм радия. Оказалось – очень много: $1,13 \cdot 10^9 / (600 \cdot 0,055 \cdot 10^{-3}) = 3,42 \cdot 10^{10}$ – больше 34 миллиардов! Позднее это значение было несколько уточнено: оно оказалось чуть больше – 37 миллиардов. В течение длительного времени эта константа была основной единицей измерения радиоактивности; ее назвали кюри – в честь Марии и Пьера Кюри, французских ученых, открывших в 1898 году радий и выделивших его в чистом виде.

А как с помощью радия определили число Авогадро? Это уже другая история. Еще в 1895 году английский химик Уильям Рамзай (1852–1916), который прославился открытием в воздухе аргона, обнаружил в минерале клевете другой благородный газ – гелий. Впоследствии значительные количества гелия были обнаружены и в других минералах – но только в тех, которые содержали уран и торий. Это казалось удивительным и странным – откуда в минералах мог взяться редкий газ? Когда Резерфорд начал исследовать природу альфа-частиц, испускаемых радиоактивными минералами, стало ясно, что гелий является продуктом радиоактивного распада. Оказалось, что альфа-частицы – это фактически те же атомы гелия, только без электронов и летящие с огромной скоростью. Когда они тормозятся, сталкиваясь с другими атомами, натываясь на стенки сосуда, они захватывают электроны и превращаются в атомы гелия. Значит, каждую секунду один грамм радия выделяет десятки миллиардов атомов гелия. Выделяется гелий и другими радионуклидами, в том числе продуктами распада радия. Поэтому минералы, содержащие радиоактивные элементы, за миллионы лет своего существования выделяют значительные количества гелия. Частично гелий попадает в атмосферу, а частично «застревает» в минералах и может быть там обнаружен чувствительными методами.

Идея эксперимента стала Резерфорду ясна: надо измерить, какой объем гелия выделяется известным количеством радия за определен-

ный срок и исходя из этого объема рассчитать число молей гелия. К тому времени было уже хорошо известно, что 1 моль газа при нормальном атмосферном давлении и температуре 0 °С занимает объем 22,4 литра.

В 1911 году Резерфорд — на этот раз с молодым американским физиком Бертраном Болтвудом (1890—1927) — приступил к решающему эксперименту. Для опыта взяли соль радия, которую одолжила Резерфорду Венская академия наук. Соль содержала 193 мг чистого радия — огромное, особенно по тем временам, количество, стоившее громадных денег. Из-за начавшейся в 1914 году войны Резерфорд не смог вернуть радий в Австрию. Лишь в конце 20-х годов Кембриджский университет, где работал Резерфорд, согласился выплатить за предоставленный радий 3000 фунтов стерлингов — с рассрочкой платежа на 6 лет.

Но вернемся к опыту Резерфорда и Болтвуда. Они насыпали радиоактивную соль в платиновую капсулу с дырочками в крышке, а капсулу поместили в стеклянную трубку из специального тугоплавкого стекла, в которой был создан вакуум. В таком виде прибор оставили на 83 дня. Решив, что времени прошло достаточно, ученые нагрели стеклянную трубку вместе с платиновой капсулой до красного каления; при этом из соли выделился газообразный гелий, количество которого было точно измерено. Расчеты показали, что каждый день соль радия выделяла 0,0206 мм³ гелия (или 0,107 мм³ в расчете на 1 г радия). Зная скорость испускания альфа-частиц радием и учитывая, что альфа-частицы (и, следовательно, атомы гелия) образуются не только из радия, но также из продуктов его распада, ученые рассчитали число атомов гелия в одном моле этого газа. Оно оказалось равным $6,1 \cdot 10^{23}$. В те годы это было самое точное значение числа Авогадро (современное значение $6,0221415 \cdot 10^{23}$). Так опыты с радием помогли подсчитать число атомов в известном количестве вещества. Это было замечательное достижение человеческого разума.

В последующие годы были и другие, не менее выдающиеся достижения в этой области. Они привели к значительным успехам во многих отраслях науки и техники, но одновременно — к взрывам ядерных бомб, к авариям на атомных электростанциях. Но так было всегда: любые достижения науки можно использовать как на пользу, так и во вред человечеству. Как писал Д. И. Менделеев, изобретение Нобелем динамита, конечно, привело к значительному увеличению взрывной силы мин и снарядов; однако ученый надеялся, что мирное использование новых взрывчатых веществ окажется для человечества более важным, чем их военное применение. Эти слова великого химика не потеряли своей актуальности и в наши дни.

ХИМИКИ МУЗИЦИРУЮТ



Возможно, настоящая глава, которой завершается эта книжка, покажется вам неожиданной: речь шла о химии — при чем же здесь музыка! Однако рассказ о музыкальных пристрастиях великих химиков отнюдь не случаен. Музыка — удивительное творение человеческого интеллекта. Комбинация звуковых колебаний, произведенная в нужном сочетании и в определенной последовательности, может оказать сильнейшее воздействие на человека, повлиять на его эмоциональное состояние и даже на поведение. Музыка вдохновляла великих писателей, художников и, конечно, самих композиторов. Известна и обратная связь — многие деятели науки и культуры внесли заметный вклад в развитие музыки. «Высокая одаренность в одной области вовсе не исключает высокой одаренности в других областях», — пишет в статье «Способности и одаренность» академик Борис Михайлович Теплов (1896—1965) — один из самых ярких представителей отечественной психологии. И далее продолжает: «Действительно, из того факта, что человек всю жизнь работал на одном только направлении и достиг в нем больших, иногда даже великих результатов, мы обычно делаем совершенно незаконный вывод, что во всякой другой деятельности он никаких талантов и способностей не имел. Достаточно просмотреть со вниманием биографии крупных деятелей в различных областях творчества, чтобы убедиться в том, что положение “талант как таковой односторонен” не соответствует действительности. Такие примеры, как актерский талант Н. В. Гоголя, музыкальный талант А. С. Грибоедова, живописный и музыкальный талант Т. Г. Шевченко, легко приходят в голову всякому. Но эти примеры говорят вовсе не о каких-то исключительных случаях: вероятно, случаи полной односторонности таланта представляют собой исключение». Далее Б. М. Теплов, в подтверждение своей мысли, приводит интересные факты из биографии известных музыкантов — Ф. Шопена, К. М. Вебера, А. К. Серова, Дж. Россини, А. К. Лядова, С. И. Танеева и др.

Ну а как обстоит дело с химиками с точки зрения их музыкальных дарований? Всем известен пример Бородина, сочинившего оперу «Князь Игорь», симфонии, струнные квартеты. Доктор медицины, а позднее — профессор химии Александр Порфирьевич Бородин (1833—1887) с детства страстно увлекался в равной степени музыкой и химией,



Рис. 8.1. На памятной монете Госбанка России (1993) слева от портрета А. П. Бородина выгравированы химические приборы, которые он использовал в своих опытах, а справа – первый такт одного из его музыкальных произведений

читали ноты и на первый год уже переиграли в четыре руки чуть не все написанное. Таким образом, мы знали чуть не наизусть все симфонии Бетховена и других и в особенности заигрывались и вдохновлялись Мендельсоном... Чтобы познакомиться с камерной музыкой, я самоучкой стал играть на скрипке, а А. П., также самоучкой, на виолончели... Мы не упускали никакого случая поиграть трио или квартет, где бы то ни было и с кем бы то ни было. Ни непогода, ни дождь, ни слякоть – ничто нас не удерживало, и со скрипкой под мышкой, а А. П. с виолончелью на спине часто делали концы пешком, так как денег у нас не было ни гроша...» Достоин упоминания, что и жена Бородина, Екатерина Сергеевна, была блестящей пианисткой, а также композитором; ей он посвятил свой второй квартет, романсы.

И все же сам Бородин считал главным делом своей жизни не сочинение музыки, а занятия наукой. Бородин опубликовал множество статей по органической химии, разработал новые способы синтеза различных органических соединений. Его имя занимает почетное место в сборнике «Выдающиеся химики мира», опубликованном в 1991 году. В анналах химии навсегда останется реакция Бородина – она известна химикам всего мира.

Только за время трехлетней заграничной командировки, работая в химических лабораториях Гейдельберга, Парижа и Пизы, молодой Бородин (ему тогда не было и 30 лет) опубликовал более 10 работ по химии на немецком, французском и итальянском языках. Его работо-

и эту страсть он пронес через всю жизнь (рис. 8.1). Великий русский химик Николай Николаевич Зинин (1812–1880), у которого делал свои первые шаги в химии Бородин, не одобрял его увлечения музыкой. «Поменьше занимайтесь романсами, – говорил он будущему замечательному композитору, определившему целое направление в русской симфонической музыке. – На вас я возлагаю все свои надежды... А вы все думаете о музыке и двух зайцах». Однако жить без музыки Бородин не мог. С 9 лет начал он сочинять, играл на рояле, брал уроки игры на флейте. Товарищ Бородина с детских лет М. Р. Шиглев вспоминает: «Мы оба бойко играли и свободно

способность была удивительной; так, находясь в Гейдельберге, он в течение 12 часов – с 5 утра до 5 вечера – работал в лаборатории, а затем, после отдыха, с 8 вечера до полуночи отдавал себя музыке. В таком темпе Бородин работал всю жизнь, и это не прошло для него бесследно: он скоропостижно скончался во время костюмированного вечера в возрасте 53 лет.

Примером А. П. Бородина далеко не исчерпывается «взаимосвязь» музыки и химии. Ученику, другу и преемнику Бородина, химику Александру Павловичу Дианину, посвятил свой романс «Сомнение» Николай Андреевич Римский-Корсаков. Беззаветно любил музыку ближайший друг Бородина с молодых лет Дмитрий Иванович Менделеев. По его словам, музыка всегда глубоко и сильно возбуждала его чувства. Недаром великий знаток музыки – Владимир Васильевич Стасов называл Менделеева «музыкальной натурой». Находясь в заграничной командировке в Германии (в те же годы, что и Бородин), Менделеев постоянно напевал мелодию из бетховенской «Леоноры», что дало повод Бородину называть его в шутку этим именем. И. Д. Менделеев, младший сын Дмитрия Ивановича, писал: «Музыкантом отец не был, и когда напевал, иногда фальшивил. Но музыку чувствовал и любил страстно. Музыка на него сильно действовала. Прослушав при мне какую-то мелодию, он сказал: “Вот это я хотел бы слышать, когда буду умирать”». А ученик Дмитрия Ивановича и его сотрудник в течение многих лет физик Борис Петрович Вейнберг оставил такое необычное воспоминание о лекциях Менделеева, которые он посещал в юности: «Будь я музыкантом, я, думаю, мог бы положить лекции Менделеева на музыку...»

Все студенты-химики изучают перегруппировку Арбузова – эта реакция стала универсальным методом синтеза фосфорорганических соединений. Менее известны музыкальные дарования выдающегося ученого, одного из основателей химии фосфорорганических соединений академика А. Е. Арбузова (1877–1968). По воспоминаниям современников, Александр Ерминингельдович был натурой кипучей и многогранной, знатоком и тонким ценителем искусства. А первое место среди искусств занимала в жизни Арбузова музыка. Он увлекся ею еще в детстве, и эту любовь пронес через всю свою долгую жизнь. Он был прекрасным скрипачом и неоднократно давал сольные концерты, работал концертмейстером Дома ученых в Казани. Арбузов не только исполнял произведения любимых композиторов – Рахманинова, Глазунова, Бородина, Гайдна, но и пропагандировал их произведения в своем родном городе – Казани. Случайно заговорив с собеседником о музыке, он мог прочитать целую лекцию по ее истории. Известны музыковедческие работы Арбузова, посвященные Бородину и Могущей кучке.

В 1911 году Арбузов организовал квартет при Казанском университете, в котором играли профессор-медик Бургсдорф (виолончель) и два ученика Арбузова — Н. Н. Парфентьев (впоследствии — профессор-математик, ректор Казанского политехнического института) и Евлампиев (впоследствии — профессор, декан химического факультета Казанского университета). Концерты квартета всегда привлекали большую аудиторию слушателей. По инициативе Арбузова был также организован симфонический оркестр из профессорско-преподавательского состава вузов Казани. По его же инициативе почти все заседания Татарского отделения химического общества им. Д. И. Менделеева начинались с исполнения симфонических произведений. Играл Арбузов не только на скрипке. Как-то в молодости он забрел в Федоровский монастырь и увидел в руках одного из монахов гармонь. Поддавшись искушению, Арбузов попросил гармонь и заиграл русские плясовые мелодии. Монахи послушали-послушали — и вдруг, подбрав рясы, пустились в пляс. Свой последний «сольный концерт» на гармонии Арбузов дал, будучи уже в преклонном возрасте, на волжской пристани Шеланга, где он проводил летний отпуск. «Музыка помогала мне всегда и во всем, — вспоминал академик. — Второй моей страстью были живопись и валяние». Действительно, как утверждают специалисты, Александра Ерминингельдовича отличало исключительное, почти профессиональное мастерство в живописи. Лирические пейзажи Арбузова, выполненные акварелью и маслом, до сих пор украшают его музей-квартиру в Казани.

«Химики-музыканты» были, конечно, не только в России. Большими музыкальными способностями обладал знаменитый немецкий физикохимик Вильгельм Оствальд. По вечерам он любил играть на скрипке или же на рояле — в четыре руки вместе со своей женой. Был он и отличным виолончелистом и играл в оркестре города Дерпта (ныне Тарту), которым дирижировал... профессор физики Артур Этинген.

Игрой на фортепиано в четыре руки очаровал свою будущую жену Анри Сент-Клер Девиля, известный французский химик, изготовивший в 1872 году из сплава платины с иридием международные эталоны метра и килограмма, разработавший технологический способ получения алюминия и магния, открывший явление термической диссоциации веществ, сделавший ряд других важных открытий. А ведь в молодости он долго колебался, выбирая между естественными науками и музыкой, первые уроки которой он получил от матери. И лишь пример любимого старшего брата Шарля, будущего геолога, академика, решил дело в пользу химии.

Чехословацкий химик Эмиль Воточек (1872—1950), основные работы которого посвящены исследованиям сахаров, был одновременно

автором многих музыкальных пьес. Шведский биохимик Аксель Хуго Теорелль (1903—1982), получивший в 1955 году Нобелевскую премию по физиологии и медицине за работы в области химии ферментов и механизма их действия, был не только хорошим виолончелистом, но и руководителем Стокгольмского филармонического общества. Еще один лауреат Нобелевской премии по химии, американец Уильям Нанн Липскомб (он получил ее в 1976 году за исследование структуры бороводородов и природы химических связей в них) играл на кларнете в симфоническом оркестре города Миннеаполиса. Такие примеры при желании можно продолжить. Но разве есть какая-либо связь между музыкальными увлечениями химиков и их основной профессией? (Поставим все же химию на первое место, если так делал даже Бородин.)

Многие открытия, в том числе и в области химии, часто совершаются как бы случайно: вдруг происходит нечто вроде «озарения» и долго мучившая ученого проблема вдруг получает свое разрешение. Как правило, этому предшествует длительная и кропотливая работа, факты постепенно накапливаются в подсознании и ждут лишь толчка, чтобы сформироваться в стройную логическую систему. Иногда это происходит даже во сне (вспомним знаменитые «вещие» сны Кекуле и Менделеева). Но такой толчок может дать и музыка, которая для ее ценителя и почитателя является сильнейшим эмоциональным фактором:

За музыку только дело.

Итак, не размеряй пути.

Почти бесплотность предпочти

Всему, что слишком плоть и тело.

Эти слова Поля Верлена (в переводе Б. Пастернака) воспринимаются в таком контексте почти буквально. Вот какая история произошла с американским физикохимиком Казимиром Фаянсом (1887—1975), внесшим значительный вклад в развитие учения о взаимодействии ионов с растворителем в растворах. Фаянс известен также как автор так называемого правила сдвига, или закона радиоактивного смещения. Он сделал это открытие, будучи молодым доцентом Высшей технической школы в городе Карлсруэ. Как вспоминает сам Фаянс, основная идея этого закона пришла к нему 23 ноября 1912 года в тот момент, когда он слушал оперу Рихарда Вагнера «Тристан и Изольда». Пять месяцев спустя Фаянсу удалось решить еще одну научную проблему: он нашел взаимосвязь между стабильностью и атомной массой изотопов радиоактивного элемента. Поразительно, но решение этой проблемы также пришло к нему в концертном зале, на этот раз — во время исполнения комической оперы «Царь и плотник, или Два Петра». Когда спустя много лет Фаянс, ставший к тому времени профессором физи-

ческой химии в Мюнхене, рассказал об этих случаях своему коллеге, известному физико-теоретику Арнольду Зоммерфельду (1868–1951), который тоже был страстным почитателем музыки, тот сказал, что первая из обнаруженных Фаянсом закономерностей имеет для науки гораздо большее значение, чем вторая. И это не удивительно, на полном серьезе продолжал Зоммерфельд, поскольку достоинства оперы «Царь и плотник» (она написана почти забытым сейчас немецким композитором первой половины XIX века Густавом Лорцигом) не идут ни в какое сравнение с выдающимся произведением Рихарда Вагнера.

И уж совсем забавный случай произошел в доме того же Фаянса (он тогда еще жил в Германии), когда к нему зашел полицейский чиновник, чтобы выяснить какое-то дело. Среди прочих был задан вопрос о профессии, на что Фаянс ответил: «Профессор физической химии». Полицейский записал все сведения, а потом прочитал вслух: «Профессор музыкальной химии!» (Следует сказать, что по-немецки *Professor der physikalische Chemie* и *Professor der musikalische Chemie* действительно звучат похоже; кстати, сам Фаянс считал, что полицейский сделал не такую уж большую ошибку.)

Музыкальные мотивы можно проследить и в деятельности других химиков. В 1864 году английский химик Джон Ньюлендс (1837–1898), расположив все известные тогда элементы вертикальными столбцами по 7 элементов в столбце, обнаружил закономерность, которую назвал «законом октав»: близкие по свойствам элементы, как и близкие по звучанию ноты в музыкальной октаве, можно было обнаружить через каждые 7 элементов. «Восьмой элемент, начиная с данного, — писал Ньюлендс, — является как бы повторением первого, подобно восьмой ноте октавы в музыке». Вряд ли музыкальная аналогия была у Ньюлендса случайной, если учесть его итальянское происхождение по материнской линии. Совсем еще молодой ученый (ему было тогда только 25 лет), он уже успел прославиться тем, что сражался за свободу Италии в войсках Гарибальди. Но с «законом октав» Ньюлендсу не повезло: таблица имела множество недостатков и современники совершенно ее проигнорировали. Чего стоит только ехидное замечание профессора физики Джорджа Фостера (1835–1919): не пробовал ли Ньюлендс поискать какую-нибудь другую закономерность среди элементов, расположив их, например, в алфавитном порядке названий...

В заключение вспомним еще раз известное высказывание Козьмы Пруtkова о том, что «специалист подобен флюсу: полнота его односторонняя». Мы видели на примере многих выдающихся личностей, что жизнь опровергает это утверждение. Поэтому, даже при самом неистовом увлечении химией, не следует забывать, что существуют музыка, живопись, театр, художественная литература, — одним словом — искусство, которое не только не мешает, но даже помогает ученому в его работе.