

ГЕОФИЗИКА

П. Н. КАПТЕРЕВ

**НЕРАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОСТА ОБЪЕМА ВОДЫ
ПРИ ЗАМЕРЗАНИИ**

(Представлено академиком В. А. Обручевым 10 IV 1947)

Известно, что вода при замерзании расширяется приблизительно на 9% своего первоначального объема в жидкой фазе. Многочисленные опыты, произведенные мною в 1934—1936 гг. на Сквородинской научно-исследовательской мерзлотной станции (Читинская область) и в 1946 г. в Москве, показали, что в конкретных ледяных телах этот приrost распределяется обыкновенно неравномерно: в одних направлениях получается увеличение размеров, в других — наоборот, даже уменьшение, благодаря тому, что небольшие объемы воды при своем замерзании стремятся округлиться, принять сфероидальную форму.

Замораживание воды на Сквородинской станции производилось в холодное время года путем естественного охлаждения, причем температура в некоторых случаях доходила до -38° . Сперва образовывался ледяной футляр по стенкам сосуда, вода же, оставшаяся внутри этого футляра, по мере промерзания испытывала все усиливающееся давление. В результате этого ледяной футляр часто трескался или даже взрывался, и остатки воды изливались наружу. Стекло-банки почти всегда лопались.

Изменения фигуры ледяного тела происходили двумя путями: 1) избыток воды выделялся в определенных местах на поверхность ледяного футляра и, замерзая, образовывал на ней как бы наросты, или „микроналеди“; 2) вся вода оставалась на месте, но ледяной футляр вслучивался в определенных направлениях.

Обыкновенно при температурах до -20°C на верхней, открытой поверхности льда образовывались „микроналеди“ в виде бугров. Подобные же образования, хотя и меньших размеров, часто наблюдались и у дна сосуда, что вызывало его выпячивание вниз. В ступления воды через боковые стенки ледяного футляра наблюдать не приходилось.

Развитие значительного давления внутри ледяного футляра можно было наглядно проследить, опустив внутрь футляра (но не до дна) стеклянную трубку. По ней вода поднималась свободно на 50—60 см. Если же вода в трубке замерзала и образовывалась ледяная пробка, то трубку обычно выталкивало или ломало ее конец, вмержший в лед. Точно так же выталкивало погруженные концами в воду стеклянные или парафиновые палочки и стеклянные пластинки. Если на начавшую замерзать поверхность воды в чашке поставить бумажный колпачок в виде конуса, то под ним замерзание происходит замедленно, получает зона наименьшего сопротивления и под колпачек выдавливается излишек воды, так что в конце опыта под колпачком оказывается заполняющий его ледяной конус. Такие полные конусы легко удава-

лось получать высотой в 9—10 см при замораживании всего одного литра воды в алюминиевой чашке. При больших размерах колпачков при тех же размерах сосуда конусы получались усеченные.

Все эти опыты повторялись много раз и всегда давали те же результаты. Они показывают, что в некоторых случаях бугры пучения, наледные бугры, прорывы воды под домами и т. п. могут возникать в районах вечной мерзлоты — правда, в размерах, ограниченных количеством замкнутой воды — без всякого подтока воды извне и без внешнего гидростатического напора. В других случаях, при применении более низких температур (порядка —25—30° С) выдавливания воды на поверхность льда не происходило или оно прекраща-

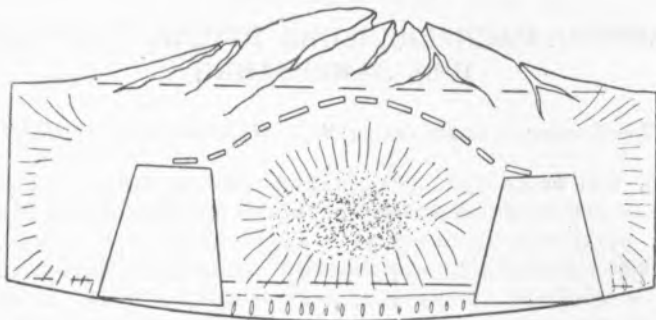


Рис. 1. Изгиб и излом стеклянной пластинки 9×12 см при замораживании воды в прямоугольной ванночке. Первоначальный уровень воды отмечен черточками

лось в самом начале, и тогда наблюдался другой тип деформации. Стороны ледяного тела с большей площадью (например, верхняя и нижняя) выпучивались, стороны же с меньшей площадью (боковые оставались неизменными или иногда даже отставали от стенок сосуда. Если сосуд имел форму куба, то ледяное тело стремилось принять форму шара.

Для того чтобы убедиться, что постоянно наблюдаемое выталкивание палочек и стеклянных пластинок из замерзающего объема воды вызывается именно усилением гидростатического давления внутри ледяного футляра, а не какими-либо иными силами вроде давления при росте кристаллов, был сделан опыт с целью устранить гидростатическое давление. В жестяной цилиндрической банке вместимостью в 600 см^3 было сделано дно из тонкой резины. Банка для отепления дна была поставлена в ящик с древесными опилками так, что открытой оставалась только верхняя поверхность воды. В воду была опущена подвешенная (до середины глубины банки) стеклянная палочка. При замерзании воды поверхность льда осталась совершенно ровной, банка не имела никаких деформаций, резиновое же дно, погруженное в опилки, оказалось очень сильно выпученным — весь избыток воды собрался там. Стеклянная палочка вмерзла в лед и при этом несколько не изменила своего положения.

В цинковую ванночку, размером $22,5 \times 20 \times 9$ см, была налита вода до высоты 8 см; на дно ванночки были поставлены две резиновых подставки, на которые была положена горизонтально стеклянная пластинка 9×12 см, оказавшаяся почти на половине глубины воды. При замерзании (температура доходила до —38°) на открытой поверхности воды образовался большой бугор с широкими трещинами у вершины, а дно ванночки оказалось выпученным вниз, особенно в центре, стеклянная же пластинка была сильно изогнута и раздроблена на 31 кусочек, которые расположены на полусфере выпуклостью вверх (см. разрез, рис. 1). Увеличение поперечника ледяного тела по вер-

тикали достигло 60% первоначальной толщины водного слоя. Никакого выступания воды на поверхность льда не было.

Большое значение имеет форма сосуда. Во всех многочисленных опытах замораживания воды в сосудах, горизонтальные размеры которых значительно превосходили вертикальные, растяжение и вспучивание происходили всегда в вертикальном направлении, в горизонтальном же направлении размеры оставались без изменений или происходило даже втягивание, сжатие. В сосудах, у которых, наоборот, вертикальные размеры были больше горизонтальных, расширение при замерзании происходило в горизонтальном направлении. Так например, прямоугольный цинковый бак, высотой 35 см с поперечником 21,5 см, при замораживании в нем воды принял бочкообразную форму: были выпучены боковые стенки, которые у более плоских ванночек или чашек никаким деформациям не подвергались.

В 1946 г. в Москве в Мерзлотной лаборатории Института мерзловедения им. В. А. Обручева Академии Наук СССР в целях выяснения роли сопротивления стенок мнучю была произведена серия опытов с замораживанием воды в сосудах из резины, при минимальной температуре — 13—15°С. Они дали в общем те же результаты, что и описанные выше сковородинские опыты, но в некоторых отношениях были еще более показательны. При замерзании увеличение линейных размеров происходило только по коротким направлениям, длинные же оставались без изменений или даже сокращались. Например, вода замораживалась в отрезке резинового шланга с просветом 2,5 см, длиной 19 см и толщиной стенок 1,6 мм. Оба концевых отверстия были заткнуты пробками так, что даже при небольшом давлении изнутри их должно было вытолкнуть. При трех произведенных опытах этого не произошло, не произошло и удлинения шланга, но посередине длины его образовалось вздутие, составлявшее 16% первоначального поперечника шланга.

Прямоугольная резиновая подушка, размером 27,0 × 17,0 см, высотой (после наполнения водой) в высшей точке 7,5 см, после замораживания вздулась по высоте, т. е. по наименьшему поперечнику, на 1,9 см, или на 25% первоначальной высоты, в то время как длина уменьшилась на 4%, а ширина уменьшилась на 11%. В другом опыте, при большем количестве воды в подушке, высота ее после заморозания увеличилась на 11%, длина же уменьшилась на 2%, ширина — на 8%. Очевидно, сжатие могло бы достигать более значительных размеров, если бы этому не препятствовало сопротивление уже образовавшегося ледяного футляра.

Из произведенных опытов можно сделать следующие основные выводы:

1. Увеличение объема воды при ее замерзании может вызвать значительные перемещения воды, а также может выразиться в неравномерном, векторном изменении размеров образующегося ледяного тела, благодаря чему в некоторых определенных направлениях может произойти линейное увеличение, достигающее нескольких десятков процентов. Этим, очевидно, объясняются некоторые случаи сильного пучения на шоссе и железных дорогах, измеряемые десятками процентов от мощности водоносного слоя. Это явление обычно объяснялось или повторным намораживанием поступающих со стороны новых порций воды или давлением растущих кристаллов льда. Однако пучение может достигать очень значительных размеров даже в тех случаях, когда под полотном имеются только замкнутые промерзающие полости с водой или линзы переувлажненного грунта. Кроме того, даже случайное небольшое отепление узко местного характера может вызвать значительное перемещение воды при ее замерзании.

2. Небольшие объемы воды при замерзании стремятся прибли-

зиться к форме сфероида. Остаток воды, замерзающий последним внутри ледяного футляра, хотя бы и в угловатом сосуде, никогда не сохраняет углов, а всегда приобретает форму сфероидальную, эллипсоидальную или яйцевидную, в зависимости от формы сосуда.

3. В основном описанные явления обязаны своим происхождением распределению давления в жидкости по закону Паскаля, но, кроме того, должны действовать и некоторые другие факторы, связанные с самим процессом кристаллизации.

Нормально вода, замерзающая в водоеме или в сосуде, кристаллизуется в виде шестигранных призм. В описанных выше условиях рост кристаллов происходит изнутри, на стенках полости, поверхность которой не остается неизменной, но прогрессивно уменьшается. Благодаря этому растущие внутрь концы кристаллов льда теснят друг друга и должны или прервать свой рост, уступив место новым кристаллам меньших размеров, или же принять форму усеченных шестигранных пирамид, обращенных меньшими основаниями внутрь полости. Это является стеснением обычного хода кристаллизации льда и должно вызвать силы, стремящиеся раздвинуть сжимающиеся с боков соседние кристаллы. В результате получается прогрессирующее боковое давление в ледяных стенках полости, стремящееся расширить или разорвать их. Повидимому, на основе этого происходят перерывы кристаллических образований, выражающиеся в появлении разграниченных зон, обычно окружающих центральную полость в виде более или менее концентрических поверхностей. Таким образом, давление, возникающее в результате роста кристаллов, комбинируется с давлением, производимым изнутри на стенки полости сжимаемой в ней водой. Вполне возможно, что в описанных явлениях принимают участие и другие закономерности, здесь пока не учтенные.

Поступило
20 I 1947