

С.П. Глаголев

**Кварцевое стекло. Его
свойства, производство и
применение**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
С11

С.П. Глаголев
С11 Кварцевое стекло. Его свойства, производство и применение / С.П. Глаголев –
М.: Книга по Требованию, 2015. – 210 с.

ISBN 978-5-458-24776-4

Настоящая книга появляется в переломный для истории кварцевого стекла в государстве момент, когда после длительной работы по усвоению методов его изготовления и обработки и после длительной борьбы за развертывание у нас производства этого нового весьма ценного материала мы являемся наконец свидетелями решительных шагов в этом направлении. Книга содержит описание свойств кварцевого стекла, методов производства и отработки, а также применений. Книга рассчитана на работников, занятых производством и обработкой кварцевого стекла, и на широкие круги Специалистов, сталкивающихся с вопросами его применения

ISBN 978-5-458-24776-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2015

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2015

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Настоящая книга имеет своей целью ознакомление советского читателя с основными вопросами производства, обработки и применения прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла.

Литературы, посвященной этому вопросу, на русском языке почти нет. Краткие сведения, которые можно получить из книг, преследующих совершенно другие задачи и лишь мимоходом уделяющих несколько страниц кварцевому стеклу, мало когда могут удовлетворить. Что касается иностранной литературы, то она представлена главным образом в виде отдельных статей, разбросанных по различным журналам.

При таком положении вещей получить всесторонние и более или менее исчерпывающие сведения о кварцевом стекле представляется для отдельного читателя делом далеко не легким. Между тем, зарождающаяся у нас в Союзе промышленность кварцевого стекла требует пристального к себе внимания со стороны самых разнообразных групп специалистов, поскольку его практическое применение имеет серьезное значение и для электрика, и для химика, и для теплотехника, не говоря уже о лабораторных работниках.

Все это побудило нас сделать попытку систематизировать и собрать воедино отдельные, большей частью разрозненные, данные о свойствах, методах производства и обработки и применениях кварцевого стекла. При этом мы отнюдь не претендуем на полноту, особенно в части, касающейся техники производства и обработки, так как немногие отрасли капиталистической промышленности отличаются столь сильным стремлением засекретить новые достижения, как то имеет место в области кварцевого стекла.

Мы решили начать наше изложение с некоторых общих вопросов, касающихся специфических особенностей внутреннего строения стеклообразного состояния вещества и вообще кварцевого стекла в частности. Мы исходили при этом из той доказанной всем развитием науки и техники истины, что лишь глубокое знание природы вещей обеспечивает успешное разрешение поставленных практикой задач.

История кварцевой индустрии на Западе и в Америке является лучшим примером тех преимуществ, которые вытекают из тесного сотрудничества научного исследования с техническим использованием полученных данных, когда отдельные научные открытия помогают лучшему овладению производством и, наоборот, те или иные технические мероприятия позволяют глубже проникнуть в скрытую сущность физических и химических процессов.

Нам кажется, что нарождающаяся у нас кварцевая промышленность с самого начала должна пойти по пути широкого использования научно-исследовательской работы для укрепления своей производственной базы и разрешения трудных вопросов овладения техникой Запада.

Именно поэтому мы решили предпослать изложению техники производства, обработки и применения кварцевого стекла ряд соображений относительно его внутреннего строения, а также краткие сведения о его химических и физических свойствах. Мы надеемся, что более близкое знакомство с этой стороной вопроса позволит читателю легче овладеть практикой работы с этим новым материалом.

С. Глаголев

Лаборатория ультрафиолетовых лучей.
Москва

СТЕКЛООБРАЗНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

ТЕОРИЯ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Изучая окружающие нас тела, мы делим их обычно на три общие группы, которые согласно принятой терминологии называем твердым, жидким и газообразным состоянием вещества. Мы говорим, что тело находится в твердом состоянии, когда отдельные частицы, его составляющие, настолько сильно связаны между собой, что обеспечивают сохранение его формы даже при наличии внешних деформирующих сил. Совершенно иное имеет место в случае жидкости или газа. В жидком состоянии частицы вещества хотя и продолжают быть взаимно связанными, но связь эта настолько слаба, что уже не обеспечивает сохранения постоянства формы. Внешняя форма жидкого тела определяется характером действующих на него внешних сил (сила тяжести и сопротивление стенок сосуда в обычных условиях); при отсутствии последних все без исключения жидкие (в обыденном значении этого слова) тела принимают одну и ту же форму шара, как это имеет место например в опыте Плато, где сила земного притяжения исключается тем, что жидкость плавает внутри другой жидкости одинакового удельного веса (например масло в смеси спирта с водой).

Разницу между жидкостью и твердым телом можно еще охарактеризовать тем, что в твердом теле в высшей степени затруднены взаимные передвижения его частиц, тогда как в жидкости эти передвижения совершаются вполне свободно, коль скоро приложена сила, способная преодолеть силу внутреннего трения. Если исключить явление диффузии, весьма слабо выраженное в твердом теле, то смещения частиц внутри него всегда связаны с более или менее резкими изменениями внешней формы (сгибание, растягивание, кручение и пр.). Жидкость же, как мы знаем, может, оставаясь на поверхности совершенно спокойной, испытывать в то же самое время весьма интенсивные внутренние перемещения. Это последнее различие выражают словами, говоря, что жидкость обладает свойством «текучести», которое отсутствует у твердого тела.

Еще большие отличия мы имеем в случае газа. Здесь не только нельзя говорить о постоянстве формы, но само это понятие в значительной степени теряет свой смысл. В газообразном состоянии вещество не обнаруживает каких-либо наглядным образом проявляемых связей между своими частицами. При отсутствии сдерживающих причин газ стремится распространяться во все стороны и занять возможно большее пространство. Действуя на жидкость, внешние силы производят преимущественно геометрические изменения формы, лишь в весьма слабой степени влияя на занимаемый веществом объем и следовательно на его

плотность. В случае же газа объем и плотность целиком и полностью определяются внешними причинами.

Таковы основные различия между твердыми, жидкими и газообразными телами, различия, продиктованные повседневной практикой жизни и оправданные обыденным опытом. Однако, когда была сделана попытка перенести эту классификацию из области примитивного опыта в область точной науки, то вскоре же наметился целый ряд трудностей, целый ряд недоуменных вопросов, требующих разрешения. Как это очень часто бывает во всех областях знания, живое многообразие фактов с большим трудом укладывалось в узкие рамки застывших понятий. Чисто внешней, поверхностной характеристики, основанной на грубом опыте, оказалось недостаточно, коль скоро развитие науки дало более богатый материал относительно свойств тел.

Главные трудности наметились в области различия твердого и жидкого состояния вещества. Видеть это различие в большем или меньшем наличии свойства «текучести», в большей или меньшей сопротивляемости изменению формы под влиянием внешних причин стало весьма трудным после известных опытов над текучестью металлов при больших давлениях и особенно—после изучения весьма любопытных свойств определенной группы тел, которые, как мы теперь говорим, находятся в стеклообразном состоянии и представителями которых являются обыкновенное стекло, канифоль, различные смолы и многие другие тела.

Характерным для этих веществ было то, что при изменении температуры, постепенно меняя свои свойства, они повидимому совершенно непрерывно переходили из жидкости в твердое тело, причем не было никакой возможности сказать, в какой же точке кончается первая и начинается вторая. Мало того, уже перейдя по внешности в твердое состояние, многие из этих тел продолжали обнаруживать свойства, странным образом напоминающие свойства жидкости.

Классический пример подобного тела представляет вар. Растопленный, он при застывании постепенно густеет, делается все более и более вязким, обнаруживая все переходные оттенки от жидкости к твердому телу. Застыв, он при ударе колетса на куски, показывая следовательно хрупкость. В то же самое время, оставленный на более или менее длительный срок, кусок вара «течет», принимая форму сосуда, куда он положен, или растекаясь в «лужу» по земле. Тяжелое тело, например кусочек свинца, положенное на «твердый» вар, тонет в нем, как бы в жидкости. Аналогичным образом пробка всплывает в массе вара.

Это в высшей степени странное диалектическое единство совершенно противоположных свойств твердого и жидкого вещества, единство хрупкости и вязкости, твердости и текучести, которое обнаруживает помимо вара еще весьма обширная категория тел, в корне нарушила, казавшуюся столь естественной и понятной, классификацию состояний вещества и заставило серьезно задуматься над создавшимся положением. Вполне естественно было бы спросить: к какой же группе, жидкостей или твердых тел, следует отнести вещества, обладающие столь странными свойствами, и когда в процессе застывания смолы жидкость сменяется твердым телом. Очевидно, что можно было бы долго и безрезультатно биться над разрешением этих вопросов, все дальше и дальше углубляясь в дебри метафизики, без малейшего шанса получить правильный ответ. Однако живая связь с природой большей частью вы-

водит науку на правильный путь. Возникшее противоречие было преодолено на основе углубления наших знаний о внутреннем строении вещества, на основе отказа от поверхностных суждений и перехода к детальному изучению того, что скрыто за видимой оболочкой предметов.

Деление тел на три группы: твердых, жидких и газообразных, основанное на внешних признаках формы, хотя и отвечало в достаточной мере запросам обыденной жизни, но не могло удовлетворить науку. Изучение явлений, сопровождающих переход из одного состояния в другое, из твердого в жидкое, или из жидкого в газообразное, заставило связать классификацию тел с внутренними процессами, происходящими в них, и выдвинуло на первое место энергетическое обоснование этой классификации. Попутно развивалось учение о молекулярном строении тел, которое подвело реальный фундамент под формальные рассуждения термодинамики.

Новая теория классификации тел, построенная на основе данных термодинамики и молекулярной теории, сохранила обычное деление на твердое, жидкое и газообразное состояние вещества, которые продолжали быть основными, так называемыми агрегатными состояниями. Однако теория агрегатных состояний классической физики была весьма далека от обиденных наглядных представлений и, ища аргументацию для того или иного деления тел в общности законов, управляющих протекающими внутри них процессами, приводила нередко к выводам, прямо противоречащим привычной терминологии.

Согласно представлениям молекулярной теории основное различие между твердым, жидким и газообразным состоянием кроется как в различной величине внутренней энергии вещества, так и в той форме, в которой эта энергия находится. Напомним, что под внутренней энергией понимают обычно энергию, запасенную внутри вещества как в форме кинетической энергии движения частиц, так и в форме потенциальной энергии, зависящей от их взаимного положения (энергия кристаллической решетки, поверхностная энергия жидкости и пр.).

Проследим подробнее переход вещества из твердого состояния в жидкое и параллельное изменение (как количественное, так и качественное) его внутренней энергии. Согласно современным взглядам (справедливость которых мы покажем ниже) все без исключения тела, действительно находящиеся в твердом состоянии, обладают кристаллической структурой. Правда, иногда внешний вид совершенно не дает знать о кристаллическом строении. Так например, такие тела, как дерево, многие волокнистые органические вещества (лен, шелк и пр.) и даже большинство металлов выглядят вполне аморфными. Однако новейшими исследованиями с полной определенностью было доказано, что под этой псевдоаморфной формой кроется кристаллическая сущность. Там, где невооруженный глаз не видит никакой симметричной структуры, микроскоп, или в более сложных случаях рентгеновская установка, позволяют открыть наличие мельчайших кристалликов. Таким образом возникло представление о микрокристаллическом строении некоторых тел.

В кристалле частицы расположены в известном порядке, образуя правильную пространственную решетку и удерживаясь на своих местах силами сцепления. Благодаря взаимным связям им доступны лишь колебательные движения около некоторой точки равновесия. Тепловое движение осуществляется здесь таким образом в форме колебаний. При повышении температуры кристалла амплитуда колеба-

ний частиц, составляющих его решетку, увеличивается, вместе с тем увеличивается их кинетическая и потенциальная энергия. Это увеличение, как показывает рис. 1, где по оси абсцисс отложена температура (по абсолютной шкале), а по оси ординат — внутренняя энергия вещества, идет по линии AB , очень близкой к прямой.

Плавное увеличение внутренней энергии будет иметь место до некоторой температурной точки T_* . При температуре T_* , которую называют температурой плавления, колебательное тепловое движение частиц кристалла становится настолько сильным, что кристаллическая решетка разрушается, частицы покидают свои места и твердое тело — кристалл — переходит в жидкое состояние — плавится. Разрушение решетки кристалла требует затраты определенного количества энергии на преодоление молекулярных сил, удерживающих частицы на своих местах. Эта энергия черпается за счет теплоты, подводимой извне при нагревании. В результате, несмотря на непрерывный приток тепла и на увеличение внутренней энергии тела, температура его за

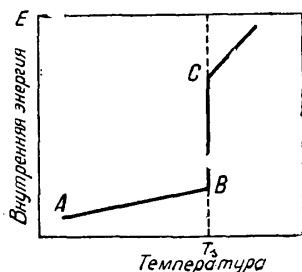


Рис. 1. Энергетическая кривая взаимных переходов твердого и жидкого состояния вещества.

все время плавления остается постоянной. Это значит, что в процессе плавления кинетическая энергия частиц не увеличивается, так как все получаемое кристаллом тепло тратится на разрушение кристаллической решетки, на увеличение их потенциальной энергии.

Все сказанное находит свое отражение в кривой рис. 1. Начиная с точки B (точки плавления), мы имеем резкий скачок вверх, который показывает, что увеличение внутренней энергии на данном интервале не сопровождается повышением температуры тела. Отрезок BC является мерой той энергии, которая необходима для того, чтобы полностью

расплавить кристалл, и которая поглощается в процессе плавления. Это и есть так называемая скрытая теплота плавления или просто теплота плавления (теплота кристаллизации). Начиная с точки C , твердое тело целиком превратилось в жидкость. Дальнейшее увеличение внутренней энергии вещества (находящегося теперь в жидком состоянии) опять сопровождается повышением температуры, причем подводимое тепло частью тратится на увеличение кинетической энергии молекул, частью же на работу, связанную с испарением.

В жидкости силы сцепления между частицами настолько малы, что уже не могут препятствовать их взаимному перемещению. Беспорядочное тепловое движение превалирует над действиями молекулярных сил, и в результате, в противоположность кристаллу, частицы распределяются в пространстве совершенно хаотически, беспорядочно. Таким образом жидкость является изотропным состоянием вещества. Рис. 1 показывает, что в жидком состоянии вещество обладает большей внутренней энергией, чем в кристаллическом. В жидком состоянии частицы находятся на больших расстояниях, чем в кристалле. Их взаимная потенциальная энергия больше, чем потенциальная энергия кристаллической решетки на величину теплоты кристаллизации.

Вполне аналогичные явления происходят и при охлаждении вещества, при переходе из жидкого состояния в твердое, с той лишь раз-

ницей, что в точке перехода (которой попрежнему будет точка T_s) наблюдается уже не поглощение энергии, а ее выделение за счет освобождения потенциальной энергии вещества.

Итак, мы приходим к выводу, что внутренняя энергия жидкого состояния больше, чем внутренняя энергия твердого кристаллического тела. Устойчивость или неустойчивость какого-либо состояния при данных температуре и давлении определяется соотношением между кинетической энергией теплового движения молекул и их потенциальной энергией в данном состоянии. Как известно, устойчивое равновесие возможно лишь в том случае, когда потенциальная энергия достигает для данной системы своего минимального значения. Внутри вещества мы всегда имеем тенденцию к такой перегруппировке его частиц, которая сопровождается уменьшением потенциальной энергии. Тепловое движение противодействует этой тенденции, и его интенсивностью в конечном счете решается вопрос о том, на каком уровне потенциальной энергии будет достигнуто равновесие.

КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СТЕКЛООБРАЗНОГО СОСТОЯНИЯ

Теория агрегатных состояний вещества, которую мы только что вкратце рассмотрели на примере взаимных превращений жидкости и твердого тела, оказалась весьма плодотворной для объяснения явлений, связанных со свойствами твердых, жидких и газообразных тел и с их взаимными превращениями. Довольно успешно, по крайней мере при поверхностном рассмотрении, теория обходит те затруднения, которые мы подчеркнули в самом начале и которые обязаны своим происхождением существованию тел, занимающих по своим свойствам как бы промежуточное положение между твердым веществом и жидкостью. Для анализа того, что здесь происходит, нам необходимо более детально проникнуть во внутреннюю сущность процесса перехода из жидкого состояния в твердое, т. е. процесса кристаллизации.

С уменьшением температуры жидкости, т. е. с уменьшением теплового движения ее частиц, все большую и большую роль начинают играть силы сцепления между ними. Подчиняясь взаимному притяжению, частицы жидкости начинают собираться в правильно расположенные в пространстве группы, так называемые центры кристаллизации. Сначала эти группы еще недостаточно устойчивы. Под влиянием беспорядочного теплового движения они разрушаются и создаются вновь, но при дальнейшем охлаждении и дальнейшем уменьшении кинетической энергии частиц, а следовательно и разрушительного действия их ударов, количество центров кристаллизации увеличивается, и вокруг каждого центра постепенно группируется все больше и больше молекул, образующих правильную кристаллическую решетку. Процесс кристаллизации, который идет с выделением тепла за счет уменьшения потенциальной энергий, совершается до тех пор, пока вся жидкость не превратится в кристаллическое твердое тело.

При изучении вопроса о скорости перехода из жидкого состояния в кристаллическое следует различать два понятия: 1) способность вещества к самопроизвольной кристаллизации («сила самопроизвольной кристаллизации» — по Tammann), которая выражается в большей или меньшей интенсивности образования центров кристаллизации, и 2) скорость кристаллизации, характеризующая интенсивность образования кристаллов (роста кри-

таллов) около уже существующего центра. Обе эти величины весьма сильно зависят от температуры. Таким образом и скорость перехода вещества из жидкого состояния в твердое также зависит от того, до какой температуры жидкость охлаждена.

Поскольку процессы образования центров кристаллизации и дальнейший рост кристаллов не совершаются мгновенно, но требуют для своего окончания некоторого конечного (в отдельных случаях довольно большого) промежутка времени, температура, в общем случае, за все время кристаллизации не остается постоянной, как мы это предполагали выше, но убывает, причем величина этого убывания зависит от того, какая часть отнимаемого от тела тепла успевает компенсироваться энергией, выделяемой в процессе кристаллизации. Постоянство температуры будет сохранено лишь в том частном случае (и именно этот случай мы имели в виду, когда рассматривали кривую на рис. 1), когда кристаллизация идет настолько быстро, что отнимаемое от жидкости в процессе охлаждения тепло успевает компенсироваться за

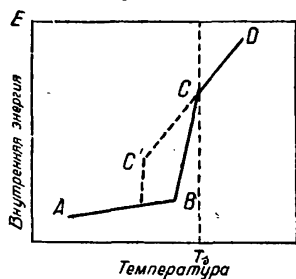


Рис. 2. Энергетическая кривая процесса переохлаждения.

Отрезок AB характеризует твердое тело (кристалл), отрезок CD — жидкость, вдоль же отрезка BC мы имеем одновременное существование и жидкости и кристалла. Из кривой видно, что после начала кристаллизации (точка C) жидкость продолжает охлаждаться и достигает температуры меньшей, чем температура плавления T_m . Таким образом создается представление о переохлажденной жидкости как некоторой весьма неустойчивой форме существования вещества, сопровождающей процесс перехода от жидкости к кристаллу.

Из всего сказанного легко видеть, что явление переохлаждения весьма тесно связано с процессами образования центров кристаллизации и роста кристаллов. Большая или меньшая скорость этих процессов дает ту или иную вероятность для образования переохлажденной жидкости; не меньшее значение имеет и зависимость этих скоростей от температуры. Предположим например, что способность вещества к самопроизвольной кристаллизации мала при температуре плавления и увеличивается лишь при значительном переохлаждении жидкости. Это значит, что при температуре T_m мы имеем все основания ожидать образования весьма малого количества центров кристаллизации, т. е. практически полного ее отсутствия. В этом случае жидкость можно охладить значительно ниже температуры плавления, без начала заметного перехода в твердое состояние. Наконец, когда будет достигнуто достаточное переохлаждение и центры кристаллизации начнут образовываться с надлежащей скоростью, жидкость в более или менее корот-

кип промежуток времени закристаллизуется. Процесс, протекающий описанным образом, представлен на рис. 2 пунктирной линией. Здесь вдоль отрезка CC' мы имеем в чистом виде переохлажденную жидкость, без одновременного присутствия кристаллов.

Как показывают опыты, способность к кристаллизации и ее скорость весьма сильно меняются при переходе от одного вещества к другому. Если такие вещества, как например металлы, кристаллизуются с большой легкостью и поэтому в весьма малой степени обнаруживают явление переохлаждения, то многие органические соединения, а также соединения, в состав которых входит кремнезем, ведут себя совершенно противоположным образом и без особого труда могут быть без перехода в кристаллическое состояние охлаждены ниже температуры плавления.

В веществах, легко переходящих в переохлажденное состояние,

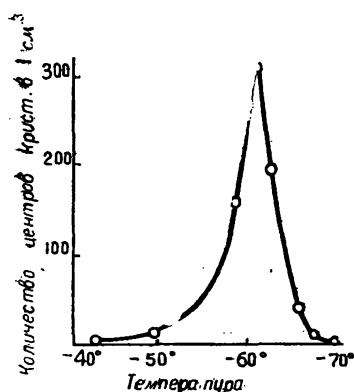


Рис. 3. Зависимость числа центров кристаллизации от температуры для глицерина. Таммпп и Јенскеп, 1930.

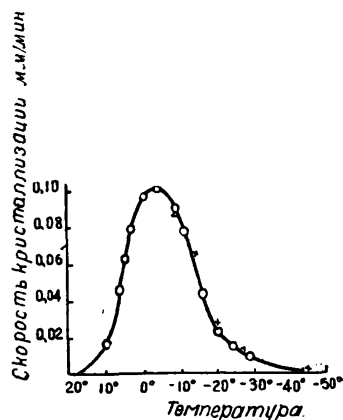


Рис. 4. Зависимость скорости кристаллизации глицерина от температуры. Таммпп и Јенскеп, 1930.

кристаллизация достигает заметной величины лишь при значительном охлаждении. При небольших переохлаждениях как способность к самопроизвольной кристаллизации, так и скорость кристаллизации имеют небольшие значения. По мере увеличения степеней переохлаждения обе величины сначала возрастают, достигают некоторого максимума, а затем, при дальнейшем увеличении переохлаждения, постепенно убывают, асимптотически приближаясь к нулю. Рис. 3 и 4 дают пример влияния температуры на кристаллизацию глицерина (по Таммпп и Јенскеп) ¹. Рис. 3 показывает, как меняется с температурой способность образовывать центры кристаллизации. По оси абсцисс отложена температура в градусах Цельсия, а по оси ординат — количество центров в 1 см^3 жидкости. Температура плавления для глицерина равна 19° . Из рисунка следует, что при температуре T_s способность образовывать центры практически равна нулю. Она заметно увеличивается лишь при понижении температуры на 64° ниже температуры плавления, т. е. при температуре -45° . При -60° способность к самопроизвольной

кристаллизации достигает своего максимума и при дальнейшем охлаждении начинает быстро уменьшаться.

Кривая рис. 4, дающего зависимость от температуры скорости кристаллизации, ведет себя аналогичным образом, с той лишь разницей, что максимум имеет место при незначительной величине переохлаждения и имеет более пологий вид. На рис. 4 по оси абсцисс попрежнему отложена температура, по оси ординат — скорость кристаллизации в миллиметрах в минуту. Из сравнения обеих кривых видно, что в то время, когда скорость кристаллизации имеет довольно большое значение (т. е. вблизи точки плавления), количество центров кристаллизации ничтожно. При более же низких температурах, когда количество возникающих центров увеличивается, скорость роста кристаллов снижается почти до нуля. Такое несовпадение максимумов приводит к тому, что процесс кристаллизации вообще сильно затрудняется, так как при наличии центров с большой трудностью образуются кристаллы, при тех же температурах, когда рост кристаллов может идти с достаточной интенсивностью, отсутствуют центры.

Легко видеть, что достаточно быстрым охлаждением жидкости ее можно без труда довести до такой температуры, при которой никакая кристаллизация практически уже невозможна.

В результате получается сильно переохлажденная жидкость, которая в данном участке температур обнаруживает все признаки устойчивости и не склонна к переходу в кристаллическое состояние.

Мы приходим таким образом к выводу, который, как кажется с первого взгляда, противоречит предыдущим рассуждениям; несмотря на то, что переохлаждение все дальше и дальше уводит жидкость в область неустойчивого состояния, тенденция к переходу в состояние, в этих пределах температур более устойчивое, уменьшается. На самом деле это противоречие только кажущееся. Суть дела заключается в том, что при значительных переохлаждениях жидкости резко дают себя знать новые силы, противодействующие стремлению довести потенциальную энергию до минимума. Эти силы, заметно увеличивающие свое влияние при понижении температуры, являются силами внутреннего трения. Они затрудняют передвижение частиц внутри жидкости и связанную с этим движением перегруппировку частиц в кристаллическую решетку.

В различных веществах силы внутреннего трения выражены различно. В металлах кристаллизация обычно бывает уже закончена раньше, чем они успеют достигнуть необходимой величины для того, чтобы противодействовать образованию кристаллов. В других телах, например в глицерине, их действие заметно уже при температуре плавления, и кристаллизация тормозится с самого начала.

По мере уменьшения температуры вязкость переохлажденной жидкости увеличивается все больше и больше. Это увеличение вязкости служит достаточной иллюстрацией для тех препятствий, которые стоят на пути перегруппировки молекул в кристалл. При той степени переохлаждения, которая соответствует полному прекращению кристаллизации, вязкость настолько велика, что жидкость по своим механическим свойствам, по своей сопротивляемости внешним воздействиям, вполне напоминает твердое тело, оставаясь в то же время жидкостью по внутренней молекулярной структуре.

Эта жидкость, лишенная, казалось бы, основного свойства жидкого состояния, а имен-