

Коварные кристаллы льда. Многие животные великолепно переносят заморозку. Особенно этим славятся холоднокровные: тритоны, лягушки и рыбы могут быть помещены в лед, сохранены в течение некоторого времени, разморожены – и даже после такой процедуры они будут чувствовать себя великолепно. Некоторые теплокровные существа также способны переносить холод, впадая в длительную спячку. Но с их замораживанием дела обстоят гораздо сложнее. Самая большая опасность в заморозке теплокровных состоит в том, что при температуре ниже нуля вода внутри клеток превращается в кристаллы льда и разрывает ткани. Для предотвращения этого во время охлаждения можно применять специальные вещества – криопротекторы, которые понижают температуру замерзания воды и поэтому препятствуют образованию кристаллов.

Глицерин – лекарство от замерзания у насекомых и лягушек. Давно известно, что глицерин предохраняет живые организмы от повреждения при замораживании. Глицерин в высокой концентрации содержится в гемолимфе (крови) насекомых, и с этим связывают их способность выживать при низких температурах. Так, у осы к наступлению зимы концентрация глицерина составляет около 3% всего жидкого содержимого этого насекомого. В результате температура замерзания гемолимфы осы снижается до $-17,5^{\circ}\text{C}$.

Свойство глицерина быть хорошим криопротектором широко используется в биологии и медицине. Известно, что эритроциты (красные клетки крови) можно много месяцев хранить без повреждения в замороженном состоянии, если предварительно погрузить их в глицерин. С помощью глицерина можно замораживать даже целых животных. Так, у замороженных до температуры -14°C хомяков, в кровь которых был добавлен глицерин, исчезали все признаки жизни (дыхание, сердцебиение), и они становились совершенно твердыми. Однако пробыв в таком состоянии около часа, они оттаивали и возвращались к жизни.

Мгновенная заморозка – универсальный криопротектор. Охладить до очень низких температур и не дать образоваться кристаллам льда можно даже тогда, когда не удастся окружить все клетки глицерином. Для этого нужно резко замедлить диффузию – ведь только диффузия молекул воды помогает им соединиться в кристаллы льда. Поэтому если очень резко понизить температуру воды, то ее молекулы застынут на месте, так и не образовав кристаллов. Вода при такой заморозке превратится в стекловидное тело. Действительно, было установлено, что при заморозке со скоростью $1-10^{\circ}\text{C}$ в секунду –

сразу на всю глубину тела – можно обойтись и без криопротекторов.

А если увеличить давление? Еще в 1960-е годы была предложена идея использовать для управления кристаллизацией воды высокое давление. Идея эта основана на понижении температуры фазового перехода «вода – лед» при повышении давления. Так, например, при давлении 2045 атм температура кристаллизации чистой воды составляет $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а значит, при таком давлении воду можно охлаждать, например, до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, не боясь, что образуются кристаллы льда.

Давление около 2 тыс. атм с успехом используется сейчас при замораживании продуктов в пищевой промышленности. При этом после долгого хранения при максимально низкой температуре вкус замороженного продукта почти не отличается от свежего, так как при заморозке кристаллы льда не образовывались, а значит, не были разрушены клетки.

К сожалению, метод быстрой заморозки, использование высокого давления и другие попытки экстраполировать принципы замораживания еды или хомяков и лягушек на более крупных животных пока не привели к желаемому результату. До настоящего времени еще не существует способов, позволяющих заморозить и разморозить, не повредив его, даже отдельный орган, не говоря уже о человеке в целом. Однако имеющиеся данные вполне позволяют надеяться на то, что фантастические идеи смогут стать реальностью.

ЧТО ОБЩЕГО МЕЖДУ ЧУДОМ СВ. ЯНУАРИЯ И БУРОВЫМ РАСТВОРОМ?

В этой главе речь пойдет о вязкости жидких суспензий. Вернее, о том, как она изменяется.

Вязкость (или внутреннее трение). Это свойство жидкостей характеризует сопротивление, которое они оказывают при течении. Бензин, вода и молоко – относительно жидкие, они текут лучше, чем более вязкие жидкости, такие как мед, кетчуп или сметана. Значение вязкости η можно определить, измеряя горизонтальную силу F , которую необходимо приложить к пластинке площадью S , плавающей на тонком слое жидкости толщиной h , чтобы она двигалась со скоростью v (рис.78). В соответствии с формулой, предложенной еще Ньютоном,

$$\eta = \frac{F/S}{v/h},$$

где выражение в числителе называют напряжением сдвига, а в знаменателе – скоростью сдвига. В единицах СИ вязкость измеряется в $\text{Па} \cdot \text{с}$, а в единицах СГС – в пуазах ($0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$). В таблице 8 приведены значения вязкости различных жидкостей.

Как правило, и особенно для органических веществ, вязкость

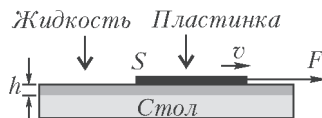


Рис. 78. Опыт для определения вязкости жидкости

Таблица 8

Вязкости различных жидкостей

Жидкость	Вязкость, в пуазах	Жидкость	Вязкость, в пуазах
Ацетон	0,003	Глицерин	15
Бензин	0,006	Мед	100
Вода	0,01	Кетчуп	500
Спирт	0,012	Горчица	700
Ртуть	0,016	Сметана	1000
Молоко	0,03	Сургуч	100000000000
Машинное масло	17		

растет с возрастанием относительной молекулярной массы. Вязкость также увеличивается, когда между частицами жидких суспензий или между макромолекулами возникают связи, приводящие к возникновению пространственных структур. Поэтому вязкость таких жидкостей называют структурной вязкостью, а ее величина зависит от условий течения – обычно она уменьшается с ростом скорости сдвига.

Именно зависимость вязкости краски от скорости сдвига (рис.79) помогает наносить ее, например, на стену. Когда краску не перемешивают (скорость сдвига равна нулю), ее вязкость

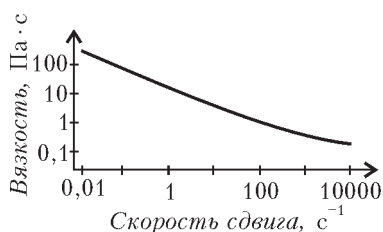


Рис. 79. Зависимость вязкости водорастворимой краски от скорости сдвига

очень высока. Это значит, что при хранении краска практически не расслаивается на краситель и растворитель. Когда мы вынимаем кисть из банки с краской и делаем это достаточно медленно (скорость сдвига меньше 1 с^{-1}), то на кисти остается довольно много краски, так как вязкость ее еще достаточно высока. Коснувшись кистью с

краской стены, мы начинаем интенсивно двигать ею из стороны в сторону (скорость сдвига лежит в интервале от 100 до 1000 с^{-1}), уменьшая этим вязкость краски в сотни раз. В результате краска становится жидкой, стекает с кисти и растекается тонким слоем по поверхности стены. Но сразу после того как мы перестаем «дергать» этот слой краски и начинаем красить соседний участок, вязкость только что нанесенного слоя краски увеличивается. Если бы этого не происходило, то краска, как вода, стекала бы со стены. Таким образом, зависимость вязкости краски от скорости сдвига служит ее важнейшей характеристикой, определяющей технологию крашения. То же относится и к косметическим кремам, изменение вязкости которых в широком диапазоне скоростей сдвига является показателем их качества.

Святой великомученик Януарий. Этот небесный покровитель Неаполя был казнен язычниками в начале IV века. С тех пор его запекшаяся кровь хранится в специальном сосуде. Первые упоминания о сосуде с кровью св. Януария и связанном с этой реликвией чуде относятся к XIV веку. Чудо святого Януария за редкими исключениями проявляет себя на протяжении 600 последних лет и представляет собой таинственное превращение на короткое время запекшейся крови святого в

багряную жидкость на глазах у всех присутствующих. Три раза в год – в мае, сентябре и декабре – неаполитанцы стекаются в городской собор, чтобы стать свидетелями чуда. В атмосфере, близкой к истерии, архиепископ демонстрирует стеклянный сосуд, содержащий засохшую кровь св. Януария, потом начинает его встряхивать и, наконец, объявляет, что кровь стала жидкой или осталась засохшей (рис.80). Последнее происходило считанные разы и всегда рассматривалось как предзнаменование беды – например, чумы 1527 года (десятки тысяч умерших) или землетрясения в Южной Италии 1980 года (три тысячи жертв).



Рис. 80. В ожидании чуда св. Януария

Если в сосуде действительно находится кровь св. Януария, то спонтанно перейти из твердого (запекшегося) состояния в жидкое она не может. Не поможет этому и встряхивание. Есть, однако, целый класс веществ, вязкость которых уменьшается иногда в тысячи раз при встряхивании или перемешивании. Поэтому ученые из Итальянской ассоциации изучения паранормальных явлений утверждают, что в чаше, по-видимому, содержится коллоидный раствор гидроокиси железа $\text{FeO}(\text{OH})$, который внешне напоминает кровь, будучи темно-коричневым и почти твердым гелем, но стоит его потрясти, и он разжижается. Такие жидкие смеси называют тиксотропными.

Тиксотропия. Этот термин (от греч. *thixis* – прикосновение и *tropé* – поворот, изменение) описывают способность гелей, паст и жидких суспензий уменьшать вязкость при перемешивании или встряхивании и возвращаться к первоначальной вязкости в состоянии покоя, когда заканчивается механическое воздействие. Как правило, тиксотропными являются желеобразные жидкости, состоящие из крупных и нитевидных молекул и поэтому имеющие очень большую вязкость. Встряхивание уменьшает вязкость тиксотропной жидкости, так как оно

разрывает межмолекулярные (водородные) связи между ее молекулами или микрочастицами, давая возможность соседним слоям жидкости двигаться свободнее относительно друг друга.

Буровые растворы должны быть тиксотропными. При бурении скважины части породы, разрушенной долотом, необходимо поднять на поверхность. Для этого по колонне бурильных труб в скважину закачивают буровой раствор (промывочная жидкость или буровой шлам), где он подхватывает частицы породы и выносит их на поверхность (рис.81). Более вязкий

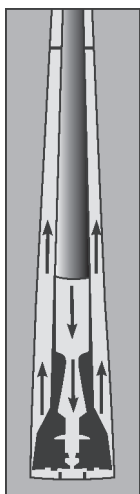


Рис. 81. Движение бурового раствора

раствор вынесет на поверхность больше взвешенных в нем выбуренных частиц породы. Но для закачивания вязких жидкостей требуется большее давление, а это дополнительные износ и поломки в буровом оборудовании.

Сто лет назад буровой раствор представлял собой смесь глины и воды, и часто, для того чтобы сделать его, рабочие выпускали стадо коров в карьер, заполненный водой. Грязь, которая оставалась после стада, потом закачивали в буровую скважину. Сейчас инженеры больше не полагаются только на воду, глину и коров. Вместо этого они тщательно разрабатывают составы и смеси, которые соответствовали бы определенным требованиям при различных условиях бурения. Современные буровые растворы – это кровь скважины, без которой современные глубокие скважины не могут существовать.

Циркуляция бурового раствора в скважине иногда прерывается. Это может произойти по ряду причин, в том числе и при плановом поднятии на поверхность колонны бурильных труб для замены долота. При отсутствии циркуляции раствора части породы, отслоившиеся от стенок в процессе бурения, могут оседать на дно шахты скважины и создавать пробки, которые способны вызвать ряд серьезных проблем. Существуют буровые растворы, технологические свойства которых предотвращают образование осадка выбуренной породы. При уменьшении скорости передвижения вязкость этих растворов увеличивается, они превращаются в гель, который способен удерживать частицы во взвешенном состоянии. Когда раствор вновь начинает двигаться, его плотность и вязкость значительно уменьшаются. Таким образом, буровые растворы должны быть тиксотропными.

КАК СМОТРЕТЬ СКВОЗЬ СТЕНУ?

Мы привыкли к тому, что многие тела непрозрачны. Из-за своей низкой энергии фотоны видимого света не могут прорваться внутрь тел и «осветить их изнутри». Кроме того, длины волн видимого света (400–700 нм) гораздо больше промежутков между атомами. Поэтому только используя излучение с очень короткой длиной волны, можно сделать непрозрачные тела прозрачными. Такое излучение было открыто более 110 лет тому назад.

Рентген — первый лауреат Нобелевской премии. В 1895 году немецкий физик Вильгельм Рентген открыл неизвестные ранее лучи (X-лучи), проникающие через непрозрачные преграды. Сообщение Рентгена вызвало огромный интерес, и медики сразу осознали значение рентгеновского излучения (как его теперь называют) для диагностики. На время X-лучи стали сенсацией, о которой растребили по всему миру газеты и журналы. В 1901 году Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике, хотя об истинной природе X-лучей было известно очень мало. При вручении премии было сказано, что «нет сомнения в том, сколь большого успеха достигнет физическая наука, когда эта неведомая раньше форма энергии будет достаточно исследована». Понадобилось около 10 лет для объяснения волновой природы X-лучей, а впоследствии за работы в области рентгеновских лучей было присуждено еще семь Нобелевских премий. Кроме того, рентгеновским лучам обязаны такие великие открытия, как расшифровка структуры молекул гемоглобина, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и белков, ответственных за фотосинтез (Нобелевские премии 1962 г. и 1988 г.).

«Вышлите мне немного лучей в конверте». Через год после открытия Рентгеном X-лучей он получил письмо от английского моряка: «Сэр, со времен войны у меня в груди застряла пуля, но ее никак не могут удалить, поскольку ее не видно. И вот, я услышал, что Вы нашли лучи, через которые мою пулю можно увидеть. Если это возможно, вышлите мне немного лучей в конверте, доктора найдут пулю, и я вышлю Вам лучи назад». Ответ Рентгена был следующим: «В данный момент я не распо-

лагаю таким количеством лучей. Но если Вам нетрудно, вышлите мне свою грудную клетку, я найду пулю и отошлю Вам грудную клетку назад».

Что такое X-лучи? Рентгеновская трубка (рис.82) – это стеклянная колба, из которой откачан воздух до давления менее

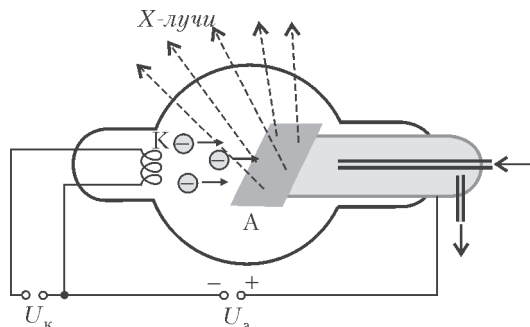


Рис. 82. Схематическое изображение рентгеновской трубки. Стрелки в правой части рисунка показывают течение воды, охлаждающей анод

0,1 Па. В трубке находятся электроды – катод К и анод А, между которыми приложено постоянное напряжение U_a , равное от 1 до 10000 кВ. Электроны, вылетающие из раскаленной нити катода, разгоняются под действием электрического поля и попадают на анод. При этом электрон, столкнувшийся с атомом поверхности анода, может быть либо отклонен его ядром так, как изменяет траекторию кометы притяжение ближайшей планеты (рис.83, слева), либо вышибает один из электронов внутренней оболочки атома, ионизуя его (рис.83, справа).

В первом случае замедление электрона приводит к излучению фотона рентгеновского излучения, длина волны которого может лежать в диапазоне от 0,01 до 10 нм (непрерывный спектр). Интенсивность такого излучения пропорциональна атомному номеру (заряду ядра Z) химического элемента, из которого сделан анод. Чем выше номер элемента, тем сильнее его ядро может затормозить летящий электрон и тем большей энергией будет обладать фотон рентгеновского излучения. Ну и конечно, чем большее напряжение приложено между катодом и анодом рентгеновской трубки, тем больше мощность рентгеновских лучей. При этом с ростом напряжения минимальная длина волны рентгеновского фотона уменьшается.

Во втором случае, когда после столкновения с электроном атом ионизуется, место выбитого электрона сразу занимает

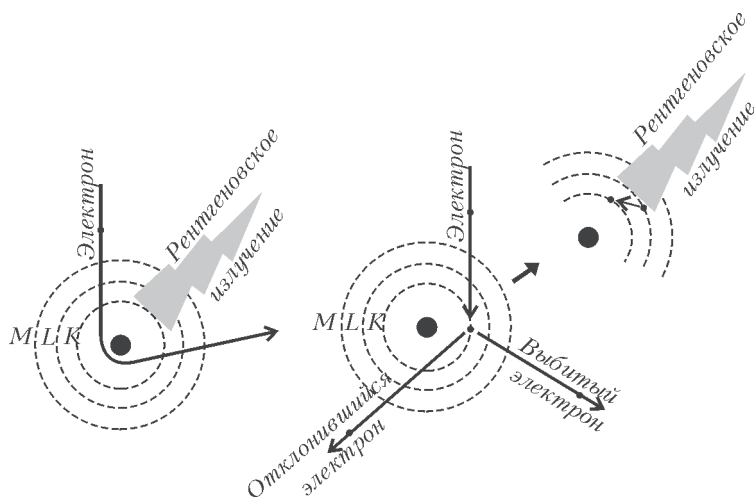


Рис. 83. Два механизма генерации рентгеновского излучения: слева – отклонение электрона ядром атома, справа – ионизация атома с последующей заменой выбитого электрона электроном из более «высокой» оболочки

электрон с более высокой оболочки, а разность потенциальных энергий выделяется в виде энергии рентгеновского фотона с частотой, соответствующей разнице уровней для данного атома. Так, например, из алюминия ($Z = 13$) выбивают фотоны с длиной волны 0,8 нм, из меди ($Z = 29$) – 0,15 нм, а из платины ($Z = 78$) – 0,02 нм. Эти длины волн назвали характеристическими, так как они характеризуют материал, из которого сделан анод рентгеновской трубки. Поэтому спектр рентгеновского излучения выглядит как наложение плавной кривой (первый механизм) и пиков, соответствующих характеристическим частотам материала анода (рис.84). Согласно закону Мозли, длины

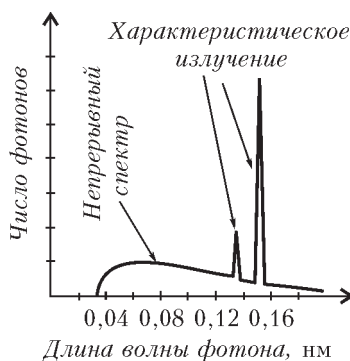


Рис. 84. Спектр рентгеновского излучения медного анода. Пики характеристического излучения соответствуют переходу электронов с M (левый пик) и L (правый) оболочек на место выбитого электрона K оболочки

волн характеристического излучения уменьшаются обратно пропорционально атомному номеру элемента Z .

Из всей мощности, подводимой к рентгеновской трубке, в рентгеновское излучение преобразуется не более 1% , а все остальное превращается в тепло, разогревающее анод. Поэтому приходится использовать систему охлаждения анода и делать его из тугоплавкого металла, например вольфрама.

Что такое рентгеновская спектроскопия? Каждый химический элемент особенно сильно поглощает рентгеновское излучение строго определенной, характеристической длины волны. При этом происходит переход атома из нормального состояния в ионизованное с одним удаленным электроном. Поэтому измеряя частоты рентгеновского излучения, на которых поглощение особенно велико, можно сделать вывод о том, какие элементы и в каком отношении входят в состав вещества. Это и составляет основу рентгеновской спектроскопии материалов.

Почему кости останавливают рентгеновские лучи? Проникающая способность рентгеновских лучей, а другими словами их жесткость, зависит от энергии их фотонов – фотоны с меньшей длиной волны проникают глубже. Принято называть излучение с длиной волны больше 0,1 нм мягким, а остальное – жестким. Как следует из таблицы 9, для диагностических целей следует использовать жесткое излучение с длиной волны не более 0,01 нм, иначе рентгеновские лучи не пройдут через тело человека.

Оказалось, что вещество тем больше поглощает рентгеновское излучение, чем больше плотность материала:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Таблица 9

Зависимость проникающей способности рентгеновского излучения от его длины волны

Энергия фотона, пДж	Частота излучения, Гц	Длина волны, нм	Толщина материала, задерживающая половину излучения, мм			
			Бетон	Свинец	Тело человека	Алюминий
0,00016	$2,4 \cdot 10^{17}$	1,24	0,0009	0,0001	0,002	0,002
0,0016	$2,4 \cdot 10^{18}$	0,124	0,15	0,005	0,001	0,1
0,016	$2,4 \cdot 10^{19}$	0,0124	17	0,1	39	15
0,16	$2,4 \cdot 10^{20}$	0,00124	46	9	93	42
1,6	$2,4 \cdot 10^{21}$	0,000124	132	12	298	111