

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Б. Ф. Войтовский

МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
ЛЬДА

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СЕВЕРОВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТА МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ имени В. А. ОБРУЧЕВА

К. Ф. Войтковский

МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
ЛЬДА

-/-

1587-8-61

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1960

ЗПК
В655

1

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
П. И. МЕЛЬНИКОВ



1587-8-61

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лед является одним из наиболее распространенных твердых тел на земной поверхности, с которым человек встречается повседневно. Известно, что порой лед приносит большой ущерб народному хозяйству: препятствует судоходству, оказывает вредное действие на портовые сооружения, опоры мостов, гидротехнические сооружения и т. п. Вместе с тем лед широко используется в качестве строительного материала (ледяные склады, плотины из льда и др.), для устройства ледяных переправ и дорог, в борьбе с засушливостью климата и т. д.

Все это вызывает необходимость хорошо знать физико-механические свойства льда. Изучением этих свойств занимались многие исследователи. В специальной литературе собран богатый материал, однако практически пользоваться им крайне затруднительно вследствие весьма значительных расхождений количественных параметров механических свойств льда. Известно, например, что предел прочности сжатия при испытании образцов льда колеблется от 10 до 100 кг/см² и более, т. е. он может изменяться более чем в 10 раз. Еще большие расхождения имеются в данных, характеризующих пластические свойства льда. В связи с этим назрела необходимость проанализировать все эти материалы, обобщить их, попытаться выяснить причины больших расхождений различных

параметров, установить закономерности их изменения и выявить наиболее достоверные характеристики механических свойств льда, которые можно рекомендовать для инженерной практики. Решению этих задач и посвящена настоящая работа.

Работа написана на основании обобщения литературных сведений о свойствах льда и экспериментальных работ автора по изучению пластических свойств льда, проведенных в Институте мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР за период с 1954 по 1958 г.

Автор приносит глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР Н. А. Цытовичу, проф. С. С. Вялову и проф. Б. А. Савельеву за ряд ценных указаний, учтенных в данной работе.

Глава I

СТРОЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЬДА

Лед имеет кристаллическое строение. Кристаллы льда оптически одноосные, принадлежат к гексагональной сингонии. Внешняя форма кристаллов разнообразна и зависит от условий их образования и роста. Однако можно выделить три основных вида кристаллов льда: пластинчатый, столбчатый и иглообразный. Размеры кристаллов весьма разнообразны (от долей миллиметра до 1 м и более), они непрерывно изменяются в результате процессов рекристаллизации, заключающихся в росте одних кристаллов за счет других.

Кристаллы льда характеризуются резко выраженной анизотропностью механических свойств в зависимости от направления действия усилия относительно базисной плоскости (плоскость, перпендикулярная к оптической оси кристалла). Атомы в пространственной решетке кристалла льда располагаются таким образом, что нарушение в базисной плоскости вызывает разрыв только двух атомных связей на одну элементарную ячейку, в то время как нарушение по любой плоскости, перпендикулярной к базисной, требует разрыва по меньшей мере четырех связей на одну ячейку (Owston, Lonsdale, 1948). Поэтому структуру кристалла льда можно представить как совокупность многочисленных, очень тонких, прочных, но гибких пластинок (Mc Connell, 1891). Промежутки между элементарными пластинками — плоскостями наиболее густого расположения атомов — являются плоскостями ослабления, по которым может происходить относительное скольжение пластинок.

Ввиду анизотропии свойств льда необходимо учитывать строение льда и направление оптических осей его кристаллов.

В природе встречаются различные виды льда, отличающиеся друг от друга по своей структуре, по характеру распространения и по другим свойствам. Крупные монокристаллы льда в практике встречаются редко. Большей частью приходится иметь дело с поликристаллическим льдом, который состоит или из беспорядочно ориентированных кристаллов, спаянных между собой (зернистый лед), или сросшихся отдельных кристаллов, направление осей которых приблизительно параллельное.

Структура льда зависит от способа его образования. Различают следующие основные виды структуры льда (Цытович, Сумгин, 1937):

а) сплошная кристаллическая структура, образуется при спокойном замерзании воды;

б) игольчатая структура, часто с наличием пузырьков воздуха, образуется в месте соприкосновения воды и льда;

в) слоистая структура, образуется при периодических замерзаниях отдельных слоев воды или при уплотнении отдельных мокрых слоев снега;

г) фирновая или зернистая, образуется при смерзании снега;

д) мелкоагрегатная неправильная структура, образуется при переменном замерзании с перемешиванием (наблюдается в верхнем слое льда больших водоемов);

е) рыхло-чешуйчатая структура, наблюдается в свежеснеговом покрове, а также при замерзании воды, конденсирующейся из пара.

В настоящее время имеется более полная и совершенная генетическая классификация льдов, разработанная П. А. Шумским, в которой учтены все виды пресных льдов и дано подробное описание условий их образования и залегания, структуры, ориентировки кристаллов, характера включений воздуха. В связи с таким широким подходом классификация является несколько громоздкой. А так как в данной работе вопросы генезиса льдов не рассматриваются, то автор счел возможным ограничиться приведенной выше упрощенной классификацией, отсылая читателей, заинтересованных в более полной классификации, к работе П. А. Шумского (1955).

При спокойном замерзании воды в самых верхних слоях ледяного покрова преобладают кристаллы с оптическими осями, направленными параллельно поверхности замерзания, а ниже — кристаллы с вертикальными осями. По данным Б. А. Савельева (1953), в озерном ледяном покрове кристаллы с оптическими осями, параллельными поверхности замерзания, встречаются примерно до глубины 18 см, а ниже все кристаллы имеют оптические оси, перпендикулярные к плоскости замерзания. По мере удаления от верхней поверхности часть кристаллов выклинивается, а поперечный размер оставшихся кристаллов увеличивается.

При турбулентном замерзании воды оси кристаллов льда располагаются хаотически.

Плавление льда и возгонка (переход в парообразное состояние) зависят от температуры и давления. При определенных температурах и давлениях лед и вода или лед и пар могут находиться в равновесии друг с другом. Кривые равновесия этих фаз (рис. 1) являются границами устойчивого состояния льда. Точка пересечения указанных кривых, так называемая тройная точка, в которой система лед — вода — водяной пар находится в равновесии, соответствует температуре $+0,0099^\circ$ и давлению $0,006 \text{ атм.}$ Температура плавления чистого льда при нормальном атмосферном давлении равна 0° . Повышение всестороннего давления снижает температуру плавления. Определено, что увеличению давления на 1 кг/см^2 соответствует понижение точки плавления на $0,0075^\circ$. В случае ориентированного одностороннего давления также может иметь место некоторое изменение температуры плавления,

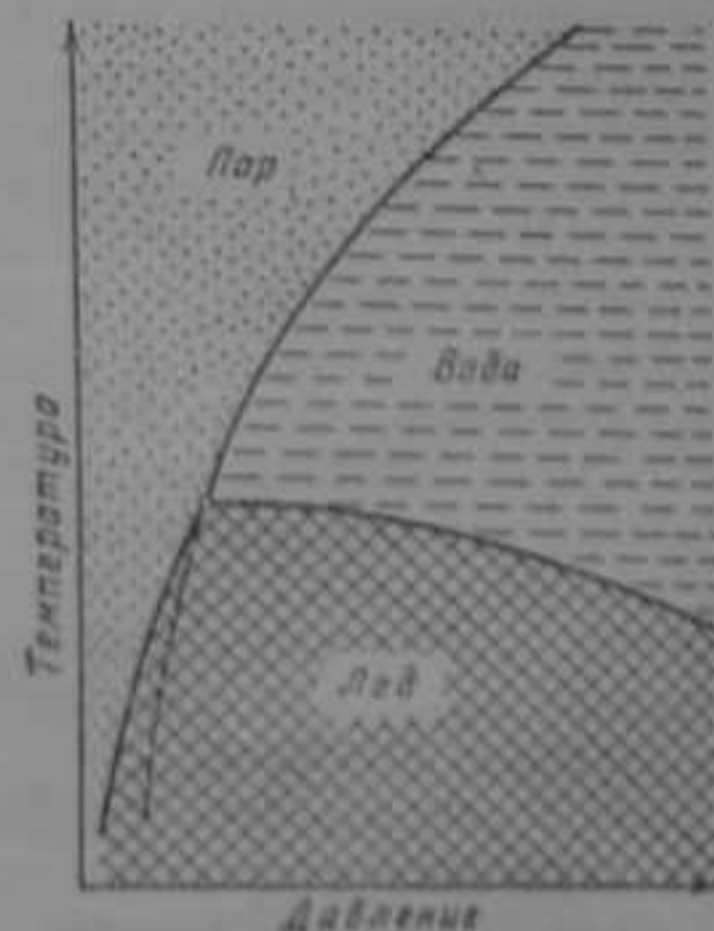


Рис. 1. Схематическая диаграмма фазового состояния воды (пунктиром показана кривая равновесия пара и переохлажденной воды)

однако весьма незначительное, менее $0,01^\circ$ (Шумский 1955).

Замерзание воды может происходить при тех же температурах (в зависимости от давления), что и плавление льда, только на границе раздела уже существующей кристаллической фазы. Поэтому при отсутствии центров кристаллизации вода может быть «переохлаждена» значительно ниже температуры, при которой создаются термодинамические условия для превращения ее в лед. Известны случаи, когда удавалось переохладить капли воды до -72° . В природных условиях в воде всегда содержатся инородные частицы, которые становятся центрами кристаллизации, поэтому возможное переохлаждение замерзающей воды обычно не превышает нескольких градусов.

Кроме обыкновенного льда, известны различные полиморфные модификации льда, однако они могут существовать лишь при больших давлениях (от 2 до 50 тыс. атм) и при нормальных условиях не встречаются, поэтому свойств указанных модификаций льда здесь рассматривать не будем.

Примеси во льду. Во льду обычно встречается некоторое количество примесей — включений воздуха или газов и солей; кроме того, при определенных условиях (приток тепла, повышение давления) лед содержит и воду. В природном льду могут встречаться также различные твердые включения, например нерастворимые обломки минералов.

Газообразные включения во льду получаются или непосредственно из атмосферы, или из замерзающей воды. По своему химическому составу эти включения обычно близки к составу атмосферного воздуха. Воздушные включения во льду бывают в виде мелких сферических полостей или удлиненных замкнутых ячеек. Встречаются также открытые поры и трещины. Плотный прозрачный лед или совсем не содержит макропор или количество их незначительно (пористость в пределах $1 \text{ см}^3/\text{кг}$). При большем количестве воздушных включений лед менее прозрачен, мутноват. Такой лед встречается обычно в средних и нижних слоях ледяного покрова. Пористость льда бывает здесь в пределах от 1 до $50 \text{ см}^3/\text{кг}$. Встречается также лед с весьма большим количеством воздушных пор (от 50 до $400 \text{ см}^3/\text{кг}$). Такой лед непрозрачный

и имеет снегообразный вид (Савельев, 1953). Возникает он обычно в результате смерзания увлажненного снега.

Присутствие в воде растворенных солей изменяет условия ее замерзания. Раствор при охлаждении и переходе в твердое состояние теряет свою однородность и распадается на составные части. Если он имеет малую концентрацию, то при охлаждении ниже точки замерзания чистой воды из него начинает выделяться чистый лед, а концентрация раствора увеличивается. Раствор с высокой концентрацией при охлаждении становится перенасыщенным и из него начинают выделяться кристаллы соли.

Таким образом, для каждой температуры раствора ниже точки замерзания чистой воды имеются две предельные равновесные концентрации солей, за границами которых из раствора выделяются кристаллы льда или соли (рис. 2). Температура, соответствующая точке пересечения этих границ, называется эвтектической температурой. При этой температуре и соответствующей концентрации раствора выделяются одновременно обе его составные части, и состав раствора в течение всего времени замерзания остается неизменным, т. е. раствор замерзает целиком. В результате образуется эвтектическая смесь кристаллов льда и соли. Если начальная концентрация раствора была меньше эвтектической, то после охлаждения ниже эвтектической температуры образуется смесь эвтектики со льдом — гипозэвтектика, а если начальная концентрация раствора больше эвтектической, то образуется смесь эвтектики с солью — гиперэвтектика. Таким образом, соли во льду выше эвтектической температуры содержатся в виде жидкого рассола, причем по мере охлаждения концентрация его возрастает, а количество уменьшается. При малом содержании солей почти весь рассол во льду сосредоточен в виде

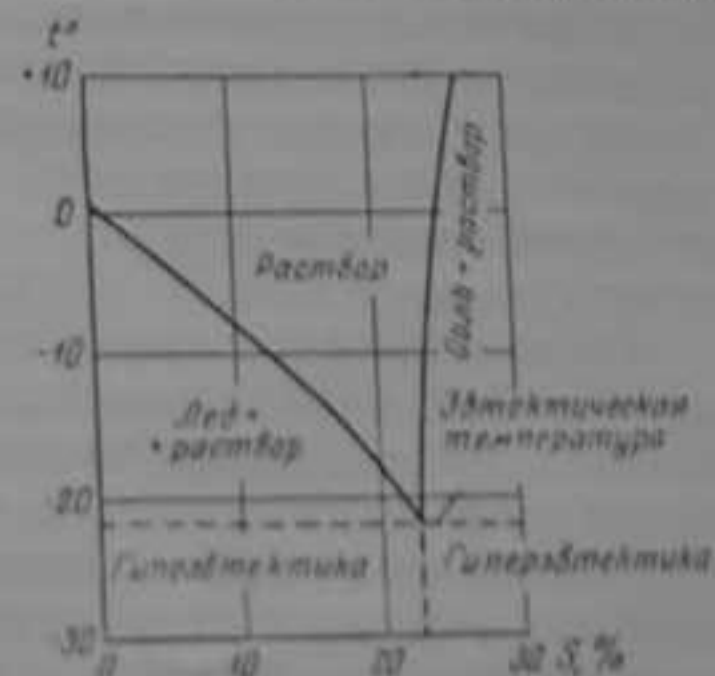


Рис. 2. Кривые затвердевания водного раствора хлористого натрия

пленок или изолированных включений на границах кристаллов. Увеличение содержания солей приводит к образованию прослоек рассола внутри кристаллов в базисных плоскостях, разделяющих кристаллы на ряд пластинок (Савельев, 1953; Шумский, 1955).

Наличие пленок, изолированных включений и особенно прослоек жидкого рассола оказывает значительное влияние на механические свойства льда, уменьшая его прочность. Но следует отметить, что в пресных льдах количество жидкого рассола обычно ничтожно мало и может оказывать практически некоторое влияние на механические свойства лишь при температуре, близкой к температуре таяния.

Режеляция и рекристаллизация. Лед обладает свойством режеляции или смерзаемости. Это свойство заключается в том, что при местном повышении давления во льду, например в местах контакта частиц или кусков льда под действием внешних усилий может происходить некоторое плавление частиц. Образующаяся при этом вода выдавливается в места, где давление ниже и там замерзает, в результате чего происходит смерзание частиц льда. Смерзание ледяных поверхностей, правда, более медленно, происходит и без всякого давления и без участия жидкой фазы за счет сублимации¹ льда и рекристаллизации. Вследствие этого мелкие, волосные трещинки во льду долго сохраняться не могут.

Во льду непрерывно происходит рекристаллизация, проявляющаяся в пространственном перемещении границы между кристаллами, изменении размеров, формы и общего количества кристаллов, изменении ориентации кристаллов. У одиночных кристаллов наблюдается процесс округления острых граней и углов. Кристаллы стремятся к равновесной (шарообразной) форме, характеризующейся минимальной свободной энергией. В поликристаллическом льду принцип минимума свободной энергии проявляется также в стремлении к слиянию кристаллов и уменьшению их количества. Более крупные кристаллы растут за счет уменьшения объема и даже полного исчезновения более мелких — происходит «собира-

ная» рекристаллизация (Шумский, 1955). Округление протекает быстро только при наличии кристаллов угловатой формы, а собирательная рекристаллизация — только при наличии очень мелких кристаллов. По мере округления кристаллов и исчезновения мелких кристалликов эти процессы затухают.

Более интенсивно процессы рекристаллизации проходят во льду, находящемся в напряженном состоянии под действием различных механических усилий. В этом случае вследствие анизотропии механических свойств кристаллов создается неравномерное напряженное состояние и начинается рекристаллизация путем роста менее напряженных кристаллов или их частей за счет более напряженных. При этом может изменяться ориентировка кристаллов. Кристаллы, у которых базисные плоскости близки к направлениям сдвига, в процессе деформации испытывают меньшее напряжение, чем иначе ориентированные, сильнее напряженные кристаллы, и растут за счет последних.

Рекристаллизация осуществляется путем перехода молекул из пространственной решетки одного кристалла в решетку другого, прилегающего к первому. Рекристаллизация может происходить также путем переотложения вещества через парообразную или жидкую фазы. Роль последних видов рекристаллизации проявляется значительно при температурах, близких к нулю.

Плотность и удельный объем. Плотность чистого льда при 0° и давлении 1 атм составляет 0,9168 г/см³, а удельный объем — 1,0908 см³/г. Плотность воды при этих условиях равна 0,999863 г/см³. Расширение объема воды при замерзании составляет 9% объема воды. При наличии во льду пор и примесей его плотность несколько отличается от указанной. Изменение плотности льда без пор под действием давления незначительно. По данным Б. П. Вейнберга (1940), коэффициент сжимаемости равен примерно $(1-5) \times 10^{-5}$ на 1 атм. Давление может оказывать существенное влияние лишь на плотность пористого льда, уменьшая его пористость и соответственно увеличивая плотность.

Термическое расширение. Коэффициент расширения льда зависит от температуры, увеличиваясь при ее повышении. В интервале температуры от -20 до 0°

¹ Под сублимацией подразумевается процесс перетекания льда с одного места в другое через парообразное состояние, т. е. возгонка, миграция пара и его кристаллизация.

коэффициент линейного расширения в среднем составляет $5,5 \times 10^{-5}$, а коэффициент объемного расширения соответственно равен $16,5 \times 10^{-5}$ на 1° . В интервале от -40 до -20° коэффициент линейного расширения, согласно опытов Эндрыуса (Вейнберг, 1940), составляет около $3,6 \times 10^{-5}$ на 1° .

Теплоемкость льда изменяется в зависимости от температуры, уменьшаясь по мере ее понижения. Эта зависимость может быть выражена следующей эмпирической формулой (Вейнберг 1940):

$$C_A = 0,5057 - 0,001863 \theta \text{ кал/г} \cdot \text{град},$$

где θ — абсолютное значение отрицательной температуры льда, $^\circ\text{C}$.

Скрытая теплота плавления чистого льда равна $79,6 \text{ кал/г}$. Скрытая теплота возгонки (испарения) льда при 0° составляет 677 кал/г .

Теплопроводность льда зависит от его температуры. Коэффициент теплопроводности плотного льда в зависимости от температуры может быть выражен эмпирической формулой (Вейнберг, 1940):

$$\lambda_A = 0,0053 (1 + 0,0015 \theta) \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град},$$

где θ — абсолютное значение температуры льда, $^\circ\text{C}$.

Наличие во льду воздушных включений уменьшает коэффициент его теплопроводности. Имеются данные о том, что теплопроводность кристаллов льда по направлению главной кристаллографической оси несколько больше, чем в направлении, перпендикулярном к оси (Шумский, 1955). Однако это различие незначительно.

Глава II

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДА

В случае приложения ко льду какой-либо силы лед начинает деформироваться, при этом в зависимости от различных факторов он ведет себя как упругое, пластическое или хрупкое тело, т. е. деформируется упруго, пластически или хрупко разрушается.

Одним из основных характерных свойств льда по сравнению с другими кристаллическими телами являются его отчетливо выраженные пластические свойства. Под действием нагрузки лед может изменять свою форму без разрушения и изменения объема, как бы течет. Известно, например, что ледники «текут» с определенной скоростью и это течение напоминает в некоторой степени течение рек. Поэтому пластические деформации льда иногда сравниваются с течением очень вязкой жидкости.

Область проявления чисто упругих свойств настолько мала, что практически ее не удается выделить. Обычно при любой величине напряжений наряду с упругими деформациями наблюдаются пластические деформации. Упругая деформация происходит в момент приложения нагрузки, а непосредственно за упругой начинается пластическая деформация. Общая деформация обычно состоит из двух частей: упругой, то есть обратимой деформации, и пластической — остаточной. Полноту следует отметить, что пластические деформации возникают лишь при наличии напряжений сдвига, поэтому при равномерном всестороннем сжатии монолитного льда будут иметь место только упругие деформации и уплотнение.

Хрупкое разрушение льда наблюдается при увеличении в нем напряжений до некоторого предела — предела прочности¹, а также в ряде случаев при действии динамических нагрузок.

Механические свойства льда, т. е. способность льда сопротивляться воздействию внешних сил, значительно изменяются в зависимости от температуры. Чем ближе температура льда к точке его плавления, тем сильнее проявляются его пластические свойства и уменьшается прочность. Это явление объясняется ослаблением сцепления молекул льда в пространственной решетке кристаллов и возможностью перегруппировки атомов. Наоборот, чем ниже температура, тем более затрудняется перегруппировка атомов в пространственной решетке льда и тем сильнее проявляются его упругие и хрупкие свойства.

Значительное влияние на характер деформирования льда оказывает также его строение. В связи с этим необходимо вначале остановиться на деформировании отдельных кристаллов льда.

Деформирование монокристаллов льда

Характер деформации монокристалла в первую очередь зависит от направления сдвигающих усилий относительно базисной плоскости кристалла. Как уже отмечалось в главе I, кристалл льда можно представить как совокупность многочисленных, очень тонких прочных, но гибких пластинок, перпендикулярных к оптической оси кристалла. Эти элементарные пластины толщиной около 0,06 мк (Накава, 1958), соответствующие слоям наиболее густого расположения атомов, могут сравнительно легко сдвигаться друг относительно друга. При деформации льда скольжение наблюдается исключительно по базисным плоскостям. В тех случаях, когда направление сил, вызывающих сдвиг, не совпадает с базисной плоскостью, происходят одновременно изгиб элементарных пластинок и их относительные сдвиги. И только при температуре, близкой к точке плавления, пластические сдвиги могут происходить в любых направлениях (Glen, Pettit, 1954), так как в этом случае в кристалле разрушаются

многие внутренние связи. В базисной плоскости скольжение может происходить приблизительно одинаково легко в любом направлении (Steinemann, 1954). Такого рода пластические деформации могут достигать любой величины, вплоть до полного извлечения ограниченных базисными плоскостями частей из кристаллов льда.

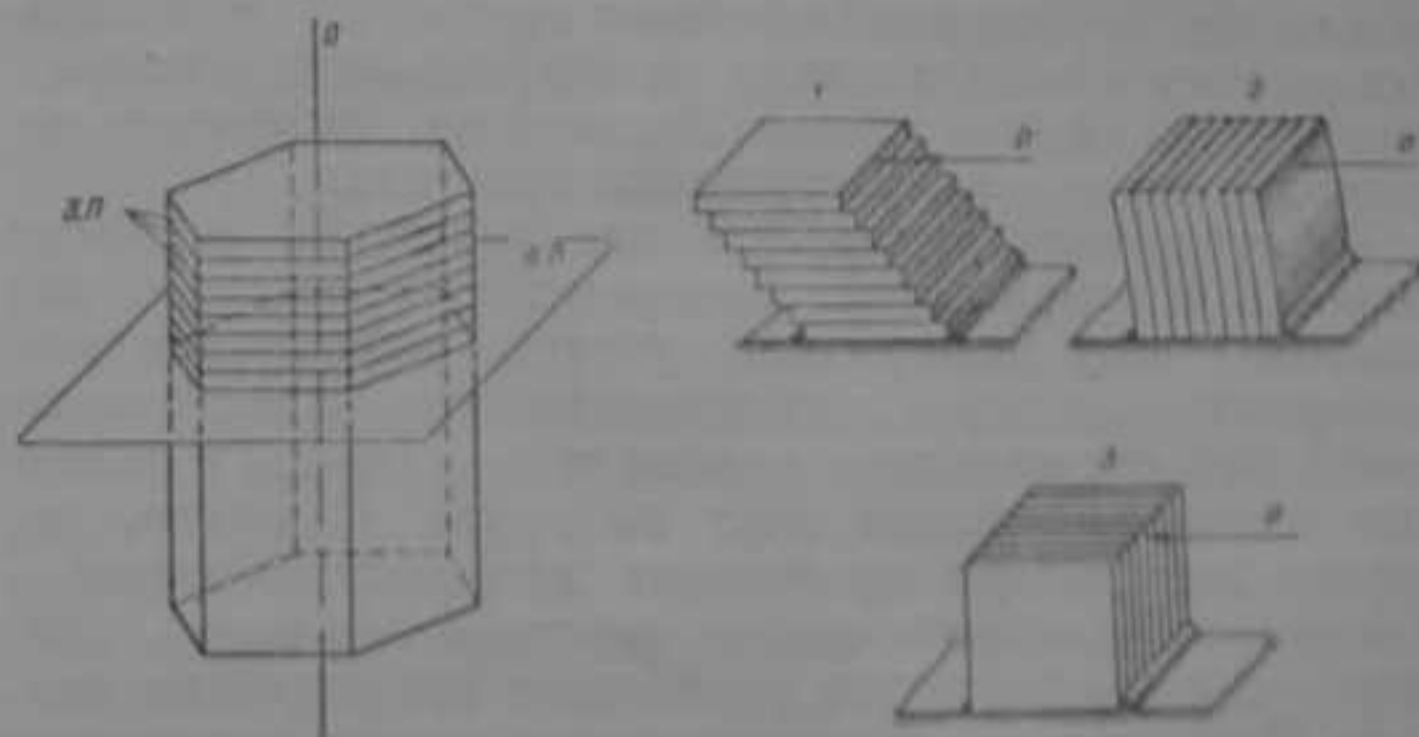


Рис. 3. Основные направления сдвигающих усилий относительно базисной плоскости кристалла:

O — оптическая ось кристалла; *BP* — базисная плоскость; *EP* — элементарные пластины; *P* — сдвигающее усилие; 1 — направление плоскости сдвига совпадает с *BP*; 2 — направление сдвигающего усилия и плоскости сдвига перпендикулярно *BP*; 3 — направление сдвигающего усилия совпадает с *BP*, но плоскость сдвига перпендикулярна *BP*.

На рис. 3 показаны три основных возможных направления сил, вызывающих сдвиг относительно базисной плоскости. В случае 1, когда плоскость сдвига совпадает с базисной плоскостью, происходит только трансляция элементарных пластинок, и деформация является пластической. Если сдвигающее усилие действует в направлении главной оси, т. е. направление силы и плоскости сдвига перпендикулярны базисной плоскости (случай 2), то элементарные пластины кристалла изгибаются, при этом имеют место небольшие относительные сдвиги пластинок по базисным плоскостям. После того как напряжения в элементарных пластинках достигнут некоторого предела, последние ломаются. Деформация является упруго-пластической и при возрастании напряжения сменяется разрушением. В случае 3, когда направление сдви-

¹ Это предельное напряжение называют также временным сопротивлением или пределом пластичности.

гающего усилия совпадает с базисной плоскостью, но плоскость сдвига перпендикулярна к ней, элементарные пластинки допускают только незначительную упругую деформацию. Однако при увеличении напряжения и соответственном увеличении упругих плоских деформаций элементарных пластинок появляется возможность их изгиба за счет потери устойчивости и некоторых относительных сдвигов в направлениях, не совпадающих с направлением сдвигающего усилия. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к разрушению кристалла.

Из сказанного видно, что под действием внешнего усилия в монокристалле одновременно происходят два различных вида деформации: упругие деформации элементарных пластинок и их относительные пластические сдвиги. Эти два вида деформации тесно связаны и оказывают взаимное влияние друг на друга. Известно, что упругая деформация происходит мгновенно (точнее — со скоростью распространения акустических волн), пластическая же деформация происходит относительно медленно. Поэтому в момент приложения усилия происходит лишь упругая деформация кристалла. Элементарные пластинки при этом еще как бы жестко соединены друг с другом, изгиб пластинок затруднен и общая деформация невелика. Возникшие внутренние напряжения сдвига вызывают соответствующие относительные скольжения элементарных пластинок и их изгиб. Начинается пластическая деформация. Скольжения пластинок и их изгиб вызывают перераспределение внутренних напряжений, что приводит к изменению скорости пластической деформации. В зависимости от направления действия усилия и величины деформации кристалла скорость пластической деформации может замедляться, оставаться постоянной или увеличиваться. Если в результате изгиба и скольжений пластинок напряжения сдвига на поверхностях ослабления между пластинками уменьшаются, то уменьшается и скорость пластической деформации монокристалла. Если же изгиб и повороты пластинок происходят в таком направлении, что напряжения сдвига между ними увеличиваются, то скорость пластической деформации увеличивается. В случае, когда не происходит существенного изменения внутренних напряжений, деформация может происходить с постоянной скоростью.

1587-8-61-1-19-8-4851

На рис. 4 представлены кривые зависимости величины сдвига монокристаллов льда от времени при различных напряжениях сдвига при температуре $-2,3^{\circ}$ по опытным данным С. Стейнеманна (Steinemann, 1954). Испытания проводились таким образом, что направление

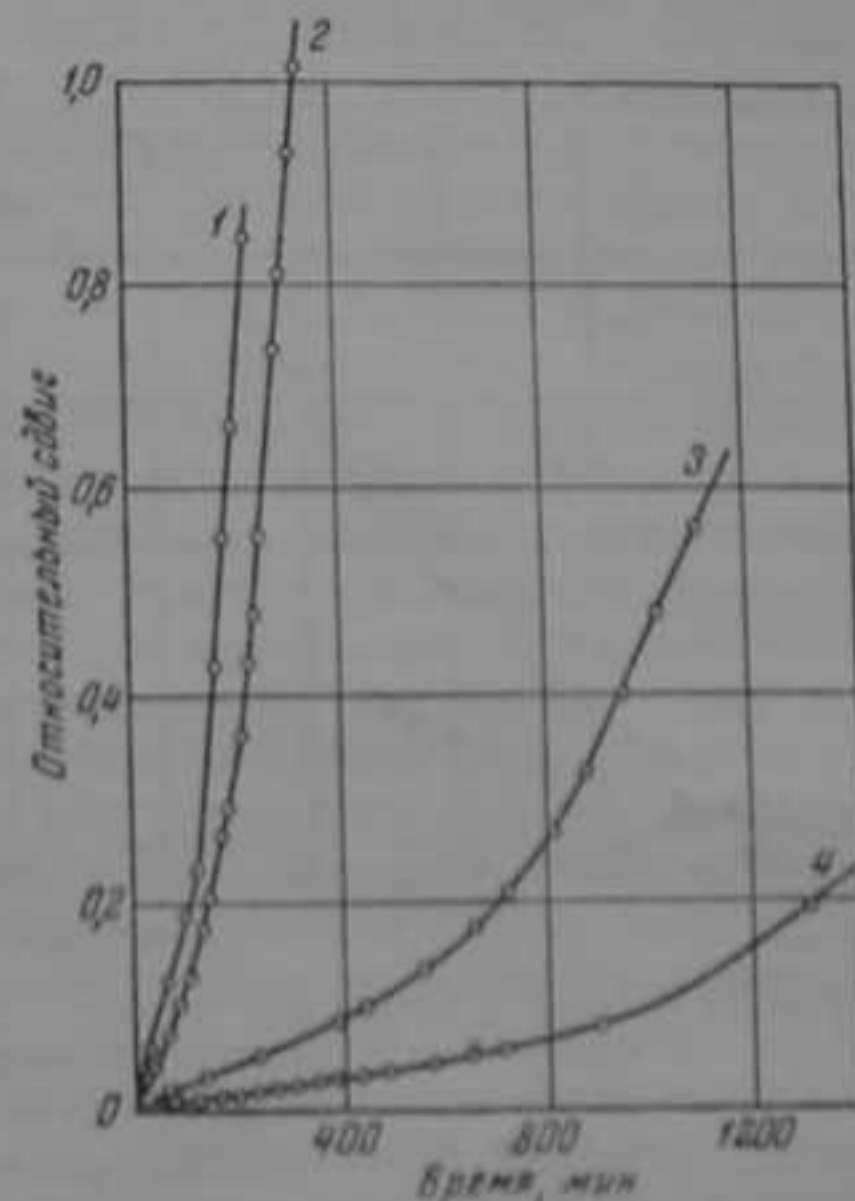


Рис. 4. Деформации сдвига монокристаллов льда при температуре $-2,3^{\circ}$ при совпадении плоскости скольжения с базисной плоскостью

1 — $\tau = 2,2 \text{ кг/см}^2$; 2 — $\tau = 1,9 \text{ кг/см}^2$; 3 — $\tau = 0,55 \text{ кг/см}^2$; 4 — $\tau = 0,45 \text{ кг/см}^2$

сдвигающих усилий совпадало с базисной плоскостью и происходил чистый сдвиг. Стейнеманн установил, что при чистом сдвиге кристалла можно выделить две стадии ползучести. Первая стадия при скольжениях, когда общая относительная угловая деформация по сравнению с недеформированным состоянием кристалла не превышает 0,1—0,2, и вторая — для больших сдвигов. В недеформированном кристалле скольжение происходит относительно медленно, затем скорость ползучести увеличивается и

наступает новый линейный участок. Происходит своеобразное размягчение кристалла. Переход из одной стадии в другую необратим. Кристалл, однажды деформированный более указанного предела для первой стадии, остается мягким даже после нескольких сотен часов. Деформированное состояние после переходного периода остается

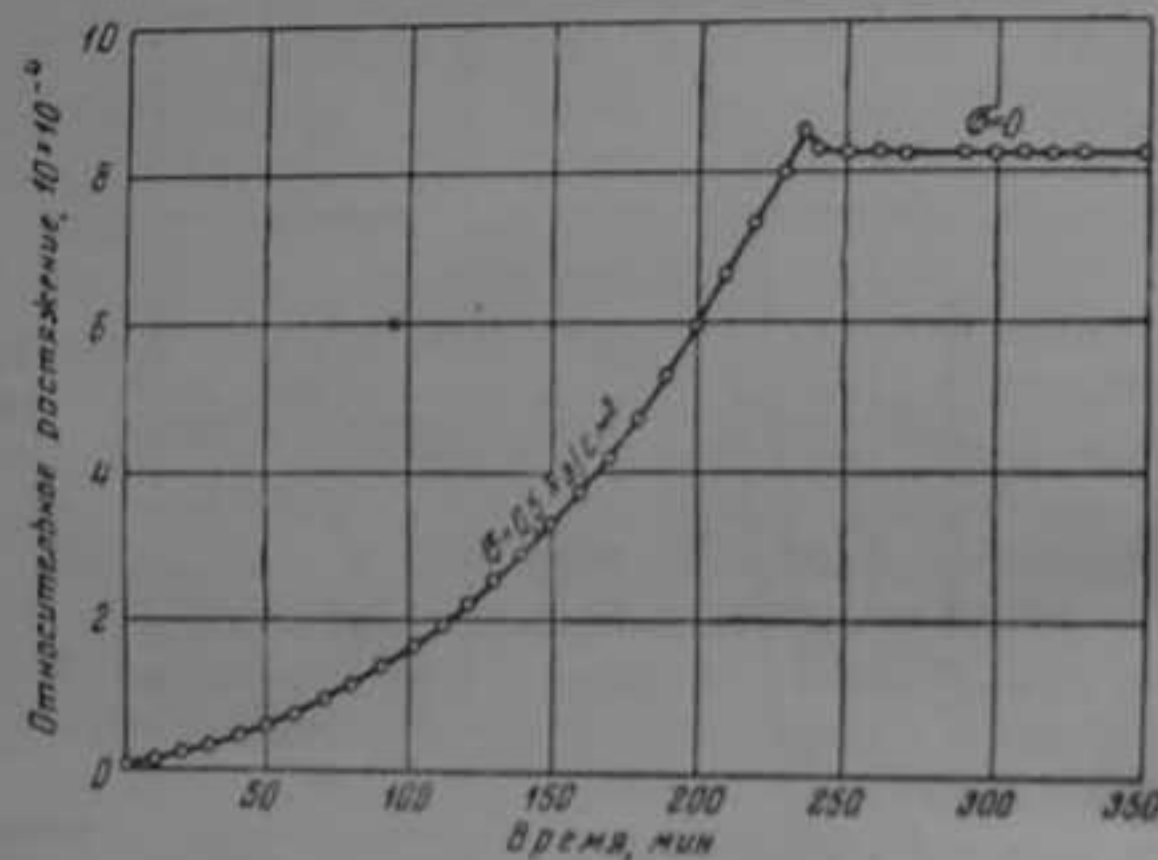


Рис. 5. Деформация при растяжении монокристалла льда при температуре -5° (направление растяжения под углом 45° к оси кристалла)

устойчивым. Зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от величины касательного напряжения τ для обеих стадий выражается уравнением $\dot{\epsilon} = k\tau^n$, где n для первой стадии равен 2,3—4 и для второй 1,3—1,8.

На рис. 5 показана кривая деформации при растяжении ледяного цилиндра, вырезанного из монокристалла ледникового льда, по данным опыта Еллинека и Брилла (Jellinek, Brill, 1959). Скорость деформации здесь со временем увеличивается. Это увеличение скорости деформации объясняется, по-видимому, описанным выше «размягчением» кристалла, а также тем, что в процессе растяжения в образце увеличиваются напряжения сдвига между элементарными пластинками вследствие уменьшения сечения образца и поворота пластинок. Кристалл льда допускает значительные пластические деформации растя-

жения. Известны, например, случаи, когда образец вытягивался почти в два раза больше своей первоначальной длины и превращался в тонкую ленту, оставаясь монокристаллом (Glen, 1952). Оптическая ось при этом меняла свое направление и становилась почти перпендикулярной к направлению растяжения. В тех случаях, когда оптическая ось кристалла совпадает с направлением растяжения и происходит преимущественно упругая деформация, пластическая деформация незначительна и стадия ускоряющейся ползучести отсутствует (Glen, Perutz, 1954).

У кристалла, подвергнутого пластической деформации под действием какого-либо внешнего усилия, после прекращения действия этого усилия происходит частичное уменьшение деформации в сторону восстановления начальной формы. Это восстановление происходит не сразу, а в течение некоторого времени. Процесс восстановления происходит аналогично процессу деформирования кристалла в начальный период действия усилия. В момент прекращения действия усилия происходит мгновенное упругое восстановление за счет устранения общего напряженного состояния; затем наблюдается своеобразная «обратная ползучесть», заключающаяся в постепенном уменьшении общей деформации кристалла с затухающей скоростью.

Работа, затрачиваемая при механических воздействиях на кристалл, частично превращается в тепловую энергию, а остальная часть преобразуется в свободную энергию кристалла. При пластической деформации происходит главным образом превращение работы в тепловую энергию, за счет которой повышается температура или происходит частичное плавление. Прирост свободной энергии кристалла осуществляется при упругой деформации, а также при разрушении кристалла, где работа затрачивается на создание дополнительной поверхности. Незначительный прирост свободной энергии может быть и при пластической деформации, когда происходят некоторые нарушения пространственной решетки и создаются напряжения, ведущие к упрочнению. Избыток свободной энергии кристалла может расходоваться на процессы, связанные с релаксацией, или же снова превращаться в механическую работу. Прирост свободной энергии может вызвать также рекристаллизацию.

Деформирование поликристаллического льда

Деформация поликристаллического льда складывается из деформации его кристаллов и относительных смещений кристаллов. Наличие второго фактора обуславливает некоторое отличие закономерностей деформирования поликристаллического льда от деформирования монокристаллов.

Поликристаллический лед, в котором направление оптических осей большинства кристаллов совпадает (характерная особенность ледяного покрова при спокойном замерзании воды), характеризуется анизотропией механических свойств. Величина деформации такого льда, так же как и деформация отдельных монокристаллов, в значительной степени зависит от направления действия приложенных сил относительно направления осей большинства кристаллов. Но, учитывая возможность относительных скольжений кристаллов льда, а также тот факт, что в деформированном массиве льда почти всегда напряженное состояние неоднородно и, следовательно, напряжения сдвига действуют в различных направлениях относительно осей кристаллов, анизотропия проявляется в несколько меньшей степени, чем у монокристаллов льда. Если же лед состоит из беспорядочно ориентированных кристаллов (лед, образовавшийся при замерзании воды с перемешиванием при послойном намораживании, при смерзании снега и т. п.), то его большей частью можно рассматривать как изотропное тело.

Рассмотрим закономерности деформирования на отдельных примерах.

При сжатии поликристаллического льда вслед за упругой деформацией начинается пластическая деформация — ползучесть. Если давление относительно небольшое (в пределах нескольких кг/см^2), то при одностороннем равномерном сжатии образца льда спустя некоторое время после приложения нагрузки устанавливается постоянная скорость деформации (рис. 6), величина которой зависит от давления и температуры. Скорость деформации при этом может сохраняться постоянной в течение длительного времени, пока сохраняются неизменными температура и напряжения в образце. В случае действия большого давления вслед за стадией установившейся

скорости деформации наступает стадия ускоряющейся деформации или прогрессирующего течения, при которой скорость деформации непрерывно увеличивается. Чем больше давление, тем быстрее наступает стадия ускоряющейся деформации и, соответственно, уменьшается

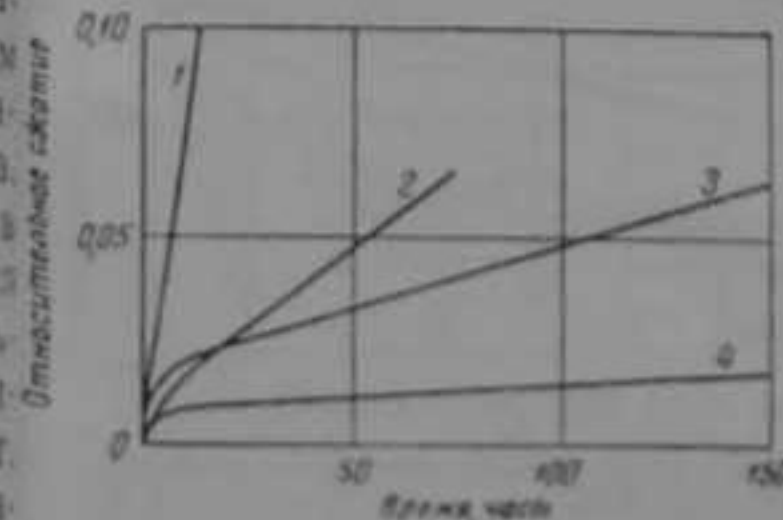


Рис. 6. Кривые деформации образцов поликристаллического льда при сжатии по данным Глена (Glen, 1955)

1 — $\sigma = 0,1 \text{ кг/см}^2$, $t = -0,02^\circ$; 2 — $\sigma = 0,6 \text{ кг/см}^2$, $t = -0,02^\circ$; 3 — $\sigma = 0,1 \text{ кг/см}^2$, $t = -6,7^\circ$; 4 — $\sigma = 0,6 \text{ кг/см}^2$, $t = -12,7^\circ$

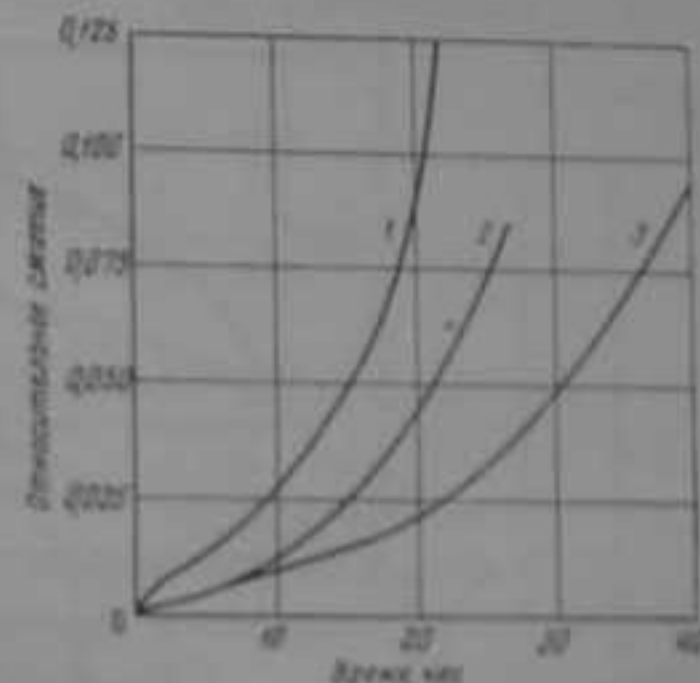


Рис. 7. Кривые деформации льда при сжатии:

1 — $\sigma = 21 \text{ кг/см}^2$, $t = -6,7^\circ$; 2 — $\sigma = 10 \text{ кг/см}^2$, $t = -17^\circ$; 3 — $\sigma = 15 \text{ кг/см}^2$, $t = -8,4^\circ$

стадия установившейся скорости деформации. При давлении порядка 10 кг/см^2 и более стадия установившейся скорости деформации практически исчезает и в этих случаях вслед за некоторым уменьшением скорости деформирования образца наступает стадия ускоряющейся деформации (рис. 7). Чем больше давление, тем быстрее происходит деформирование образца льда (Карташкин, 1947).

Попутно следует отметить, что стадия ускоряющейся деформации характерна для случаев, когда в испытываемом образце льда сохраняются постоянные напряжения сжатия. А так как при продольном сжатии образца происходит увеличение его поперечного размера за счет бокового расширения, то в случаях, когда сжатие происходит под действием постоянной нагрузки, будет иметь

место некоторое уменьшение напряжений сжатия в образце, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению скорости сжатия.

При увеличении давления выше предела прочности льда происходит хрупкое разрушение льда.

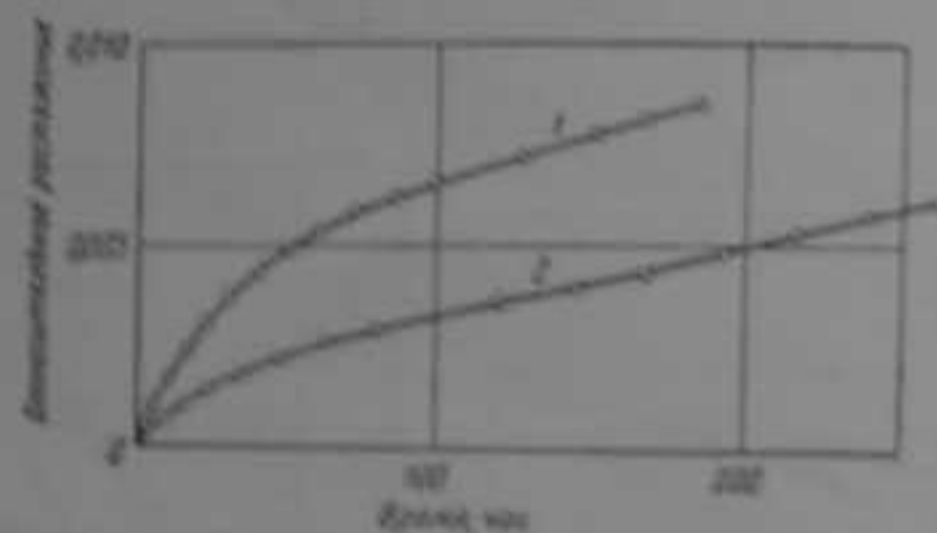


Рис. 8. Кривые деформации льда при растяжении:
1 — $\sigma = 0,3$ атм/см², $t = -7^\circ$; 2 — $\sigma = 0,75$ атм/см², $t = -7^\circ$.

Для льда с ориентированным направлением кристаллов при сжатии в направлении, перпендикулярном к направлению оптических осей кристаллов, скорость деформации несколько больше, а предел прочности — меньше, чем при сжатии в направлении осей кристаллов.

Деформации поликристаллического льда при растяжении (рис. 8) происходят в основном аналогично описанным деформациям сжатия (Карташкин, 1947). Отличие заключается в том, что если при сжатии в плоскостях сдвига действуют сжимающие напряжения, увеличивающие сцепление между сдвигаемыми частицами льда, то при растяжении в плоскостях сдвига действуют растягивающие напряжения, способствующие уменьшению сцепления. В результате могут возникать условия облегчающие относительные сдвиги кристаллов и сдвиги элементарных пластинок в кристаллах, что в целом будет ослаблять лед. Площадь поперечного сечения образца льда при растяжении уменьшается, поэтому значительно возрастает влияние структуры льда, неоднородности, внутренних ослаблений. Наличие в растягиваемом образце воздушных полостей, трещинок или структурных ослаблений приводит к тому, что в этих местах возникает неоднородное напряженное состояние и увеличиваются растя-

гивающие напряжения, вызывающие ускорение деформации. Увеличивается также возможность разрушения льда.

Монолитный поликристаллический лед при равномерном плавном растяжении допускает значительные пластические деформации. Однако даже при незначительном

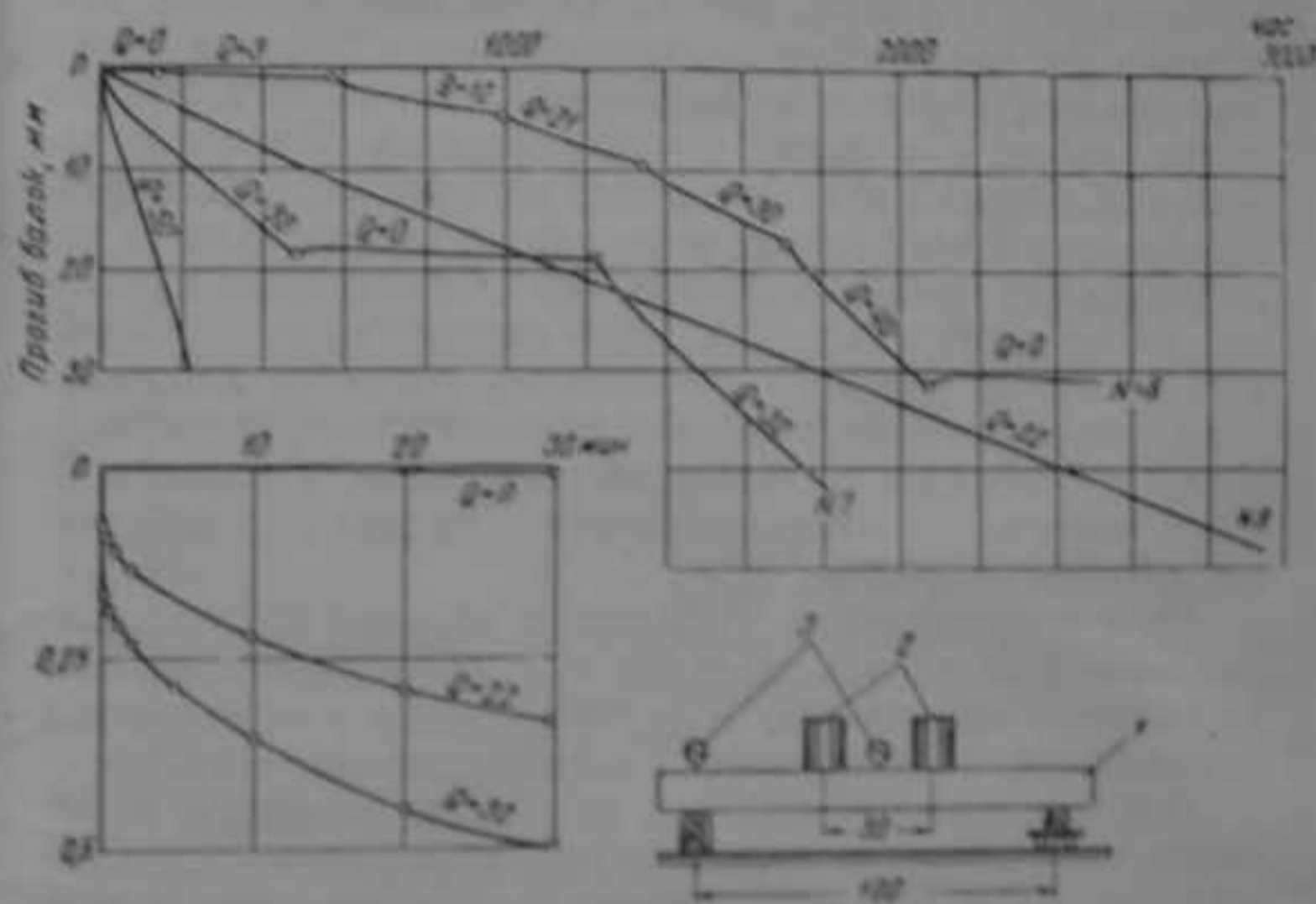


Рис. 9. Прогиб ледяных балок при температуре около -2° и различных нагрузках Q , кг.

1 — ледяная балка; 2 — опоры; 3 — индикаторы для определения прогибов балки

динамическом воздействии или при колебании испытываемый образец льда может разорваться.

Предел прочности льда при растяжении обычно значительно меньше, чем при сжатии.

На рис. 9 показано несколько кривых, характеризующих закономерности изгиба льда. Для опытов применялись призматические балки размером $10 \times 10 \times 120$ см из льда беспорядочной структуры (Войтковский, 1966). Балки устанавливались на две опоры с пролетом 100 см и прогибались под действием собственного веса и допол-

нительной нагрузки из двух грузов, расположенных симметрично на расстояниях 15 см от середины пролета балки. Отмечено, что при нагружении балки вначале наблюдается интенсивное нарастание деформации, затем скорость деформации постепенно уменьшается и стремится к некоторому постоянному для данной нагрузки и температуры значению. Деформация с этой скоростью может происходить в течение весьма длительного времени. Например, на рис. 9 приведен случай, когда ледяная балка прогибалась с примерно постоянной скоростью в течение 3 тыс. часов, т. е. более четырех месяцев. Однако в начальный период после изменения нагрузки скорость прогиба претерпевает резкие изменения и зависит как от величины действующей нагрузки, так и от величины нагрузки до ее изменения. Так, при снятии груза, помимо «мгновенного» упругого уменьшения прогиба, наблюдалось постепенное замедленное уменьшение прогиба, особенно интенсивное в течение первого часа, а через 1—2 суток начиналось новое увеличение прогиба под действием собственного веса.

Если напряжения в изгибаемом образце льда превысят некоторый предел, то вслед за стадией установившейся скорости деформации наступает стадия ускоряющейся деформации, заканчивающаяся разрушением образца.

Поликристаллический лед при плавном изгибе допускает значительные пластические деформации, однако при динамическом воздействии он так же, как и при растяжении, легко разрушается. Разрушение льда при изгибе обычно начинается со скалывания вблизи нейтральной оси, за ним следует разрыв льда в растянутой зоне и выкол льда в сжатой зоне (Карташкин, 1947).

На рис. 10 представлены экспериментальные кривые деформации поликристаллического льда беспорядочной структуры при чистом сдвиге при последовательном ступенчатом увеличении касательных напряжений.

Как видно из графика, в начальный момент времени после приложения сдвигающего усилия или его увеличения наблюдается интенсивное нарастание деформации сдвига, затем скорость деформации постепенно уменьшается, приближаясь к некоторой постоянной для данных условий величине. При малых напряжениях пластическая деформация по своей величине не имеет опреде-

ленного предела и может происходить весьма длительное время. Например, во время опытов автора (см. рис. 15) одна из ледяных труб деформировалась в течение 5000 час под действием крутящего момента, вызывающего касательные напряжения 1 кг/см^2 при 1° . При этом скорость деформации была близка к постоянной.

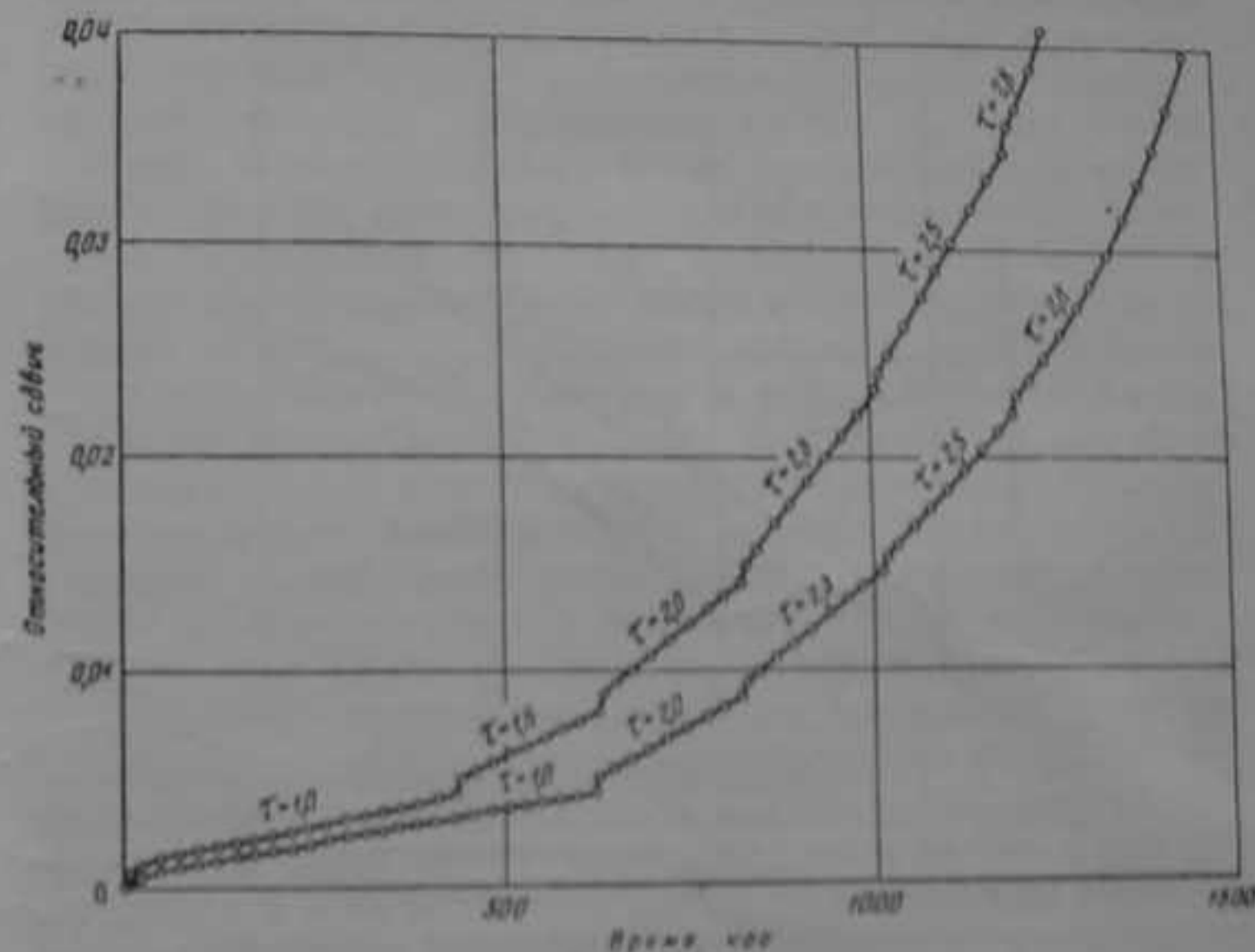


Рис. 10. Чистый сдвиг льда при температуре -4° (τ — касательное напряжение, кг/см^2)

Если касательные напряжения превышают некоторый предел, то после замедления скорости деформации в начальный период действия напряжений и некоторого промежутка деформирования с примерно постоянной скоростью скорость сдвига начинает постепенно возрастать, что в конечном итоге может привести к разрушению деформируемого объема льда.

В случае сложного напряженного состояния величина и скорость деформации сдвига зависят, помимо касательных напряжений, также и от величины нормальных напряжений в плоскости сдвига. При одном и том же касательном напряжении дополнительное действие нормаль-

ных напряжений может существенно изменить (увеличить) скорость деформации (рис. 11). В остальном характер деформации остается таким же, как при чистом сдвиге.

Деформации сдвига являются основой любой деформации, при которой происходит изменение формы тела.

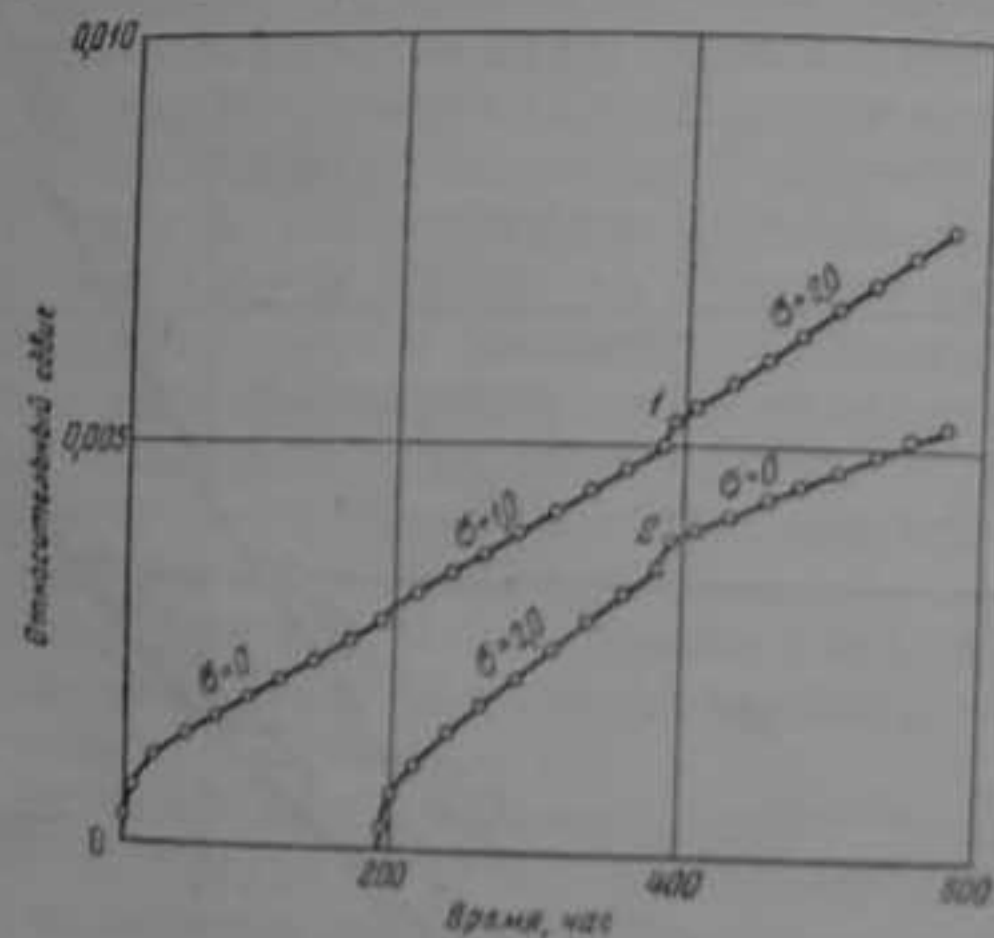


Рис. 11. Деформация сдвига при одновременном действии касательных и нормальных напряжений в опытах автора по одновременному кручению и продольному сжатию ледяных труб:

1 — касательное напряжение; 2 — нормальное напряжение;
1 — $\tau = 1,5 \text{ кг/см}^2$; 2 — $\tau = 1,0 \text{ кг/см}^2$

В частности, любая пластическая деформация льда, которая по своему существу характеризуется изменением формы тела без разрушения и изменения объема, происходит вследствие внутренних относительных сдвигов частиц льда. Поэтому характер пластической деформации при разных способах деформирования — сжатии, растяжении, изгибе, кручении, сложном деформировании — остается примерно одинаковым. Различия же проявляются главным образом в характере разрушения и величине предела прочности.

Деформация поликристаллического льда происходит в основном за счет трех факторов: 1) упругих и пластических деформаций отдельных кристаллов; 2) взаимных

перемещений кристаллов один относительно другого; 3) разрушения кристаллов.

Все эти факторы тесно связаны и оказывают взаимное влияние друг на друга. Одновременно с ними во льду идут процессы рекристаллизации, которые также оказывают влияние на характер деформации. Кристаллы, ориентированные базисной плоскостью ближе к направлению сдвига и поэтому в процессе деформации испытывающие меньшее напряжение, растут за счет менее выгодно ориентированных более напряженных кристаллов. Отдельные перенапряженные кристаллы разрушаются, и появляются обломки кристаллов, свободные в начале их образования от напряжений, которые также растут за счет старых напряженных кристаллов и затем сами испытывают напряжения и деформируются. Таким образом, при деформации льда за счет частичного разрушения старых кристаллов и рекристаллизации происходит частичное восстановление недеформированного состояния, своеобразное «восстановление» структуры льда. Этим и объясняется тот факт, что в ряде случаев лед практически не имеет пределов деформирования.

В момент приложения нагрузки происходит упругая деформация, обусловленная исключительно упругими деформациями кристаллов льда. В результате упругих деформаций кристаллов возникают напряжения внутри кристаллов и на контактах между ними, которые вызывают пластические деформации кристаллов, их относительные сдвиги и в отдельных случаях разрушение кристаллов. Таким образом, непосредственно вслед за «мгновенной» упругой деформацией начинается пластическая деформация. В начальный момент могут иметь место концентрации напряжений в отдельных точках кристаллов, затем происходят внутренние сдвиги, скольжения по границам кристаллов и разрушение отдельных кристаллов, что ведет к некоторому внутреннему перераспределению напряжений и частичному их выравниванию. Происходит перекомпоновка частиц, при которой лед лучше сопротивляется нагрузке, как бы увеличивается его жесткость, а это вызывает уменьшение скорости его деформирования.

Наряду с указанным упрочнением в процессе деформации происходит нарушение связей между элементар-

ными пластинками кристаллов и между отдельными кристаллами, а также разрушение кристаллов, приводящее к расслаблению и, соответственно, к увеличению скорости деформирования. Таким образом, под воздействием нагрузки в поликристаллическом льде одновременно происходят два противоположных процесса: с одной стороны, нарушение связей и расслабление, а с другой — восстановление связей и упрочнение. Характер деформации определяется тем, какой из этих процессов преобладает.

При малых напряжениях сдвига вслед за мгновенной деформацией и уменьшением скорости деформации в начальный период после приложения нагрузки постепенно устанавливается подвижное равновесие между внешними усилиями и суммарным внутренним сопротивлением. Увеличение жесткости льда из-за возрастания внутренних деформаций компенсируется уменьшением жесткости вследствие образования частиц недеформированного материала путем разрушения отдельных кристаллов, рекристаллизации и расслабления. Наступает стадия постоянной скорости пластической деформации — установившейся ползучести, которая может продолжаться неограниченно длительное время, пока будут сохраняться неизменными условия деформирования — температура, напряжения, структура льда. Но эти условия обычно не могут сохраняться неизменными в течение длительного времени, поэтому и стадия установившейся ползучести практически не является беспредельной, хотя и может быть весьма длительной. Даже при постоянной температуре и напряжениях в процессе деформирования льда может измениться ориентировка его кристаллов. Вследствие рекристаллизации постепенно образуется структура с ориентировкой главных осей вдоль перпендикулярной линии к плоскости сдвига (Шумский, 1958), что способствует увеличению скорости деформации.

Если напряжения сдвига больше некоторого предела, который условно назовем «пределом длительной ползучести» (подробнее об этом см. главу IV), то внутреннее равновесие между процессами расслабления и упрочнения не наступает или оно непродолжительно. Расслабление преобладает над упрочнением и длительная стадия установившейся ползучести невозможна. Деформации

в этом случае развиваются сравнительно быстро и приводят к тому, что связи между сдвигающимися друг относительно друга элементарными пластинками в кристаллах льда и между отдельными кристаллами нарушаются, внутреннее сопротивление льда уменьшается. В отдельных случаях во льду образуются поверхности скольжения с ослабленным сцеплением, по которым сдвиг происходит более интенсивно. Все это приводит к постепенному увеличению скорости деформации, которая в конечном итоге может привести к разрушению льда.

Изменение величины действующего напряжения сдвига приводит к резкому изменению скорости деформации. Если в процессе деформации напряжение скачкообразно увеличивается (при увеличении нагрузки), то изменение скорости деформации происходит аналогичным путем, как и описанное выше изменение скорости деформации в начале действия напряжения. Вслед за мгновенным скачком деформации — упругой деформацией, соответствующей скачку напряжений, — продолжается деформация с уменьшающейся скоростью. Затем постепенно устанавливается новая постоянная скорость деформации, соответствующая равновесию новых внешних усилий и внутреннего сопротивления, или начинается увеличение скорости деформации — ускоряющаяся ползучесть. Уменьшение напряжения сдвига вызывает уменьшение упругих деформаций кристаллов, что в свою очередь вызывает пластические сдвиги в кристаллах и их относительные перемещения в сторону, противоположную начальной деформации. Этот процесс сочетается с возрастанием пластических деформаций под влиянием действующих (после уменьшения) напряжений. В итоге получается довольно сложный характер деформации: в момент уменьшения напряжения происходит некоторое скачкообразное, переходящее в затухающее во времени уменьшение деформации; затем наступает кратковременная стабилизация деформации и новое ее увеличение со скоростью, возрастающей до величины, соответствующей действующему после изменения напряжению.

Для наглядности приведем (рис. 12) кривую изменения прогиба ледяной балки при последовательных нагрузках через различные промежутки времени (Войтковский, 1957). Здесь отчетливо видно, как проявляется

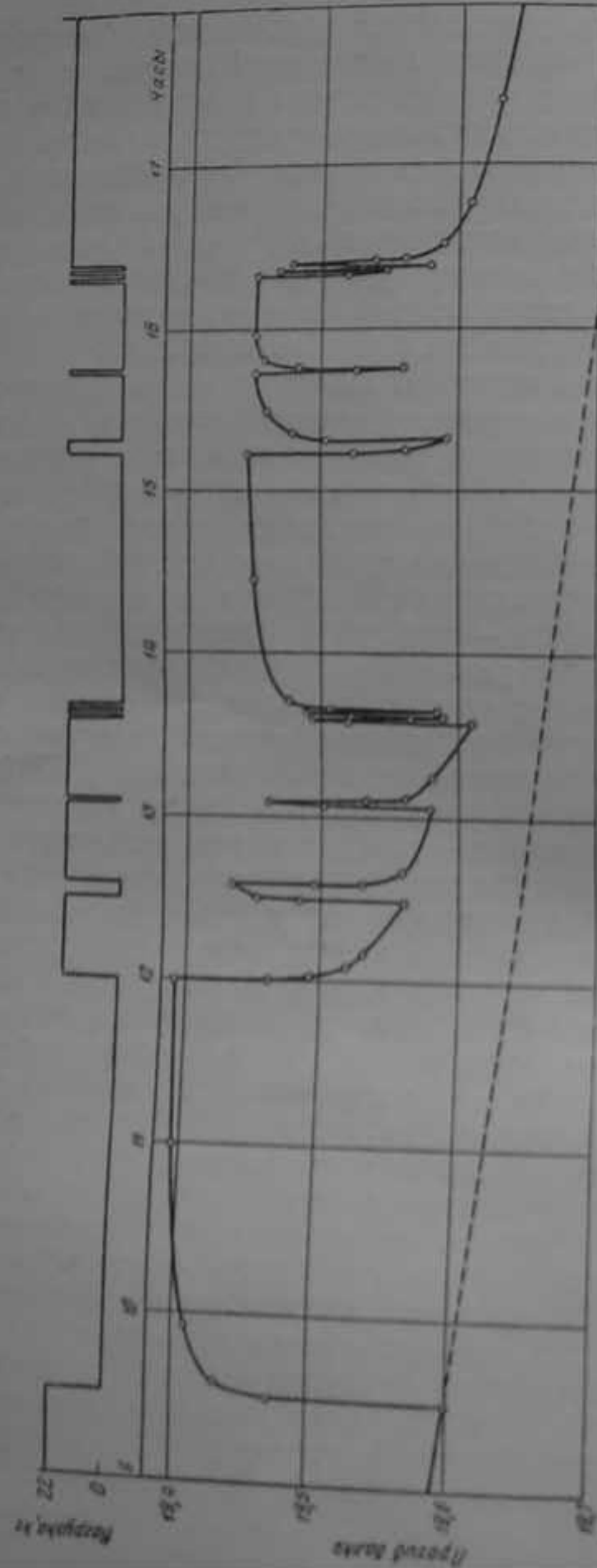


Рис. 12. Прогиб ледяной балки при последовательных нагрузках и разгрузках

упругое последствие (замедленное проявление упругости), заключающееся в том, что, помимо мгновенной упругой и необратимой пластической деформации после приложения нагрузки, в течение некоторого времени происходит структурно-обратимая деформация, которая после разгрузки со временем исчезает. Эта замедленная структурно-обратимая деформация занимает как бы промежуточное место между упругой и пластической деформациями. Она заключается в том, что после приложения нагрузки и мгновенной упругой деформации происходит постепенное дальнейшее увеличение упругой деформации элементарных пластинок кристаллов по мере относительных пластических сдвигов этих пластинок и отдельных кристаллов.

Соответственно, после удаления нагрузки упругие напряжения в кристаллах исчезают не сразу, а постепенно, вызывая пластические сдвиги в направлении, противоположном первоначальному деформированию.

Одним из проявлений упругого последствия является релаксация напряжений во льду при постоянстве его деформации. В этом случае происходит постепенное уменьшение упругих деформаций кристаллов за счет роста пластической деформации, соответственно уменьшаются внутренние напряжения и убывает сила сопротивления льда. В итоге сила, необходимая для удержания образца льда в заданном деформированном состоянии, со временем будет уменьшаться. На рис. 13 представлены кривые релаксации по данным опытов Б. Д. Карташкина (1947). Кривые показывают изменение величины силы, необходимой для сохранения начальной величины прогиба ледяных балок сечением 8×12 см и пролетом 100 см в зависимости от времени и начальной нагрузки. Эти кривые соответствуют изменению напряжен-

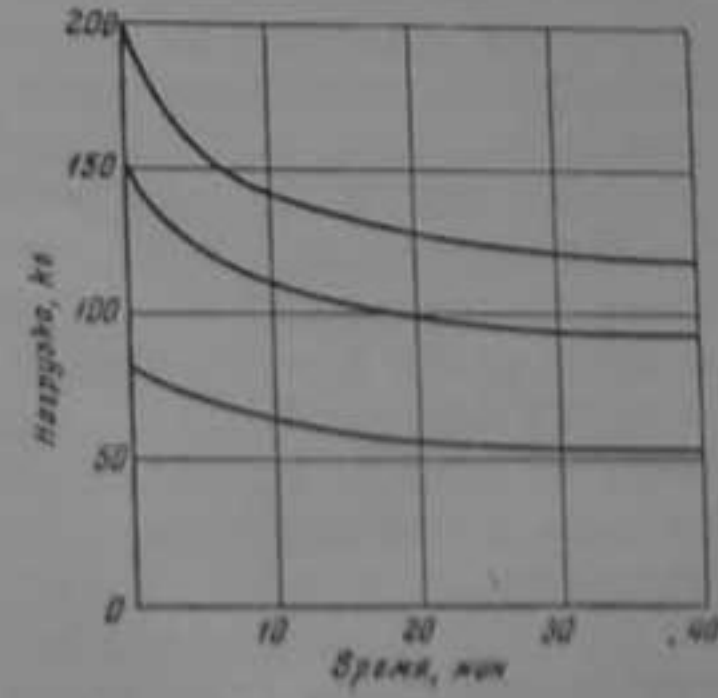


Рис. 13. Кривые релаксации

ного состояния в балках и отображают общий характер релаксации напряжений.

Наиболее интенсивное уменьшение напряжений — релаксация — наблюдается в начальный период после прекращения увеличения величины деформации льда. Затем скорость релаксации постепенно замедляется. Чем выше начальное напряжение, тем быстрее происходит релаксация в начальный период. Так как предел упругости поликристаллического льда практически равен нулю, то при длительной релаксации напряжения также будут уменьшаться в пределе до нуля.

Пластическая деформация поликристаллического льда связана частичным разрушением внутренних связей в кристаллах и между ними, поэтому она не всегда происходит плавно. К. Е. Иванов и В. В. Лавров (1950) отмечали, что при изгибе образцов из поликристаллического льда деформация увеличивалась скачкообразно, сопровождаясь периодически своеобразным звуком, похожим на скрежет. Однако в наших опытах (Войтковский, 1957), где применялись значительно большие по размерам образцы, скачков не наблюдалось. По-видимому, скачкообразность деформации может существенно проявляться лишь при деформировании малых образцов льда, когда частичное разрушение связей в одном кристалле может оказывать ощутимое влияние на деформацию всего образца. В больших образцах поликристаллического льда каждый такой скачок не будет ощутимым для общей деформации образца и в результате суммарного действия большого количества маленьких скачков деформация практически происходит весьма плавно. Автор предполагает также, что скачкообразность деформации может проявляться ощутимо в случаях, когда в деформируемом массиве льда возникают неравномерные напряжения сдвига, превышающие в отдельных местах предел длительной ползучести. Тогда в местах повышенных напряжений могут возникнуть условия для прогрессирующего течения, что будет вызывать резкое перераспределение внутренних напряжений и, возможно, скачкообразное изменение скорости деформирования. Все эти вопросы требуют дальнейшей экспериментальной проверки.

В последнее время П. А. Шумский (P. A. Shumsky, 1958) разработал новую теорию механизма деформиро-

вания и рекристаллизации льда, основанную на данных кристаллографических исследований структуры подвергшихся деформации образцов льда, фирна и снега. Согласно этой теории, выделяется шесть различных механизмов деформирования льда в зависимости от структуры, величины касательного и нормального напряжения и температуры.

Первый механизм деформирования льда — медленный сдвиг параллельно базисным плоскостям кристаллов. Никаких изменений структуры льда при этом не наблюдается. Второй механизм — масса поликристаллического льда медленно течет под действием касательного напряжения менее 1 кг/см^2 , при этом внутрикристаллическое скольжение вдоль базисных плоскостей сопровождается небольшим искривлением и другими нарушениями решетки, медленной миграционной рекристаллизацией льда и упорядочением ориентации структуры (образуется структура с ориентировкой главных осей перпендикулярно к плоскости сдвига). Третий механизм при большой скорости течения, когда межкристаллическое скольжение сопровождается искривлением и нарушениями кристаллической решетки, нарушением строения сильно напряженных кристаллов и рекристаллизацией. Четвертый механизм — при дальнейшем увеличении нагрузки и скорости деформации, когда происходит нарушения кристаллических связей и их частичное разрушение, сопровождаемое межкристаллическим скольжением, уменьшением размеров кристаллов и образованием хаотической структуры в зоне сдвига. Пятый механизм — деформация льда происходит при малом давлении под действием больших касательных напряжений (10 кг/см^2 и больше); в результате сдвига образуются трещины, происходит скольжение вдоль плоскостей разлома, лед разрушается. Шестой механизм — деформация происходит при большом давлении и высокой температуре; во льду происходит частичное внутреннее таяние под действием теплоты трения, а затем смерзание и образование так называемых голубых лент.

Выделение указанных механизмов деформирования льда позволит более четко представить физическую сущность закономерностей деформирования льда и специфику механических свойств льда.

Глава III

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ЛЬДА

Предел упругости льда, как указывалось выше, близок к нулю, и упругие свойства обычно проявляются совместно с пластическими свойствами. В связи с этим при определении точного значения величин, характеризующих упругие свойства льда (модуль упругости E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона μ , встречаются затруднения.

При изменении нагрузки, действующей на лед, возникают три различных рода деформации: упруго обратимая мгновенная деформация, необратимая деформация — ползучесть и медленно обратимая деформация последействия. Такое деление по существу является условным, так как все три рода деформации взаимосвязаны и нет четких границ между ними. Особенно это касается последнего рода деформации — последействия. Начальная стадия деформации последействия начинается непосредственно за мгновенной упругой деформацией и воспринимается обычно как упругая деформация. Последующая же ее стадия является частью общей величины ползучести. А так как интенсивность нарастания деформации последействия имеет наибольшее значение в начальный момент после изменения нагрузки, то отмечаемая нами «начальная» упругая деформация льда будет в значительной степени зависеть от скорости приложения нагрузки и промежутка времени между приложением нагрузки и замером деформации. Здесь влияния могут оказывать даже десятые доли секунды (Донченко Шульман, 1949). Соответственно, при экспериментальном определении модулей упругости и сдвига, их значения

также будут зависеть от скорости приложения нагрузки и времени ее действия. Это и является одной из причин значительного расхождения количественных значений параметров, характеризующих упругие свойства льда.

Модуль упругости

Модуль упругости характеризует сопротивляемость льда упругой деформации при растяжении или сжатии. Если кубик льда подвергнут одностороннему сжатию, то его относительное упругое сжатие ε можно выразить формулой

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

где σ — величина нормального напряжения;

E — модуль упругости, являющийся коэффициентом пропорциональности, связывающим нормальное напряжение и относительное сжатие.

При растяжении модуль упругости аналогичным образом является коэффициентом, связывающим нормальное напряжение растяжения и относительное удлинение.

Для определения модуля упругости льда применяется два метода: статический и динамический. Сущность статического метода заключается в измерении величины деформации после приложения нагрузки при испытании образцов льда на сжатие, растяжение или изгиб. Динамический метод основан на вычислении модуля упругости по данным замеров скорости распространения во льду упругих колебаний.

Первые опыты по определению модуля упругости льда, как указывает Вейнберг (1940), были проведены еще в начале прошлого столетия Юнгом (1820) и Беваном (1824). Позже такие опыты проводились многочисленными исследователями. Результаты основных опытов сведены в табл. 1 и 2.

Как видно из приведенных данных, значения модуля упругости льда могут колебаться в широких пределах. Наибольшие колебания наблюдаются при статическом методе исследований, а при динамическом методе получаемые результаты изменяются в меньших пределах, причем среднее значение величины модуля упругости

Модуль упругости льда по данным статического метода исследований

Исследователь	Характер льда	Условия нагрузки	Температура, °C	Модуль упругости, $\times 10^3$ кг/см	Литература
Беван, 1824	Озерный	Изгиб	—	52	Вейнберг, 1940
Фабриан, 1877	Искусственный	Растяжение	0	17	Там же
Кох, 1833	Озерный	Изгиб	—	70—90	"
Траубридж и Мак-Рэ, 1885	Из пруда	"	1	41—57	"
То же	То же	"	3	58—72	"
"	"	"	5	88—104	"
"	"	"	7	59—83	"
Хесс, 1902	Ледниковый	"	0—5	5—42	Hess, 1902
Кох, 1913	Озерный	"	6—8	59—68	Koch, 1913
Кох, 1914	Речной	"	0	86—117	Koch, 1914
Матсуима, 1920	"	Изгиб, $\sigma \perp f$ и l^*	3,9	9	Линьков, 1957
То же	"	" , $\sigma \parallel f$	2,6	6	Там же
"	"	" , $\sigma \parallel l$	3,7	19	"
Пинегин В. Н., 1923	"	"	5,9	12	Пинегин, 1923
То же	"	"	15—19	21	Там же
Пинегин В. Н., 1922—25	"	Сжатие, $\sigma \parallel f$	3	3—37	Пинегин, 1927
То же	"	" , $\sigma \perp f$	5	48—84	Там же

Окончание таблицы 1

Соколов И. А., 1926	Монокристалл	Изгиб	6	27	Соколов, 1926
Иванов К. Е.	—	Изгиб ледяного покрова	—	44	Иванов, 1946
Шульман А. Р.	—	—	—	—	Шульман, 1948
Кобеко П. П., 1946	—	—	—	—	Кобеко, 1946
Карташкин Б. Д., 1943—45	Наливной	Сжатие	3,5	31	Карташкин, 1947
То же	"	"	7—8	48—60	Там же
"	"	Растяжение	9	36—55	"
"	"	"	18	42—60	"
"	Бассейновый	"	6—7	25—46	"
"	Речной	"	5,5—8	37—50	"
"	"	Изгиб	1,5—21	35—62	"
"	Наливной	"	1—18,5	31—59	"
"	"	"	20—27	35—75	"
"	"	"	40	73—89	"
Войтковский К. Ф., 1954—58	Искусственный	"	1—4	25—65	—
Еллинек, Брид, 1956	Мелкозернистый	Растяжение	5—15	21—78	Jellinek v. Brill, 1956
То же	Монокристалл	То же, ось под углом 45° к силе	5	49—83	Там же

* σ —направления оптических осей кристаллов; f —направление силы; l —длина образца.

Модуль упругости льда по данным динамических методов исследований*

Исследователь	Характер льда	Метод исследований	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Модуль упругости, $\times 10^8 \text{ кг/см}^2$	Литература
Траубридж и Мак-Рэ, 1885	Искусственный	Продольные и поперечные колебания призмы	—	61—86	Вейсберг, 1940
Броккамп, Мотес, 1929	Ледники в Альпах	Сейсмометрический	—	69	Brockamp, Mothes, 1930
Бойль Спруэль, 1931	Искусственный	Акустический	9—20	90—94	Boyle, Sproule, 1931
То же			30—35	95—109	Там же
Элинг, Крери и Торн, 1934	Искусственный и озерный		5—15	88—98	Ewing, Crary, Thorne, 1934
Берденников В. П., 1948	Искусственный		2—40	88—97	Берденников, 1948
Накая, 1958	Ледниковый, плотность $\rho = 0,914$		9	90	Nakaya, 1958
То же	Ледниковый, плотность $\rho = 0,90$		9	70	Там же
	Ледниковый, плотность $\rho = 0,70$		9	40	.

* Более подробные сведения имеются в работах В. П. Берденникова (1948) и Е. М. Линькова (1957).

в последнем случае больше. Объясняется это тем, что при статическом методе исследований деформация образца льда измеряется не в момент приложения нагрузки, а спустя некоторый промежуток времени. Этот промежуток обычно небольшой и измеряется секундами, однако этого достаточно для того, чтобы наряду с упругой деформацией, наступающей непосредственно после приложения нагрузки, произошла ощутимая деформация за счет ползучести льда (главным образом за счет последствий). В итоге определяемый по замеренной суммарной деформации модуль упругости не характеризует сопротивляемость льда мгновенной упругой деформации, а характеризует сопротивляемость льда обратимой деформации за определенный промежуток времени.

Чем больше напряжение, вызываемое нагрузкой, тем более существенную роль играет составляющая деформации за счет ползучести. Если упруго-мгновенную деформацию можно считать прямо пропорциональной величине напряжения, то скорость деформации ползучести возрастает с ростом напряжений значительно интенсивнее, примерно пропорционально квадрату величины напряжения (см. главу IV). Поэтому величина деформации льда, замеряемая через определенный промежуток времени после приложения нагрузки, скажем через 5—10 сек, будет возрастать с увеличением напряжений не в линейной зависимости, а более интенсивно. Вычисляемый на основании замеров деформации модуль упругости соответственно должен уменьшаться с увеличением напряжений. Это подтверждается опытами.

Так, по данным В. Н. Пинегина (1927), модуль упругости речного льда при сжатии (при -3°) уменьшался с увеличением напряжений в следующих размерах:

Напряжения, кг/см^2 . .	1,07—3,75	3,75—6,44	11,80—14,48	17,16—19,84
Модуль упругости, $\times 10^8 \text{ кг/см}^2$. .	37,5	13,7	6,0	3,4

Подобная картина наблюдалась и в наших опытах. Модуль упругости определялся на основании замеров деформации при изгибе ледяных призматических балок

размером $10 \times 10 \times 120$ см. Схематический вид установки и загрузки балок представлен на рис. 9. Опыты были поставлены с целью изучения пластических свойств льда и исследовались главным образом пластические деформации, происходящие в течение длительного времени. Однако попутно измерялись деформации после приложения нагрузки: первый отсчет был сделан через 5—10 сек, затем через 1, 5, 10 и 30 мин и далее через более длительные промежутки времени. Аналогичным образом замерялась деформация после изменения величины нагрузки. Модуль упругости вычислялся на основании первого замера прогиба после приложения или изменения нагрузки по формуле

$$\Delta \bar{z} = \frac{\Delta P}{48EJ} \left[l^3 - \frac{a^2(3l-a)}{2} \right] \approx \frac{22\Delta P}{E}, \quad (2)$$

где ΔP — изменение величины нагрузки на балке, кг;

$\Delta \bar{z}$ — скачок величины прогиба балки, вызванный изменением нагрузки, см;

l, a, J — соответственно, пролет балки, расстояние между грузами и момент инерции поперечного сечения балки.

В табл. 3 приведены результаты одной серии опытов. Одновременно испытывались три балки. Балки 1 и 2 были вырезаны из льда правильной структуры, образовавшегося при спокойном замерзании воды в открытом резервуаре, причем балка 1 испытывалась таким образом, что оси кристаллов имели горизонтальное направление, перпендикулярно к плоскости изгиба ($O \perp l$ и $O \perp l$), а в балке 2 оси кристаллов были направлены вертикально ($O \parallel l$). Балка 3 была вырезана из льда беспорядочной структуры, замороженного из смеси кусков льда, снега и воды. На балки устанавливались определенные грузы, затем балки в течение длительного времени деформировались пластически, после чего грузы снимались. Спустя несколько суток на балки устанавливалась следующая ступень нагрузки. Следует отметить, что уменьшение деформации при снятии грузов примерно соответствовало увеличению деформации при установке грузов, т. е. значения модуля упругости при нагрузке и разгрузке были примерно одинаковы, несмотря на значительные пластические деформации за период между нагрузкой и разгрузкой.

Таблица 3
Изменение модуля упругости льда при изгибе в зависимости от нагрузки

Интервал изменения нагрузки, кг	Температура, °C	Балка 1		Балка 2		Балка 3	
		$E, \times 10^3 \text{ кг/см}^2$	$\Delta \bar{z}, \times 10^{-3} \text{ см}$	$E, \times 10^3 \text{ кг/см}^2$	$\Delta \bar{z}, \times 10^{-3} \text{ см}$	$E, \times 10^3 \text{ кг/см}^2$	$\Delta \bar{z}, \times 10^{-3} \text{ см}$
0—12	3,0	53	5	65	5	65	5
12—0	3,2	65	4	65	5	53	4
0—21	2,9	66	7	57	8	57	8
21—0	2,7	51	9	51	9	46	10
0—30	3,0	51	13	37	18	35	19
30—0	3,1	55	12	32	21	—	—
0—40	2,1	38	23	37	24	44	20
40—0	1,8	33	27	34	26	—	—
0—40	3,9	42	21	40	22	29	30
40—0	3,2	37	24	37	24	40	22

Из приведенных данных видно, что величина модуля упругости определяется в основном размером нагрузки (напряжением), уменьшаясь по мере увеличения последней. Разница же в структуре льда и направлении осей кристаллов относительно действия сил не вызывает существенного различия полученных значений модуля упругости.

По данным В. П. Берденникова (1948), модуль упругости льда зависит от температуры льда, уменьшаясь по мере повышения последней (при -40° $E = 95 \times 10^3 \text{ кг/см}^2$; при -2° $E = 90 \times 10^3 \text{ кг/см}^2$). Соленость льда увеличивает температурную зависимость модуля упругости, причем снижение модуля упругости соленоватых льдов по сравнению с чистым льдом зависит от содержания жидкой фазы в виде ишек рассола.

При частых повторных нагружениях и разгрузках модуль упругости льда возрастает с числом нагружений (Пинегин, 1937; Карташкин, 1947), при этом интенсивность роста модуля замедляется по мере увеличения числа нагружений (табл. 4).

Модуль упругости льда существенно зависит от плотности льда и уменьшается с ее понижением. По данным

Таблица 4

Изменение модуля упругости при повторных загрузках и разгрузках (Карташкин, 1947)

Испытание	Температура, °C	Модуль упругости $E, \times 10^3 \text{ кг/см}^2$				
		E_1^*	E_2	E_3	E_0	E_{20}
Сжатие	3,5	31,5	42,5	—	—	—
Растяжение	6,9	39,9	48,2	49,1	—	—
То же	6	37,4	43,4	41,0	44,0	—
„	6	40,7	—	—	49,2	53,3
Изгиб	8	39,4	43,4	47,6	—	—
То же	6,5	43,2	—	—	45,4	49,0
„	13,5	40,2	45,5	46,4	—	—

* Индекс у E обозначает порядковый номер загрузки, при котором определено значение модуля упругости.

Накая (Nakaya, 1958), модуль упругости льда с плотностью 0,910—0,914 равен $90 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$, при плотности 0,900 он уменьшается до $(70 \div 80) \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$, а при плотности 0,700 снижается до $40 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

На основании обобщения результатов исследований Б. П. Вейнберг (1940) считал, что модуль упругости льда равен $(70 \div 80) \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$. Позднее Б. Д. Карташкин (1947) на основании многочисленных опытов установил, что при сжатии, растяжении и изгибе при температурах от -5 до -16° модуль упругости в среднем равен $40 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$. В то же время В. П. Берденников (1948), определивший модуль акустическим методом, считал, что модуль упругости монолитного льда равен $90 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

Анализируя эти рекомендуемые значения модуля упругости льда, а также упоминаемые выше (табл. 1 и 2) результаты экспериментальных определений, мы пришли к следующим выводам.

1. Модуль упругости льда является в некоторой степени неопределенной величиной, так как выделить его чисто упругую деформацию затруднительно.

Упругими деформациями называются такие деформации тела, которые исчезают после удаления вызвавших их сил, т. е. возвратимые деформации. В теории упруго-

сти считается, что деформация происходит в момент приложения нагрузки и полностью исчезает при ее удалении. У льда же сильно проявляется явление упругого последействия и обратимая часть деформации происходит не сразу после приложения нагрузки, а нарастает в течение некоторого времени. Соответственно, при удалении нагрузки эта часть деформации исчезает также не сразу. Поэтому величина упругой (обратимой) деформации льда зависит, в отличие от деформации упругих тел от периода времени, в течение которого приложена нагрузка. Соответственно будет зависеть от времени и модуль упругости льда, характеризующий зависимость величины деформации от нагрузки.

2. Если под упругой деформацией льда подразумевать лишь ту часть обратимой деформации, которая происходит мгновенно — со скоростью звука — в момент приложения нагрузки, то модуль упругости следует определять лишь на основании динамических методов исследований. В этом случае наиболее достоверной величиной модуля упругости льда будет $E \approx 90\,000 \text{ кг/см}^2$. Этой величиной и рекомендуется пользоваться для расчетов величины упругой деформации льда при динамическом воздействии нагрузок.

3. При более или менее длительном воздействии нагрузок за начальную упругую деформацию иногда целесообразно принимать величину обратимой деформации, возникающую в течение первых секунд после приложения нагрузки, как более реально ощутимую величину. Для расчетов величины такой деформации при сжатии, растяжении или изгибе величину модуля упругости льда можно принимать равной $40\,000 \text{ кг/см}^2$, при этом следует учитывать отмеченную выше зависимость его величины от напряжений и других факторов.

Модуль сдвига

Модуль сдвига характеризует сопротивляемость льда деформации сдвига.

Если из массива деформируемого льда выделить элементарный кубик, то его угловую деформацию γ , в соответствии с теорией упругости, можно выразить формулой

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3)$$

Модуль сдвига льда

Исследователь	Характер льда	Метод исследования	Температура, °C	Модуль сдвига, $\times 10^3 \text{ кг/см}^2$	Литература
Вейнберг Б. П., 1905	Речной	Кручение цилиндра, $\sigma \perp f$	0	10	Вейнберг, 1906
То же	То же	То же	5	16	Там же
•	Ледниковый	Кручение цилиндра	0	8	•
•	То же	То же	5	34	•
Кох, 1914	Озерный	Кручение призмы	—	28—30	Koch, 1914
Матсуура, 1920	Речной	Кручение цилиндра, $\sigma \perp f$	7	2	Вейнберг, 1940
Брокхамп и Мотес, 1930	Ледниковый	Сейсмометрический	около 0	25	Brocham, Mothes, 1930
Эвинг, Крауи и Торн, 1934	Искусственный	Крутильные колебания	5—15	34	Fwing, Craig, Thorne, 1934
Карташкин Б. Л., 1943—1945	Наливной	Кручение цилиндра	4—5	10—11	Карташкин, 1948
То же	То же	То же	11—16	10—21	Там же
Войткевский К. Ф., 1958	Речной	•	10—16	13—18	•
	Искусственный, беспорядочной структуры	Кручение труб	4	12—18	—

где τ — величина касательного напряжения; G — модуль сдвига.

Для определения модуля сдвига так же, как для определения модуля упругости, применяются статический и динамический методы. В качестве статического метода наиболее приемлемым является испытание цилиндрических или призматических образцов льда на кручение, так как в этом случае создаются условия для чистого сдвига.

Некоторые результаты опытов по определению модуля сдвига льда приведены в табл. 5. Причины значительных расхождений полученных величин в основном те же, что и при определении модуля упругости.

Аналогично рекомендуемым значениям модуля упругости предлагается принимать следующие значения модуля сдвига льда:

а) для расчетов упругой деформации при динамическом воздействии нагрузок $G = (30 \div 34) \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

б) для расчетов начальной деформации при длительном воздействии нагрузок (деформации, происходящей в течение первых нескольких секунд после приложения нагрузки) $G = 15 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

Коэффициент Пуассона

Коэффициент поперечной деформации, или коэффициент Пуассона, представляет собою отношение поперечной деформации к продольной деформации образца при приложении к нему продольных сжимающих (или растягивающих) сил и возможности свободного изменения размеров образца в поперечных направлениях.

Коэффициент Пуассона μ при упругой деформации связан с модулем упругости и модулем сдвига зависимостью

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (4)$$

Единственные непосредственные измерения коэффициента Пуассона для льда были произведены В. Н. Пинегиным (1927). На основании анализа результатов этих измерений, сравнения скоростей распространения во льду продольных и поперечных колебаний и сопоставления значений модуля упругости и модуля сдвига по данным

различных исследователей, Б. П. Вейнберг (1940) установил, что наиболее близким к действительности значением коэффициента Пуассона является $\mu = 0,36 \pm 0,13$.

Значительные колебания возможных значений коэффициента Пуассона можно отчасти объяснить тем, что упругая деформация льда происходит совместно с пластической и трудно выделить чисто упругую деформацию. А пластическая деформация характеризуется изменением формы образца льда без изменения его объема и поэтому коэффициент поперечной деформации при пластической деформации равен 0,5. Следовательно при увеличении нагрузки, когда более быстро проявляются пластические деформации, значение коэффициента Пуассона будет в некоторой степени увеличиваться. На величину коэффициента Пуассона оказывает влияние также анизотропия льда.

Б. Д. Карташкин (1947) на основании проведенных им экспериментальных определений величины модулей упругости и сдвига рассчитал, что коэффициент Пуассона для льда в интервале температуры от -5 до -16° в среднем равен 0,34.

Б. А. Савельев (1953) рекомендует принимать для расчетов значение коэффициента Пуассона равным 0,36.

Глава IV

ПОЛЗУЧЕСТЬ ЛЬДА

Ползучестью принято называть медленно и непрерывно растущую во времени деформацию материала, происходящую под действием постоянных по величине усилий или напряжений. У льда деформация ползучести представляет собою необратимую (пластическую) деформацию, которую часто принимают за медленную текучесть льда.

Процесс ползучести связан с непрерывным изменением формы тела без изменения его объема и возникает только при наличии напряжений сдвига, так как при равномерном всестороннем (гидростатическом) сжатии происходит лишь уплотнение. Поэтому основные закономерности ползучести приводятся вначале для случая чистого сдвига.

Ползучесть при чистом сдвиге

Характер кривых ползучести поликристаллического льда показан на рис. 14. Во всех случаях в момент приложения сдвигающего усилия происходит упругая деформация $\gamma_{упр}$ и начинается деформация ползучести $\gamma_{полз}$, скорость которой в начальный период постепенно уменьшается до некоторой величины, зависящей от величины напряжений сдвига.

При малых напряжениях после этого устанавливается постоянная скорость ползучести — стадия установившейся ползучести, которая может продолжаться неопределенно длительное время (конечно, при постоянных напря-

жениях, температуре и условиях деформирования и в пределах, когда можно пренебречь изменением структуры и ориентировки кристаллов льда). С увеличением напряжений скорость установившейся ползучести растет и, соответственно, появляются возможности для более быстрого изменения структуры льда, которое может способствовать

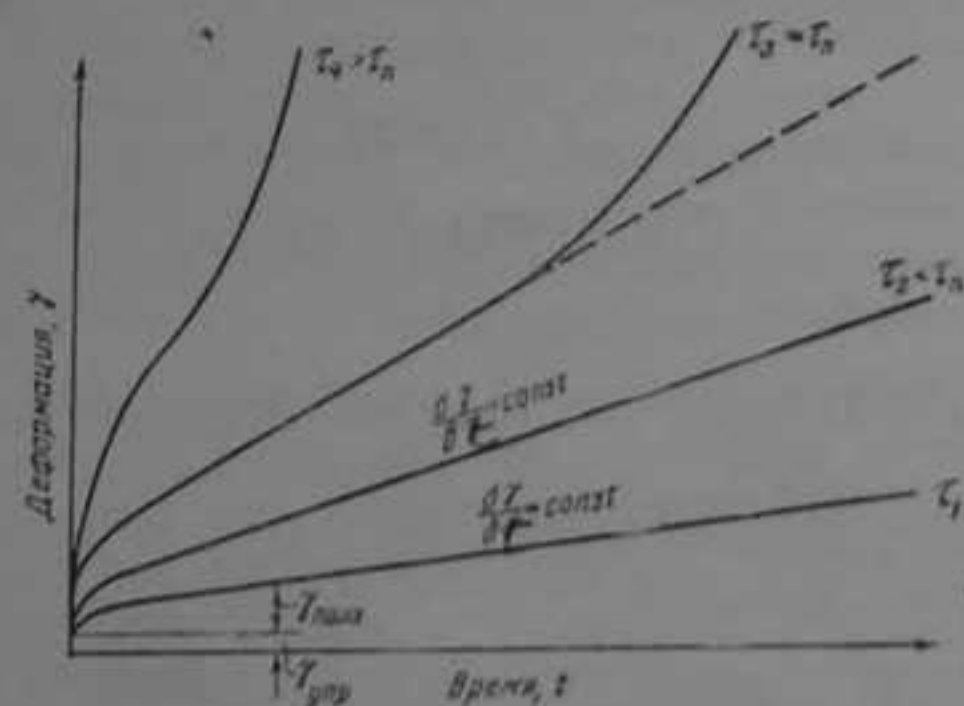


Рис. 14. Кривые ползучести льда (τ_n — предел длительной ползучести)

изменению скорости деформирования. Поэтому при повышении напряжений стадия установившейся ползучести становится ограниченной во времени и переходит в стадию ускоряющейся ползучести. Чем больше напряжение, тем короче участок установившейся ползучести и тем быстрее наступает ускоряющаяся ползучесть. Наконец, когда напряжения превышают некоторый предел, отчетливый участок установившейся ползучести исчезает.

В этом случае вслед за плавным уменьшением скорости ползучести в начальный период до некоторой минимальной скорости начинается постепенное увеличение скорости ползучести, переходящее в прогрессирующее течение, причем оно наступает тем быстрее, чем больше напряжение.

О справедливости отмеченных выше общих закономерностей ползучести льда можно судить по приведенным на рис. 15 экспериментальным кривым ползучести, получен-

ным при длительных опытах по кручению цилиндрических образцов льда (Войтковский, 1957). Для опытов применялись ледяные трубы длиной 800 мм с наружным диаметром 120 мм и внутренним 78 мм из искусственно намороженного поликристаллического льда. При кручении во всех поперечных сечениях труб сохранялись достаточно

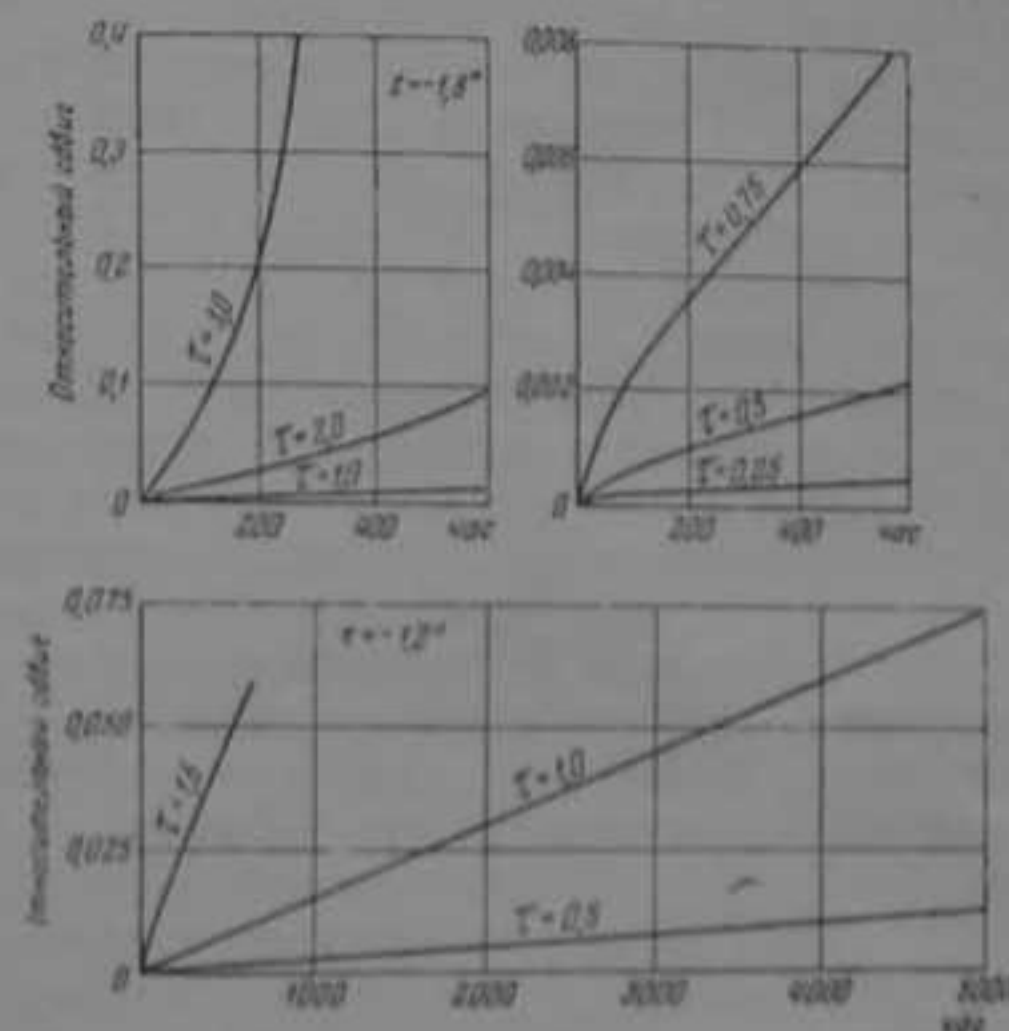


Рис. 15. Кривые ползучести поликристаллического льда при чистом сдвиге при температуре $-1,2$ и $-1,8^\circ$ (τ — касательное напряжение, кг/см^2)

однородные напряжения, что позволило по угловой деформации труб вычислить величину деформации относительного сдвига и установить количественную зависимость величины и скорости этого сдвига от величины касательных напряжений. Опыты проводились при постоянной температуре и были достаточно продолжительными. Как видно, при напряжениях меньше 2 кг/см^2 во всех случаях спустя 50—100 час после приложения нагрузки устанавливалась примерно постоянная скорость ползучести. Отдельные опыты продолжались до 5000 час, и даже после такого длительного промежутка времени не наблюдалось тенденции к увеличению скорости ползучести.

При напряжении 2 кг/см^2 после 70 час установилась постоянная скорость ползучести, а после 200 час (при температуре $-1,8^\circ$) началось постепенное увеличение этой скорости. При напряжении 3 кг/см^2 отчетливо выраженного прямолинейного участка совсем не наблюдалось. В течение начальных 30 час скорость ползучести постепенно уменьшалась, а затем начала увеличиваться.

Напряжение, при превышении которого исчезает возможность длительной ползучести с постоянной скоростью, автор в целях удобства некоторых последующих выводов назвал пределом длительной ползучести τ_n . Попутно следует оговориться, что указанный предел является в некоторой степени условной величиной, так как нет четкой границы напряжений, разграничивающей условия, создающие возможность для длительной установившейся ползучести, с одной стороны, и для перехода в стадию ускоряющейся ползучести без стадии установившейся ползучести — с другой. В некотором диапазоне напряжений наблюдается довольно длительная стадия установившейся ползучести, которая затем переходит в ускоряющуюся ползучесть. Кроме того, даже при отсутствии стадии установившейся ползучести при переходе от начальной стадии замедляющейся ползучести к стадии прогрессирующего течения (что на рис. 14 характеризуется перегибом кривой τ_n) имеется участок, где скорость ползучести меняется сравнительно мало и который при кратковременных опытах иногда ошибочно принимается за установившуюся ползучесть.

В связи с этим за предел длительной ползучести предлагается принимать напряжение, при котором имеется отчетливо выраженная стадия установившейся ползучести, продолжающаяся не менее длительности начальной стадии — замедляющейся ползучести (порядка 100 час), т. е. когда тенденция к увеличению скорости ползучести может появиться не ранее, чем через 200 час от начала деформирования (при постоянных напряжениях и температуре).

По данным опытов автора, предел длительной ползучести τ_n льда оказался: при температуре $-1,2^\circ$ равным $\approx 1,6 \text{ кг/см}^2$ (Войтковский, 1957); при $-1,8^\circ$ равным $\approx 2 \text{ кг/см}^2$ (см. кривую ползучести для $\tau = 2 \text{ кг/см}^2$ на рис. 15); при -4° предел равен 3 кг/см^2 (рис. 16).

Характер изменения скорости установившейся ползучести в зависимости от величины напряжения показан на рис. 16. Значения скоростей сдвига здесь взяты на основании экспериментальных работ автора по кручению ледяных труб при ступенчатом возрастании напряжений; для

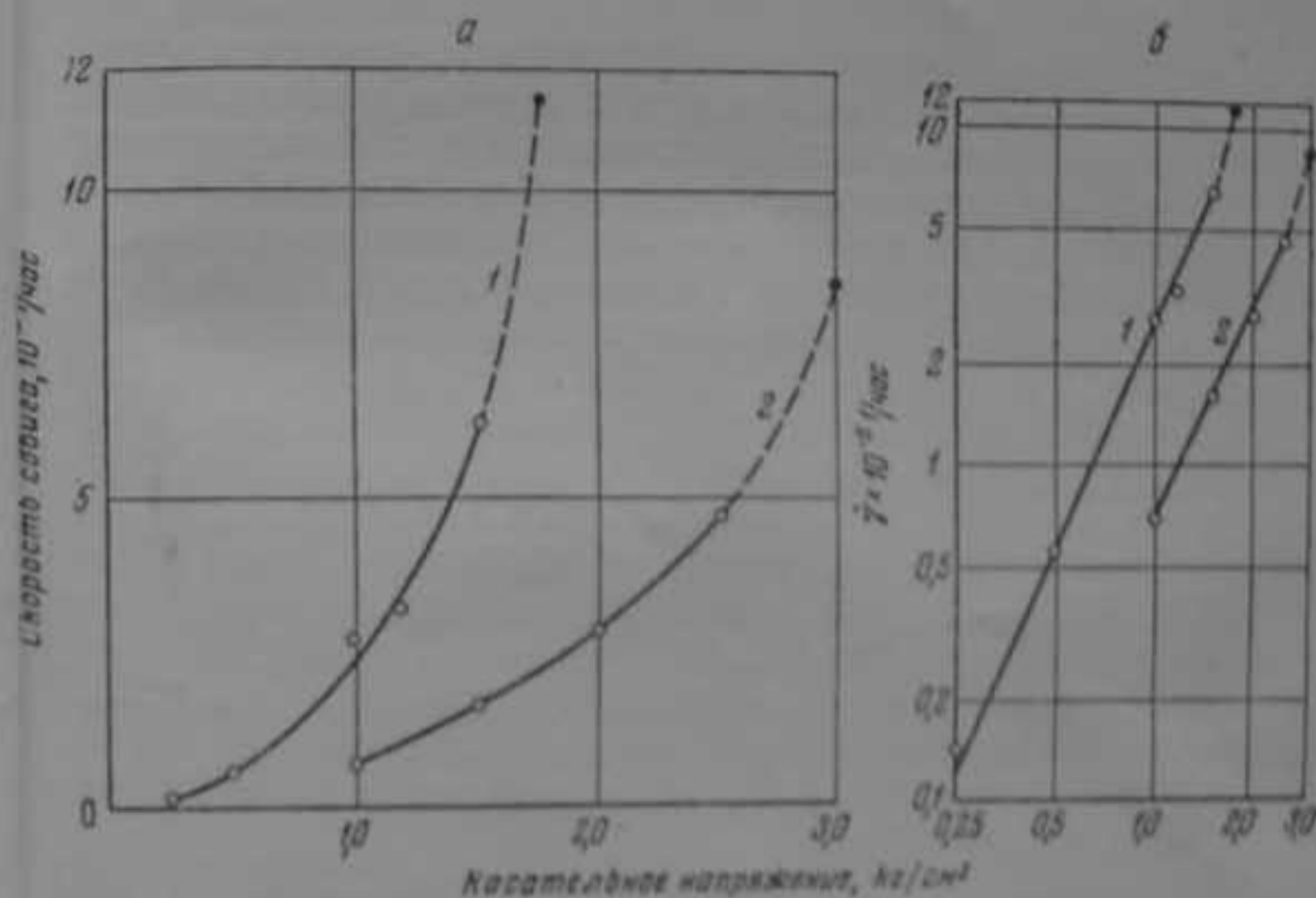


Рис. 16. Изменение установившейся скорости сдвига в зависимости от касательного напряжения.

а — график в обычных координатах; б — тот же, в логарифмических координатах; 1 — при $t = -1,2^\circ$, 2 — при $t = -4^\circ$; крестиками отмечены точки, соответствующие минимальной скорости сдвига при напряжениях, превышающих предел длительной ползучести, когда длительная стадия установившейся ползучести отсутствовала.

кривой 1 — из ранее опубликованной работы (Войтковский, 1957); для кривой 2 — из помещенной далее табл. 6 (труба 5). На рис. 16, а, где экспериментальные данные нанесены против соответствующих значений касательных напряжений, видно, что при малых напряжениях и скорости сдвига мала. С увеличением напряжений увеличивается и скорость сдвига, сначала плавно, а затем довольно резко. При нанесении этих данных на двойную логарифмическую сетку (рис. 16, б) точки довольно хорошо

ложатся на прямые линии. Это значит, что зависимость между установившейся скоростью сдвига $\dot{\gamma}_{\infty}$ и величиной касательного напряжения при постоянной температуре может быть выражена уравнением

$$\dot{\gamma}_{\infty} = k_0 \tau^n, \quad (5)$$

где k_0 и n — постоянные коэффициенты (в данном случае $n = 2 \div 2,2$, в других опытах автора значение этого коэффициента для льда беспорядочной структуры изменялось от 1,6 до 2,2).

Впервые для льда такое уравнение было предложено в 1952 г. Герардом, Перутом и Роком (Gerard, Perutz, Roch, 1952) на основании результатов измерений распределения скоростей течения по вертикали в одном из ледников. При этом приводились следующие значения постоянных коэффициентов: $n = 1,5$ и $k_0 = 10^{-8}$, если напряжение измеряется в барах, $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига в секунду.

Аналогичное уравнение было применено Гленом (Glen, 1952, 1955), который установил, что при одностороннем сжатии цилиндрических образцов мелкозернистого поликристаллического льда отношение между наблюдаемой во время опыта минимальной скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ и величиной давления τ (в пределах от 1 до 10 кг/см²) выражается формулой

$$\dot{\epsilon} = k \tau^n, \quad (6)$$

где $n = 3,2 \div 4$.

Полученные Гленом значения коэффициента n в последнее время часто упоминаются в литературе по гляциологии, однако надо иметь в виду, что для характеристики длительной установившейся ползучести льда они непригодны, будучи значительно завышенными. Дело в том, что в большинстве опытов Глена напряжения превышали предел длительной ползучести и стадия установившейся ползучести отсутствовала, а Глен сопоставлял минимальные скорости деформации независимо от характера кривых ползучести.

Если при малых напряжениях минимальная скорость соответствует скорости установившейся ползучести, то для напряжений, превышающих предел длительной ползучести, она лишь характеризует переход от замедляющейся ползучести в начальный период действия напряжения к прогрессирующему течению. Поэтому сомнительно

чтобы законы изменения минимальной скорости ползучести оставались одинаковыми в обоих случаях.

В этом можно убедиться, рассматривая на рис. 16 логарифмическую зависимость скорости сдвига от напряжений, где видна тенденция загиба вверх прямых линий при напряжениях около предела длительной ползучести, что указывает на увеличение значения коэффициента n при этих напряжениях. Это же следует и из сравнения экспериментальных кривых ползучести, приведенных на рис. 15. Так, если сравнить скорость установившейся ползучести при $\tau = 1,0$ кг/см² ($\dot{\gamma} \approx 1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/час) с минимальной скоростью ползучести при $\tau = 3$ кг/см² ($\dot{\gamma} \approx 50 \times 10^{-5}$ 1/час), то получится, что при увеличении напряжения в три раза минимальная скорость сдвига увеличилась более тридцати раз, т. е. примерно пропорционально величине напряжения в кубе, что соответствует определенному Гленом значению коэффициента n .

С учетом температуры зависимость установившейся скорости ползучести поликристаллического льда при чистом сдвиге от величины касательных напряжений выражается уравнением (Войтковский, 1957)

$$\dot{\gamma}_{\infty} = \frac{K}{1 + \theta} \tau^n, \quad (7)$$

где θ — температура льда (в °С без знака минус);

K и n — коэффициенты, зависящие от структуры льда (для льда беспорядочной структуры $n = 1,6 \div 2,2$ и

$$K = (1,6 \div 4) \times 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{град/кг}^n \cdot \text{час.} \quad \text{11}$$

Последнее уравнение получается из зависимости скорости деформации от температуры, если в нее взамен $\dot{\gamma}$ подставить значение $\dot{\gamma}_{\infty}$ по формуле (5) и принять $K = (1 + \theta_0) k_0$.

Наращение величины деформации в процессе ползучести с учетом начальной стадии может быть выражено эмпирической формулой (Войтковский, 1957)

$$\gamma_t = \gamma_{\text{упр}} + \dot{\gamma}_{\infty} t + \dot{\gamma}_{\infty} t_0 \left[1 - \frac{1}{(1 + \alpha t)^{\alpha}} \right], \quad (8)$$

где γ_t — общая деформация через любой промежуток времени t (часов) после приложения усилий (начала действия напряжений сдвига);

$\gamma_{упр}$ — упругая деформация;
 t — время от момента приложения нагрузки, час;
 t_0, a, m — эмпирические коэффициенты (в описанных опытах имели следующие значения: $t_0 = 30 \div 100$ час; $a \approx 0,5$; $m = 0,5 \div 1$).

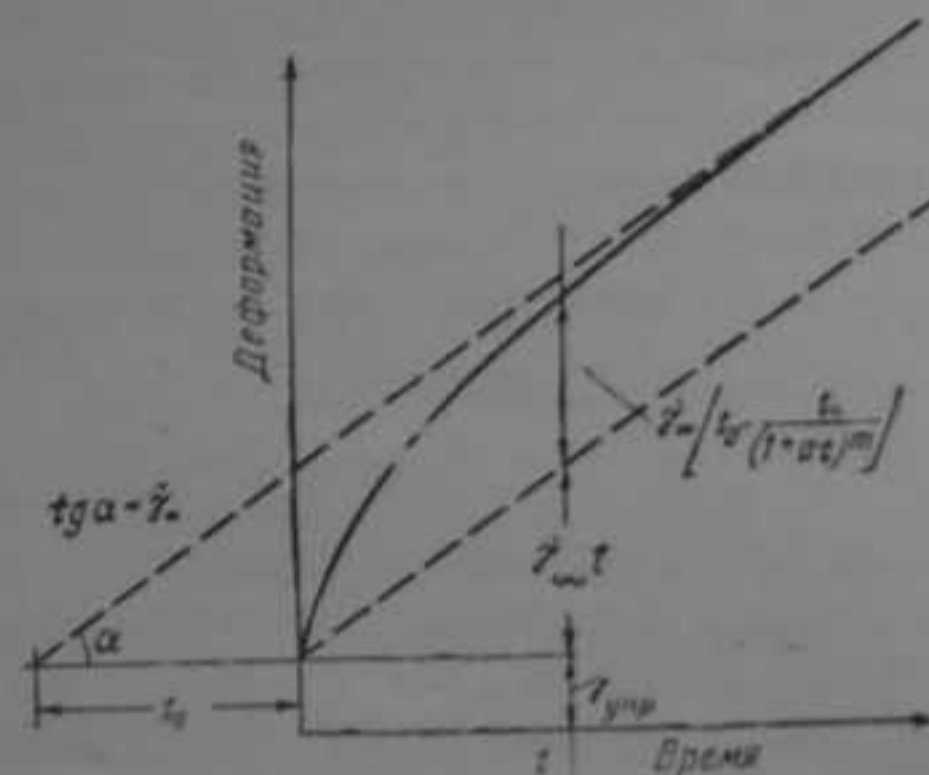


Рис. 17. Схема условного разделения общей деформации в соответствии с формулой (8).

В этой формуле общая деформация выражена как сумма упругой деформации и деформации ползучести, причем последняя условно разделена на две части: установившуюся ползучесть (второй член) и неуставившуюся (третий член). Схема разделения общей деформации на указанные составные части показана на рис. 17. Скорость ползучести в начальный период после затружения может быть выражена как производная по времени от уравнения (8).

$$\dot{\gamma}_n = \dot{\gamma}_{уст} \left[1 + \frac{a m t_0}{(1 + at)^{m+1}} \right]. \quad (9)$$

При напряжениях сдвига, превышающих предел длительной ползучести, установить количественную зависимость скорости ползучести от величины напряжения и времени до сих пор не удается ввиду того, что в этих условиях скорость ползучести является переменной величиной и может меняться в очень большом диапазоне и зависи-

мости от условий деформирования, структуры льда и других факторов.

В ряде случаев желательно знать изменение сопротивления льда сдвигу во времени при заданной постоянной

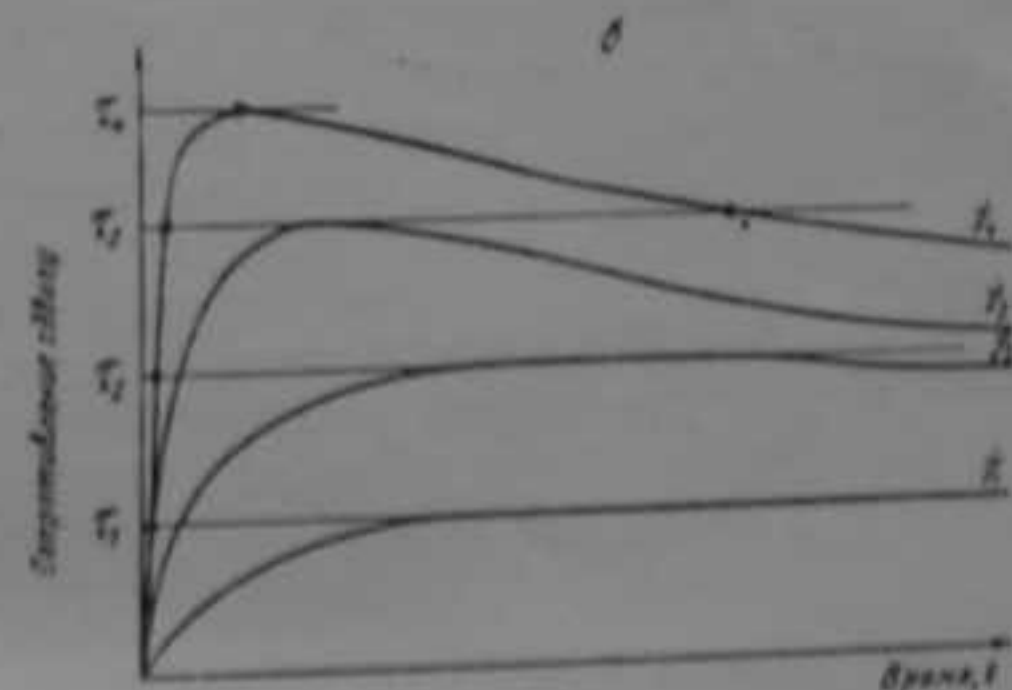
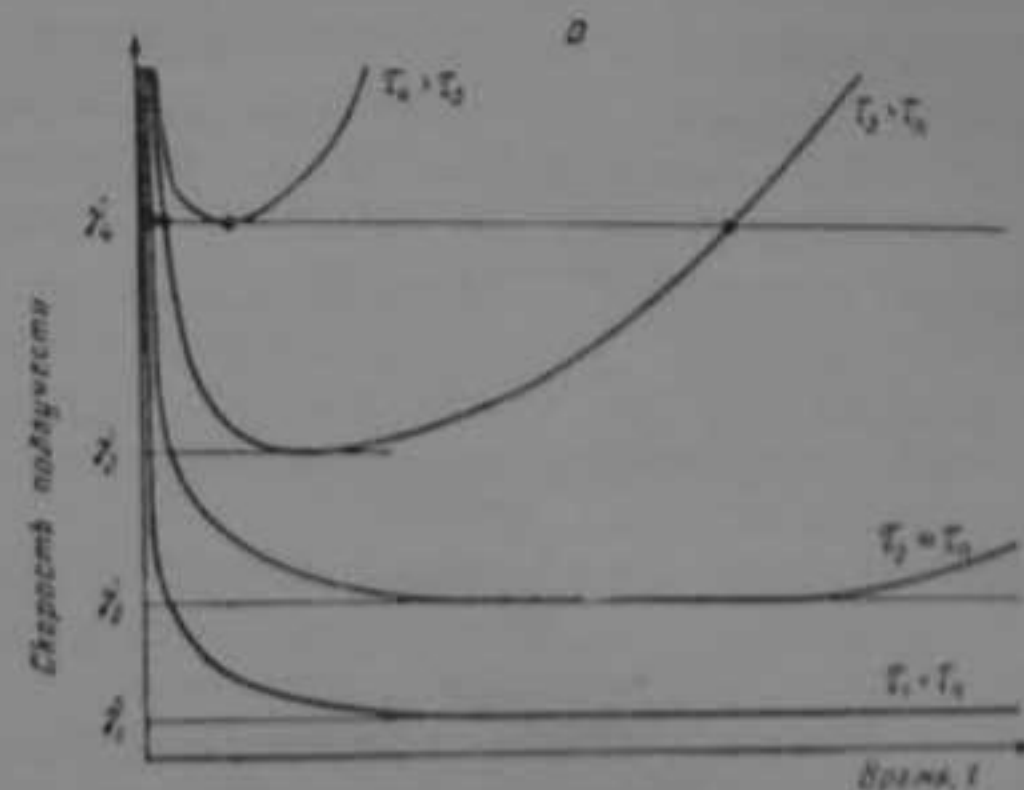


Рис. 18. Схемы изменения скорости ползучести льда при постоянном напряжении (а) и изменении величины сопротивления при постоянных скоростях сдвига (б)

тельности деформации. Непосредственных замеров сопротивления при малых скоростях деформации, не вызывающих разрушения льда, до настоящего времени не производилось. Однако некоторое представление о характере изменения сопротивления можно составить, анализируя кри-

вые ползучести льда. Закономерности изменения скорости ползучести льда во времени при различных постоянных напряжениях, исходя из экспериментальных кривых ползучести (см. рис. 15), имеют вид, представленный на рис. 18а. Если на этой схеме провести горизонтальную линию, соответствующую определенной скорости ползучести, например $\dot{\gamma}_4$, то значения τ в точках пересечения этой линии с кривыми $\dot{\gamma}_{\tau=\text{const}} = \dot{\gamma}(t)$ могут с некоторыми допущениями рассматриваться как величины сопротивления при постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma}_4$. Откладывая эти значения сопротивления на графике против соответствующих моментов времени (см. рис. 18, б), получим кривые изменения величины сопротивления льда во времени при постоянной скорости деформации.

Как видно из приведенной схемы, характер изменения величины сопротивления будет зависеть от заданной скорости деформации. При малой скорости сдвига сопротивление будет плавно увеличиваться до некоторой величины, которая может быть определена из уравнения (7), после чего сопротивление будет оставаться постоянным. Если скорость сдвига будет соответствовать скорости установившейся ползучести при напряжении, близком к пределу длительной ползучести τ_n , то вслед за промежутком постоянного сопротивления может произойти некоторое его уменьшение, связанное с постепенным изменением структуры льда. При скоростях сдвига, превышающих возможную скорость длительной установившейся ползучести, величина сопротивления после достижения максимального значения будет постепенно уменьшаться до величины, близкой к пределу длительной ползучести.

Влияние температуры

С повышением температуры скорость ползучести увеличивается. Эта зависимость особенно сильно проявляется при температуре, близкой к 0° . На основании экспериментальных данных Ройен (Royer, 1922) выразил зависимость величины пластической деформации льда (при сжатии) от температуры эмпирической формулой

$$\varepsilon = \frac{B}{1+\theta} \quad (10)$$

где θ — температура льда без знака минус; B — постоянный коэффициент, различный для каждого частного случая.

Опыты по изгибу ледяных балок и кручению труб (Войтковский, 1956, 1957) показали, что изменение величины скорости установившейся ползучести при заданных условиях деформирования (напряжениях) от температуры в интервале от -1 до -40° выражается эмпирической формулой, аналогичной формуле (10) Ройена,

$$\dot{\gamma}_\theta = \frac{(1+\theta_0)\dot{\gamma}_0}{1+\theta} \quad (11)$$

где $\dot{\gamma}_0$ — экспериментально определенная скорость установившейся ползучести при какой-либо температуре θ_0 ;

$\dot{\gamma}_0$ — скорость установившейся ползучести при любой температуре θ .

Эта формула приемлема как для случаев чистого сдвига, так и для других видов деформирования (сжатие, растяжение, изгиб, деформирование при сложном напряженном состоянии), если только имеется стадия установившейся скорости ползучести и при изменении температуры величина напряжений во всех точках остается неизменной, т. е. изменение температуры не вызывает перераспределения внутренних напряжений.

На рис. 19 приведены результаты одного из опытов по выявлению влияния температуры. Опыт заключался в том, что на балку размером $10 \times 10 \times 120$ см из льда беспорядочной структуры были установлены грузы (схему установки и загрузки балки см. на рис. 9), после чего производились систематические замеры величины прогиба, которые давали возможность определять скорость прогиба балки. Температура в помещении, где производился опыт, выдерживалась примерно постоянной в течение времени, необходимого для установления постоянной скорости прогиба, после чего она изменялась и снова определялась установившаяся скорость прогиба. Температура изменялась в диапазоне от -1 до -40° . На рис. 19 точками обозначены экспериментально определенные скорости прогиба балки при соответствующих температурах. Как видно, эти точки во всем исследуемом диапазоне достаточно удовлетворительно совпадают с пунктирной линией, которая изображает графически зависимость скорости ползучести от температуры согласно

формуле (11), если принять, что при $-3,5^\circ$ ($\theta = 3,5$) $\gamma_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ см/час.

Рассмотренная зависимость скорости установившейся ползучести от температуры может быть применена также для выражения влияния температуры на величину

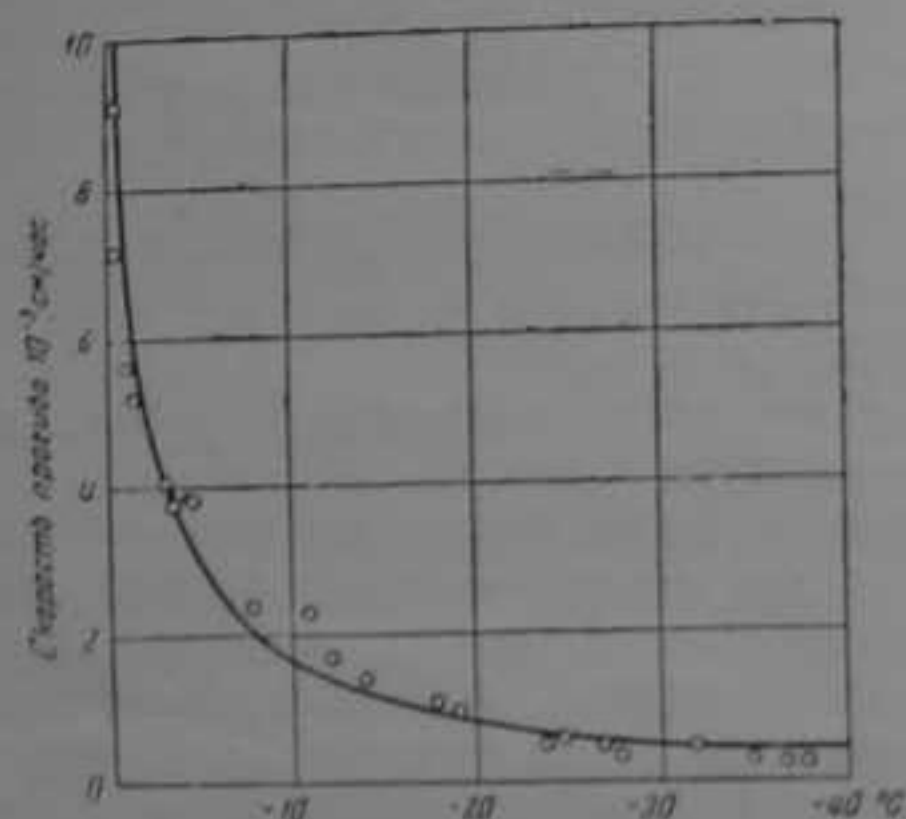


Рис. 19. Скорость прогиба ледяной балки в зависимости от температуры (под действием собственного веса и дополнительной нагрузки $Q=40$ кг)

пластической деформации за определенный промежуток времени в начальный период после приложения нагрузки, что вытекает из анализа формулы (8). При этом следует отметить, что она полностью приемлема только в случае, когда напряжения не превышают предела длительной ползучести. При больших же напряжениях температурная зависимость может иметь более сложный вид, так как сам предел длительной ползучести зависит от температуры; кроме того, скорость ползучести, как указывалось выше, в этих условиях является переменной и зависит от многих факторов.

Некоторыми исследователями были предложены другие уравнения зависимости скорости ползучести льда от температуры, но эти уравнения не были надлежащим образом подтверждены экспериментальными данными. Так, Глен (Glen, 1955) принял для выражения зависимости

скорости относительного сжатия $\dot{\epsilon}$ от абсолютной температуры льда T уравнение

$$\dot{\epsilon} = A e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (12)$$

где A — постоянный коэффициент; R — газовая постоянная; Q — энергия активации.

О возможности применения аналогичного уравнения для выражения зависимости вязкости льда от температуры ранее высказывался А. Р. Шульман (1948). Позднее такое уравнение применили Еллинек и Брилл (Jellinek, Brill, 1956). Однако полученные автором экспериментальные данные показывают, что указанное уравнение (12) не отображает фактически имеющего место резкого увеличения скорости ползучести при повышении температуры выше -5 , -3° ; поэтому пользоваться им не рекомендуется.

Ползучесть при одновременном действии нормальных и касательных напряжений (при сложном напряженном состоянии)

Равномерное всестороннее давление не оказывает существенного влияния на характер и скорость ползучести. Ригсби (Rigsby, 1958), проводивший опыты по сдвигу кристаллов льда при давлениях до 306 атм, установил, что скорость деформации сдвига практически не зависит от давления, если разница между температурой льда и температурой таяния, изменяющейся в зависимости от давления, сохраняется постоянной. При постоянной температуре деформируемого льда скорость деформации сдвига с повышением давления в некоторой степени увеличивается, однако это увеличение становится существенным лишь при весьма значительных давлениях. Так, при давлении в 306 атм скорость сдвига увеличивалась примерно в два раза. Следовательно, всестороннее (гидростатическое) давление сказывается главным образом лишь в том, что оно понижает температуру плавления льда, и его влияние на скорость ползучести равноценно эффекту соответственного повышения температуры льда во время его деформирования.

Неравномерное или одностороннее давление, в отличие от гидростатического, оказывает существенное влия-

ние на скорость ползучести. Для количественной оценки этого влияния автором были проведены длительные опыты по одновременному скручиванию и продольному сжатию труб из льда с беспорядочной ориентировкой кристаллов. Во время опыта во всех поперечных сечениях ледяной трубы создавались достаточно равномерно распределенные и одинаковые по величине нормальные и касательные напряжения, что облегчало определение относительных угловых и продольных деформаций. Величины крутящего момента и продольного усилия выбирались с таким расчетом, чтобы проследить влияние нормальных напряжений на ползучесть при заданных постоянных значениях напряжений сдвига.

Всего было испытано шесть ледяных труб. Для каждой из них создавались различные комбинации одновременного действия нормальных и касательных напряжений (нормальные от 0 до 5 кг/см² и касательные от 0,75 до 2,5 кг/см²). Каждая ступень нагрузки выдерживалась не менее 200 час, чтобы была возможность определить скорость установившейся ползучести.

Порядок изменения величины напряжений и характер кривой ползучести для одного из опытов показаны на рис. 20. Результаты остальных опытов приведены в табл. 6. Как видно из рис. 20, при всех комбинациях напряжений, кроме случая повышения предела длительной ползучести, устанавливалась постоянная скорость ползучести. При этом отмечается, что скорость сдвига не определяется однозначно величиной касательных напряжений, но зависит также от величины нормальных напряжений, действующих в плоскости сдвига, увеличиваясь с ростом последних. Аналогичным образом скорость продольного сжатия при постоянном сжимающем напряжении увеличивалась с увеличением касательных напряжений в плоскостях, перпендикулярных направлению сжатия. Таким образом, установившаяся скорость ползучести при сложном напряженном состоянии является функцией как касательных, так и нормальных напряжений.

Анализ экспериментальных данных показал, что установившуюся ползучесть поликристаллического льда при сложном напряженном состоянии можно выразить при помощи уравнений теории пластического течения (Соколовский, 1950), принимая, что интенсивность скоростей

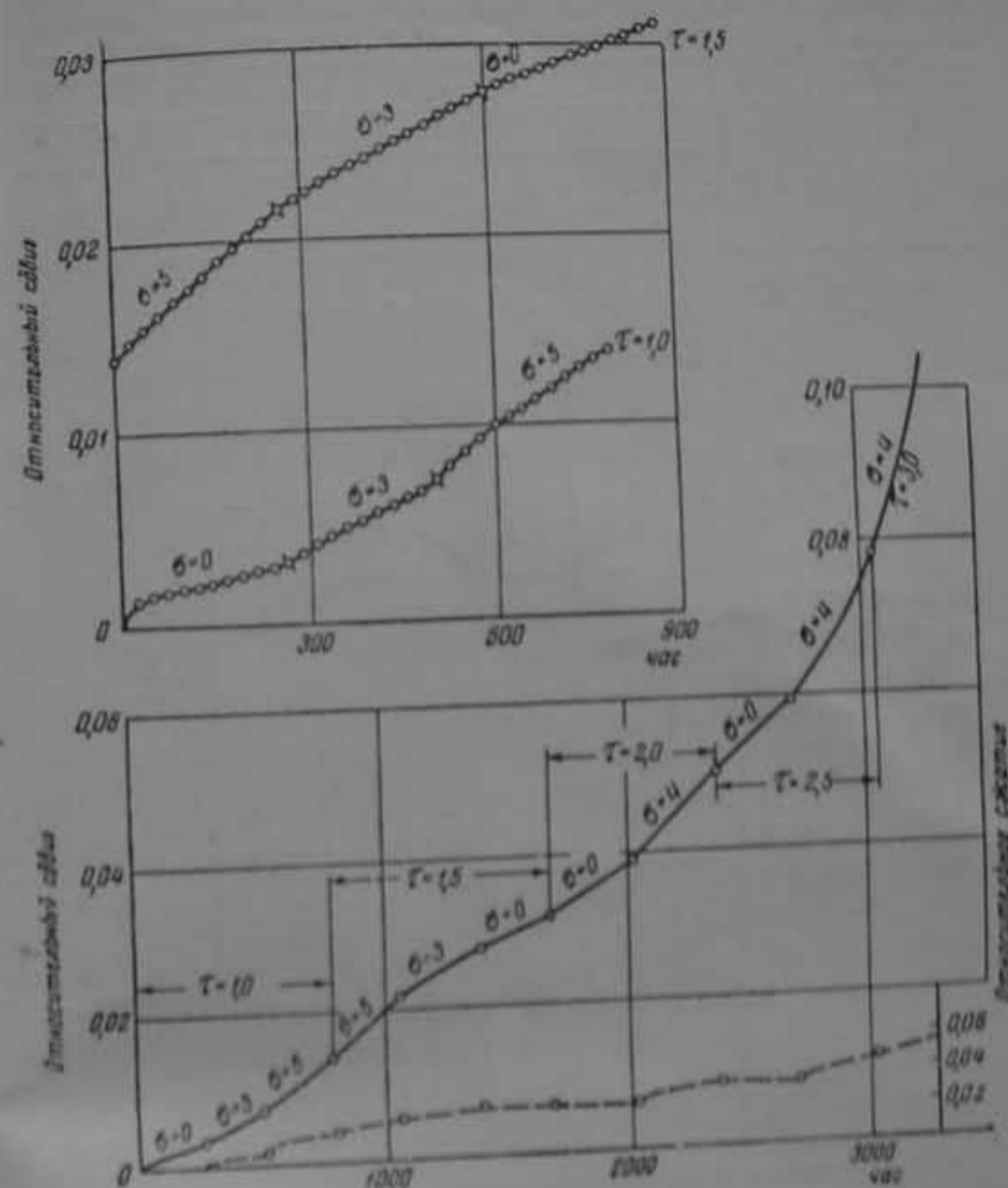


Рис. 20. Ползучесть льда при одновременном действии нормальных и касательных напряжений при температуре -3.8° : сплошная линия — изменение относительного сдвига; пунктирная линия — изменение относительного сжатия; σ — нормальное напряжение, кг/см²; τ — касательное напряжение, кг/см².

Таблица 6

Установившиеся скорости угловой деформации льда $\dot{\gamma}_{\infty}$ (°/час) при одновременном действии нормальных и сдвигающих напряжений (для трубы 1 при температуре $-1,2^{\circ}$, для остальных при -4°)

Напряжения, кг/см ²			Номер трубы**									
τ	σ	S^*	1			2	3	4	5	6		
			$\dot{\gamma}_{\infty}$	$R_{\text{факт}}$	$R_{\text{теор}}$	$\dot{\gamma}_{\infty}$	$\dot{\gamma}_{\infty}$	$\dot{\gamma}_{\infty}$	$\dot{\gamma}_{\infty}$	$\dot{\gamma}_{\infty}$	$R_{\text{факт}}$	$R_{\text{теор}}$
0,75	0	0,75	12	1,0	1,0	—	—	—	—	—	—	—
0,75	1,0	0,9	15	1,2	1,2	—	—	—	—	—	—	—
0,75	1,5	1,1	17	1,4	1,5	—	—	—	—	—	—	—
0,75	2,0	1,4	22	1,8	1,9	—	—	—	—	—	—	—
1,0	0	0	22	1,0	1,0	—	8	—	7	6	1,0	1,0
1,0	1,5	1,3	26	1,2	1,3	—	—	—	—	—	—	—
1,0	2,0	1,5	31	1,4	1,5	—	14	—	—	—	—	—
1,0	3,0	2,0	—	—	—	—	—	—	13	13	2,1	2,0
1,0	5,0	3,0	—	—	—	—	—	—	—	19	3,1	3,0
1,5	0	1,5	—	—	—	11	17	10	16	12	1,0	1,0
1,5	1,0	1,6	—	—	—	12	—	—	—	—	—	—
1,5	2,0	1,9	—	—	—	14	23	12	—	—	—	—
1,5	3,0	2,3	—	—	—	—	—	—	24	18	1,5	1,5
1,5	5,0	3,3	—	—	—	—	—	—	—	26	2,2	2,2
2,0	0	2,0	—	—	—	20	—	—	28	20	1,0	1,0
2,0	2,0	2,3	—	—	—	22	—	—	—	—	—	—
2,0	3,0	2,6	—	—	—	—	—	—	38	—	—	—
2,0	4,0	3,1	—	—	—	—	—	—	—	30	1,5	1,5
2,5	0	2,5	—	—	—	—	—	—	47	29	—	—
2,5	3,0	3,0	—	—	—	—	—	—	60	—	—	—
2,5	4,0	3,4	—	—	—	—	—	—	—	52**	—	—
3,0	0	3,0	—	—	—	—	—	—	85**	—	—	—

* При кручении и продольном сжатии труб согласно формуле (13)

$$S = \sqrt{\frac{\sigma^2}{3} + \tau^2}$$

** $\dot{\gamma}_{\infty}$ — минимальные скорости сдвига при отсутствии длительной стадии установившейся ползучести; $R_{\text{факт}}$ — фактическое относительное увеличение скорости сдвига за счет нормальных напряжений $R_{\text{факт}} = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}(\sigma=0)}$; $R_{\text{теор}}$ — то же отношение, вычисленное теоретически в соответствии с формулой (16) при $n \approx 2$ $R_{\text{теор}} = \frac{S}{\tau}$.

деформации сдвига льда L является определенной функцией интенсивности касательных напряжений S :

$$L = f(S), \quad (13)$$

где $L = \sqrt{\frac{2}{3}[(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2] + \dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2}$

$$S = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$$

Здесь принято, что напряженное состояние в любой точке тела характеризуется компонентами напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$, а скорости деформации — шестью компонентами скоростей деформации в тех же осях $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{zx}$.

Для случая чистого сдвига, когда $L = \gamma$ и $S = \tau$ эта зависимость в соответствии с уравнением (7) должна иметь вид

$$L = \frac{K}{1+\theta} S^n, \quad (14)$$

Исходя из общепринятой гипотезы о пропорциональности главных скоростей сдвигов главным касательным напряжениям, отношение девиатора скоростей деформации $D_{\dot{\epsilon}}$ к девиатору напряжений D_{σ} должно быть пропорционально отношению интенсивности скоростей деформации сдвига к интенсивности касательных напряжений.

$$\frac{D_{\dot{\epsilon}}}{D_{\sigma}} = \frac{L}{2S}, \quad (15)$$

$$\text{где } D_{\dot{\epsilon}} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_x & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yx} & \dot{\epsilon}_y & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zx} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zy} & \dot{\epsilon}_z \end{vmatrix};$$

$$D_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_{\text{ср}} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{\text{ср}} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_{\text{ср}} \end{vmatrix},$$

Подставляя в это уравнение значение L из (14), получаем обобщенную зависимость скорости установившейся

ползучести льда при сложном напряженном состоянии от температуры и напряжений в виде:

$$D_k = \frac{K S^{n-1}}{1+n} \frac{D_z}{2}; \quad (16)$$

$$\dot{\epsilon}_{x(y,z)} = \frac{K S^{n-1}}{1+n} \frac{\sigma_x(y,z) - \sigma_{cp}}{2};$$

$$\dot{\epsilon}_{xy(yz, zx)} = \frac{K S^{n-1}}{1+n} \tau_{xy(yz, zx)}.$$

В табл. 6 приведены фактические, а также вычисленные на основании формул (16) значения относительно-го увеличения скорости сдвига за счет нормальных напряжений. Сопоставление этих цифр указывает на соответствие опытных данных предположений обобщенной зависимости скорости ползучести от напряжений и температуры.

На рис. 21 для наглядности результаты определения установившейся скорости сдвига $\dot{\gamma}_u$ для трубы 6 нанесены на двойную логарифмическую сетку против соответствующих значений интенсивности касательных напряжений. Пунктирная линия здесь характеризует зависимость скорости сдвига от величины касательных напряжений при чистом сдвиге, а тангенс угла наклона этой линии — величину коэффициента n в формуле (7). Сплошными линиями соединены точки, отображающие скорости сдвига при одинаковых величинах касательного напряжения, но при различных величинах нормального напряжения. Точки ложатся на прямые линии, тангенсы угла наклона которых примерно на единицу меньше тангенса угла наклона пунктирной линии. Это значит, что между скоростью сдвига и интенсивностью напряжений при постоянных касательных напряжениях в плоскости сдвига существует степенная зависимость вида $\dot{\gamma}_u = a S^{n-1}$, которая соответствует формуле (16).

Применяя зависимость (16), можно вычислить скорость установившейся ползучести льда при различных видах деформирования: растяжении, изгибе, сжатии и при более сложных способах деформирования. В свою очередь, сопоставляя фактически наблюдаемые скорости ползучести с соответствующими расчетными формулами, можно определить коэффициенты K и n , характеризую-

щие ползучесть льда. Так, на основании аналитических расчетов скорости прогиба ледяных балок, исходя из зависимости (16) и экспериментальных данных по изгибу

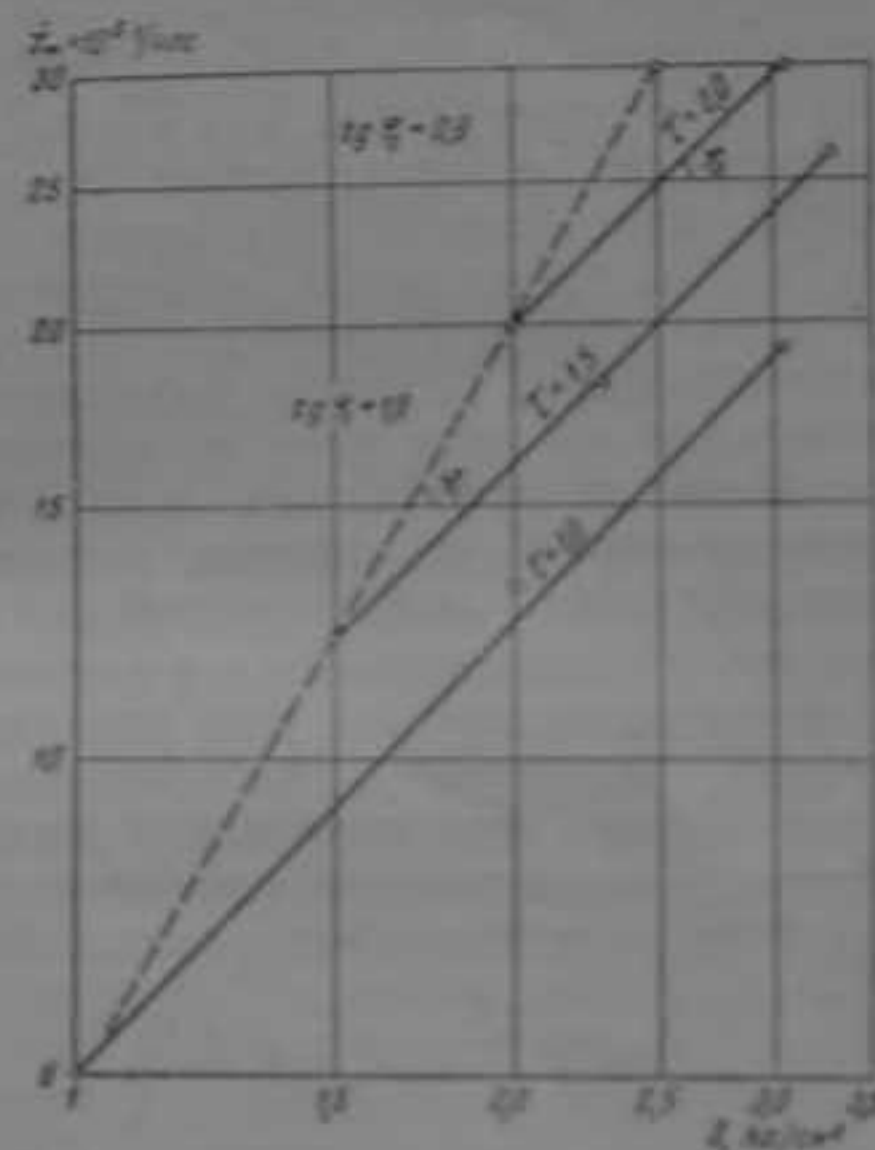


Рис. 21. Установившиеся скорости ползучести при одно-временном сдвиге и сжатии при температуре -3.8°

балок, для льда беспорядочной структуры были определены значения коэффициентов $n = 1.8$ и $K = 2.3 \cdot 10^{-12} \cdot 2.5 \text{ см}^2 \cdot \text{град/кг}^2 \cdot \text{час}$ (Войтковский, 1957), что полностью соответствует величине коэффициентов при чистом сдвиге. Это лишний раз свидетельствует о приемлемости уравнений (16).

Как показывают экспериментальные исследования, закономерности ползучести поликристаллического льда при сложном напряженном состоянии остаются в основных чертах такими же, как и описанные выше закономерности при чистом сдвиге (см. рис. 14). Только предельной длительной ползучести при этом характеризуется интенсивностью касательных напряжений, которая с некоторыми

приближением может рассматриваться, как максимальное напряжение сдвига. Расчетные коэффициенты K и n , характеризующие скорость ползучести и предел длительной ползучести, могут приниматься такими же, как и при чистом сдвиге¹.

Здесь надо также подчеркнуть, как это было сделано в описании ползучести при чистом сдвиге, что предложенная обобщенная зависимость (16) справедлива полностью лишь для случаев, когда наблюдается стадия установившейся ползучести. Установить количественные закономерности изменения скорости деформации на стадии ускоряющейся ползучести пока не удалось.

Изменение величины деформации льда в начальный период ползучести после приложения нагрузки может быть вычислено при помощи эмпирической формулы, аналогичной формуле (8), подставляя в нее взамен $\dot{\gamma}_{\infty}$ установившуюся скорость ползучести при заданном напряженном состоянии, вычисленную на основании формулы (16). Так, для случая одностороннего сжатия (или растяжения) изменение величины относительной деформации сжатия (или растяжения) выразится формулой

$$\dot{\epsilon}_{\infty} = \frac{K}{1+\theta} \frac{\sigma^n}{3^{\frac{n+1}{2}}}; \quad (17)$$

$$\epsilon \approx \frac{\sigma}{E} + \frac{K}{1+\theta} \frac{\sigma^n}{5,2} t \left(1 + \frac{at_0}{1+at}\right),$$

(принимая $n=2$, $m=1$).

Для расчетов величины деформации льда при сжатии и температурных напряжениях во льду до настоящего времени иногда пользуются эмпирической формулой Ройена (Royen, 1922)

$$\epsilon = \frac{c \sigma \sqrt{t}}{1+\theta}, \quad (18)$$

где ϵ — относительная деформация при сжатии;

$$c = (6-9) \times 10^{-4}.$$

¹ Автор предполагает, что нормальные напряжения и особенно всестороннее сжатие могут в некоторой степени увеличить предел длительной ползучести льда, однако экспериментально это еще не подтверждено.

Эта формула имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, в ней принята линейная зависимость величины деформации от напряжений, в то время как деформация увеличивается примерно пропорционально квадрату величины напряжения. Во-вторых, по формуле скорость деформации должна все время затухать, фактически же только в начальный период происходит уменьшение скорости деформации, а затем устанавливается постоянная скорость ползучести или начинается ускоряющаяся ползучесть. Поэтому пользоваться этой формулой не рекомендуется.

Вязкость

Большинство исследователей рассматривали ползучесть льда как вязкое течение, скорость которого можно характеризовать коэффициентом вязкости. Поэтому изучение ползучести льда обычно сводилось к определению коэффициента вязкости.

Коэффициент вязкости характеризует внутреннее трение, проявляющееся при наличии относительного движения соседних слоев тела и зависящее от сил сцепления между молекулами. Он может рассматриваться как сила сопротивления тела в данный момент процесса его деформирования, отнесенная к единице поверхности сдвигаемого слоя и к единице угловой скорости сдвига (Вейнберг, 1940). Коэффициент вязкости измеряется пуазами

$$\left(1 \text{ пуаз} = 1 \frac{\text{дина-сек}}{\text{см}^2} = \frac{0.00102 \text{ Г (сила)·сек}}{\text{см}^2} \right).$$

Результаты определений значения коэффициента вязкости имеются в работах Б. П. Вейнберга (1906), Дили (Deeley, 1908), Лагалли (Lagally, 1930), П. П. Кобеко (1946), В. В. Лаврова (1948), А. Р. Шульмана (1948), С. К. Ханиной (1949) и других исследователей. Полученные данные настолько разноречивы (отдельные значения коэффициента вязкости льда колеблются в пределах от 10^{10} до 10^{15} пуаз, т. е. могут отличаться друг от друга в 100 тысяч раз), что не удавалось установить какой-либо определенной закономерности изменения коэффициента вязкости. Все расхождения приписывались главным образом влиянию структуры льда и направления деформирования относительно оптических осей кристаллов льда.

Фактически же основной причиной больших расхождений определяемых значений коэффициента вязкости является то, что этот коэффициент применительно ко льду не является определенной физической константой и имеет условный характер, так как он может изменяться в широких пределах в зависимости от величины напряжений и времени их действия, помимо зависимости от структуры ориентации кристаллов и температуры. Кроме того, при определениях коэффициента вязкости обычно допускались грубые методические ошибки вследствие игнорирования этих факторов.

Коэффициент вязкости льда обычно вычислялся на основании замеров скорости деформирования, исходя из предположения, что лед удовлетворяет закону Ньютона для вязкости, т. е. предполагалось наличие линейной зависимости между величиной напряжений и скоростью деформации. И только в работах Глена (Glen, 1952, 1955) впервые было доказано, что лед не удовлетворяет закону Ньютона для вязкости.

Работами ряда исследователей — Глена (Glen, 1952, 1955), Герарда, Перуца, Роха (Gerard, Perutz, Roch, 1952), Хефели (Haefeli, 1952), Стейнемана (Steinmann, 1954), — а также автором (Войтковский, 1956, 1957) и др. было окончательно доказано, что между величиной напряжений и скоростью деформации нет линейной зависимости и что коэффициент вязкости у льда не является определенной физической константой, а является переменной величиной, зависящей от многих факторов.

Зависимость скоростей деформации от напряжений при идеально вязком течении ($n = 1$) в общем виде выражается уравнением

$$D_t = \frac{D_0}{2\eta}, \quad (19)$$

где η — коэффициент вязкости.

Если стадию установившейся ползучести рассматривать условно как вязкое течение, то коэффициент вязкости льда для этого случая, используя формулы (16) и (19), должен быть равен

$$\eta = \frac{1 + n}{K S^{n-1}}, \quad (20)$$

т. е. он зависит от трех факторов: от структуры льда, характеризующейся коэффициентами K и n , от температуры и от интенсивности касательных напряжений.

В тех случаях, когда не наблюдается длительной стадии установившейся ползучести, коэффициент вязкости становится совершенно неопределенной величиной. Поэтому коэффициент вязкости льда можно рассматривать лишь как условную величину, характеризующую отношение величины напряжений к скорости ползучести в заданных условиях деформирования и в заданный момент времени.

Ползучесть при переменных нагрузках

В случае изменения нагрузки скорость деформации резко изменяется, при этом в течение некоторого периода времени после изменения нагрузки (до 100 час) характер изменения деформации и ее скорость зависят как от величины действующих напряжений, так и от величины напряжений до изменения нагрузки, что обуславливается проявлением упругого последствия (см. главу II).

Если нагрузка на лед в определенный момент времени t_1 изменяется и напряжения при этом меняются от τ_1 до τ_2 , то дальнейший ход деформации может быть описан формулой (Войтковский, 1956)

$$\gamma_t = \gamma(\tau_1, t) + \gamma(\tau_2, t - t_1) - \gamma(\tau_1, t - t_1), \quad (21)$$

где γ_t — величина деформации в любой момент времени

$\gamma(\tau_1, t)$ — деформация, которая имела бы место в момент времени t , если бы напряжения не менялись (при τ_1);

$\gamma(\tau_2, t - t_1)$ — расчетная деформация по формуле (8) за $t - t_1$ при напряжении τ_2 ;

$\gamma(\tau_1, t - t_1)$ — то же, при напряжении τ_1 .

Схема расчета величины деформации по этой формуле показана на рис. 22. Здесь принимается, что общая деформация в любой момент времени после изменения напряжения может быть выражена как сумма двух условных величин. Первой из них является деформация, кото-

рая имела бы место в интересующий нас момент времени, если бы напряжения не менялись. Вторая представляет собой разницу между расчетными величинами деформации при новом и старом напряжениях. На схеме, где

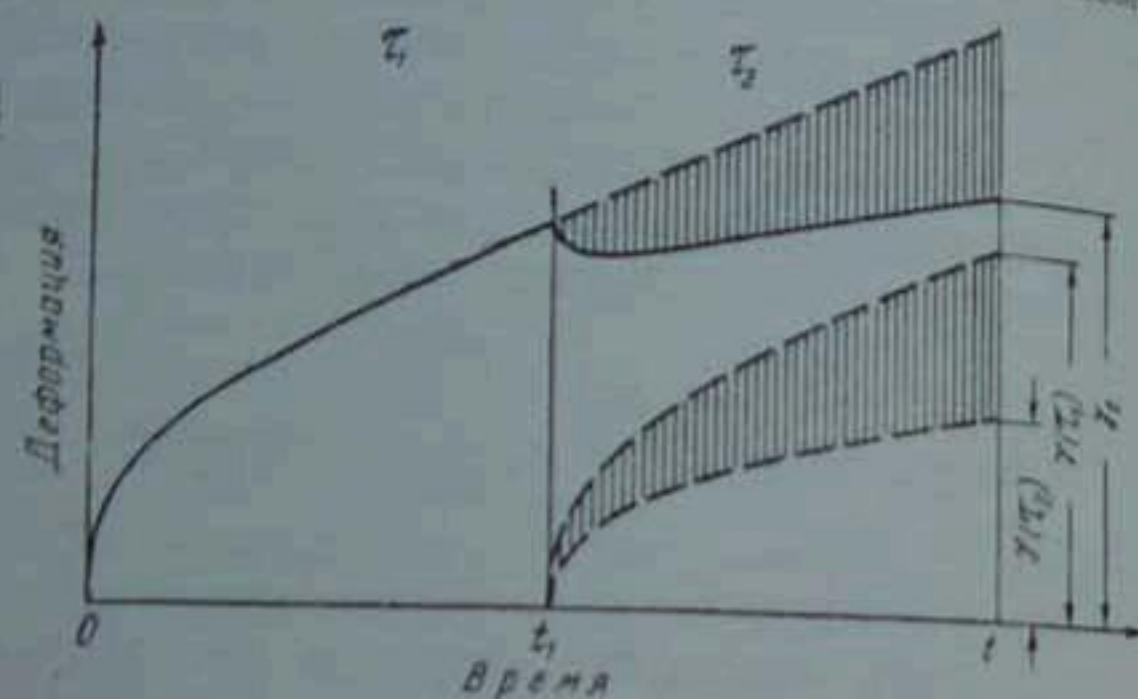


Рис. 22. Схема расчета величины деформации льда при изменении напряжений $\tau_2 < \tau_1$

показан случай уменьшения напряжений, последняя разность имеет отрицательное значение и представлена заштрихованными участками.

Последующие изменения напряжения могут быть учтены аналогичным образом.

В случае одностороннего сжатия льда при изменении напряжения от σ_1 до σ_2 (напряжение σ_1 действовало в течение времени t_1) дальнейшее изменение относительной деформации сжатия в соответствии с формулами (17) и (21), выразится:

$$\varepsilon \approx \frac{\sigma_2}{E} + \frac{K}{5,2(1+\theta)} \left\{ \sigma_1^2 t \left(1 + \frac{at_0}{1+at} \right) + (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) (t - t_1) \left[1 + \frac{a t_0}{1+a(t-t_1)} \right] \right\} \quad (22)$$

Следует отметить, что значения эмпирического коэффициента t_0 могут изменяться в довольно широких пределах. Если для случаев начального нагружения и увеличения напряжений он в соответствии с опытами автора находится в пределах от 30 до 100 час, то для случаев

уменьшения напряжений t_0 составляет 5—10 час, а при повторных увеличениях напряжений 5—30 час (Войтковский, 1956). Поэтому в формуле (22) введено два значения коэффициента t_0 — t_{01} и t_{02} , которые должны назначаться в зависимости от конкретных условий деформирования.

При изменении знака напряжений, когда нагрузка меняет свое направление на противоположное, скорость ползучести обычно возрастает. Так, в опытах автора (Войтковский, 1957) скорость прогиба ледяных балок при изменении направления прогиба увеличивалась примерно в два раза при тех же величинах нагрузок. Объясняется это тем, что ползучесть льда обычно связана с некоторыми нарушениями связей и в ряде случаев с частичным разрушением кристаллов на поверхностях сдвига, поэтому сопротивление сдвигу в направлении, противоположном первоначальному, уменьшается.

Релаксация

Релаксацией называется явление убывания силы сопротивления тела при постоянстве его деформации. Законы релаксации напряжений во льду до настоящего времени изучены недостаточно. Б. П. Вейнберг (1907) считал, что релаксация напряжений во льду подчиняется закономерности, установленной Шведовым, в соответствии с которой при постоянстве деформации напряжения убывают по экспоненциальному закону.

$$\sigma - \sigma_\lambda = (\sigma_0 - \sigma_\lambda) e^{-\frac{t}{\alpha}}, \quad (23)$$

где σ_0 — напряжение в начальный момент; σ_λ — предел упругости; α — время релаксации.

Однако для льда такая закономерность малоприменима, так как исходные положения, принятые при выводе формулы для деформирования льда, неприемлемы. Это обуславливается тем, что предел упругости льда близок к нулю, а время релаксации, которое связано с коэффициентом вязкости, является переменной величиной.

Б. Д. Карташкин (1947), анализируя результаты своих опытов, пришел к выводу, что релаксация напряжений

ориентировочно может быть выражена формулой, аналогичной по своему виду формуле (23), но при подстановке в нее взамен предела упругости величины конечного значения напряжения после определенного периода релаксации. Но в таком виде формула значительно теряет свою ценность, так как конечное значение напряжения обычно неизвестно. Кроме того, время релаксации остается неопределенной величиной.

Для вывода более приемлемой формулы релаксации используем описанные выше закономерности ползучести льда и общие положения о релаксации. Последние сводятся к тому, что общая величина деформации в любой момент рассматривается как сумма упругой и пластической деформаций и что в процессе релаксации снижение напряжений происходит вследствие постепенного уменьшения упругой деформации и приращения на ту же величину пластической деформации по схеме:

$$\gamma_{\text{нач}} = \gamma_{\text{упр}}(t) + \gamma_n(t) = \text{const} \quad (24)$$

или

$$\dot{\gamma}_{\text{упр}} + \dot{\gamma}_n = 0,$$

где $\gamma_{\text{упр}}, \gamma_n$ — соответственно, упругая и пластическая деформации в любой момент времени t ;

$\dot{\gamma}_{\text{упр}}, \dot{\gamma}_n$ — скорость упругой и пластической деформации.

Ввиду того, что скорость пластической деформации льда (ползучести) обуславливается величиной интенсивности касательных напряжений, условие релаксации в соответствии с последней схемой можно выразить как сумму интенсивности скоростей упругой и пластической деформации сдвига, равной нулю

$$L_{\text{упр}} + L_n = 0. \quad (25)$$

Интенсивность скорости упругой деформации сдвига согласно теории упругости равна

$$L_{\text{упр}} = \frac{1}{G} \frac{dS}{dt}, \quad (26)$$

где G — модуль сдвига.

Скорость пластической деформации в процессе релаксации принимаем равной скорости ползучести по форму-

ле (9). Заменяя в этой формуле значения скорости угловой деформации $\dot{\gamma}$ интенсивностью скоростей сдвига L , получаем [с учетом формулы (14) при $m \approx 1$] следующее значение интенсивности скоростей пластической деформации:

$$L_n = \frac{K}{1+\theta} S_n \left[1 + \frac{a t_0}{(1+at)^2} \right]. \quad (27)$$

Подставляя значения $L_{\text{упр}}$ и L_n в уравнение (25), разделяя переменные и интегрируя, получаем:

$$\frac{1}{G} \frac{dS}{dt} + \frac{K}{1+\theta} S_n \left[1 + \frac{a t_0}{(1+at)^2} \right] = 0;$$

$$\int_{S_{\text{нач}}}^{S_t} \frac{dS}{S_n} + \frac{KG}{1+\theta} \int_0^t \left[1 + \frac{a t_0}{(1+at)^2} \right] dt = 0;$$

$$S_t = \frac{S_{\text{нач}}}{\sqrt[n-1]{1 + \frac{KG}{1+\theta} (n-1) S_{\text{нач}}^{n-1} t \left(1 + \frac{a t_0}{1+at} \right)}}. \quad (28)$$

Последнее уравнение и является уравнением релаксации напряжений. В соответствии с экспериментальными данными о скорости ползучести льда при переменных нагрузках значение эмпирического коэффициента t_0 должно быть от 5 до 30 час. Если релаксация начинается непосредственно после начальной упругой деформации, то значение t_0 будет порядка 30 час. Если же лед до начала релаксации испытывал напряжения и деформации ползучести, то значение t_0 снижается до 5—10 час.

Для случая одностороннего сжатия льда, принимая $G = 15000 \text{ кг/см}^2$; $n \approx 2$; $K = 3 \times 10^{-6}$; $a = 0,5$; $t_0 = 10$; уравнение релаксации принимает вид

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{\text{нач}}}{1 + \frac{0,26}{1+\theta} \sigma_{\text{нач}} t \left(1 + \frac{5}{1+0,5t} \right)}. \quad (29)$$

На рис. 23 показаны кривые релаксации напряжений, вычисленные по этой формуле для начальных напряже-

ний 10, 5 и 3 кг/см² при температуре $-1,6^{\circ}$. Как видно из графика, характер кривых релаксации соответствует экспериментальным кривым релаксации, полученным Б. Д.

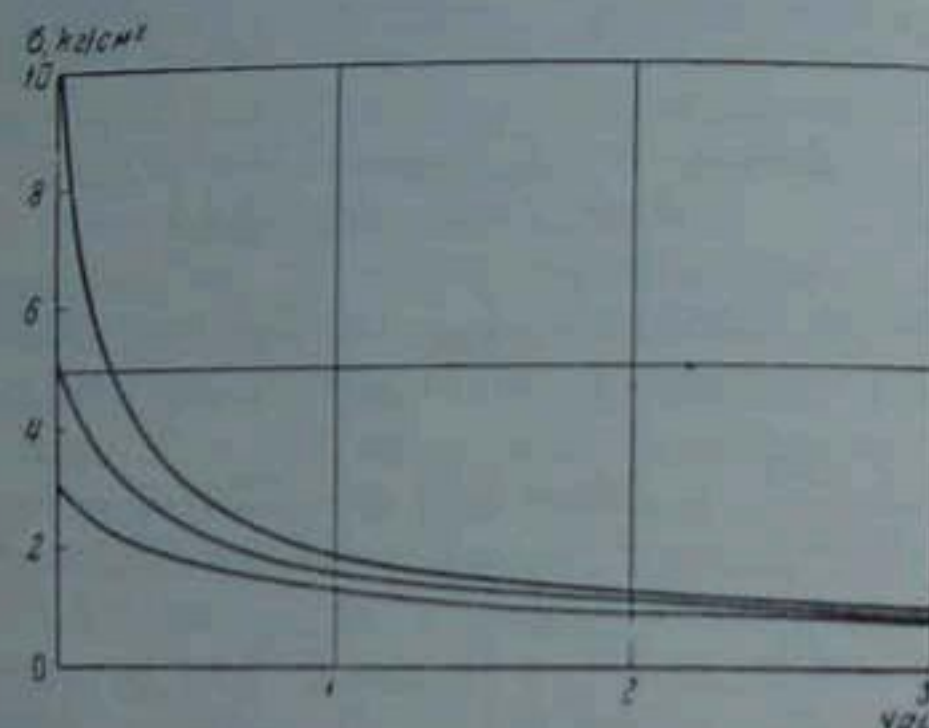


Рис. 23. Теоретические кривые релаксации напряжений при одностороннем сжатии, вычисленные по формуле (29)

Карташкиным (см. рис. 13). Однако предложенная нами формула релаксации требует еще дальнейшей экспериментальной проверки и уточнения.

Деформирование льда при неоднородном напряженном состоянии

Однородное напряженное состояние во льду удается создавать лишь в опытах по одностороннему сжатию или растяжению образцов правильной формы или по кручению образцов в виде тонкостенных труб. Такие опыты нужны для установления и количественной оценки закономерностей ползучести льда. Во всех остальных случаях в массиве или образце льда после приложения к нему нагрузки создается неоднородное напряжение, при котором величина и направление главных напряжений в различных точках неодинаковы.

Наличие неоднородного напряженного состояния в процессе деформации льда вызывает перераспределение внутренних напряжений, так как закономерности распределения напряжений при начальной упругой деформации и при ползучести различны. Если при упругой стадии де-

формации имеется линейная зависимость между величиной деформации и напряжением, то при ползучести величина (скорость) деформации возрастает значительно

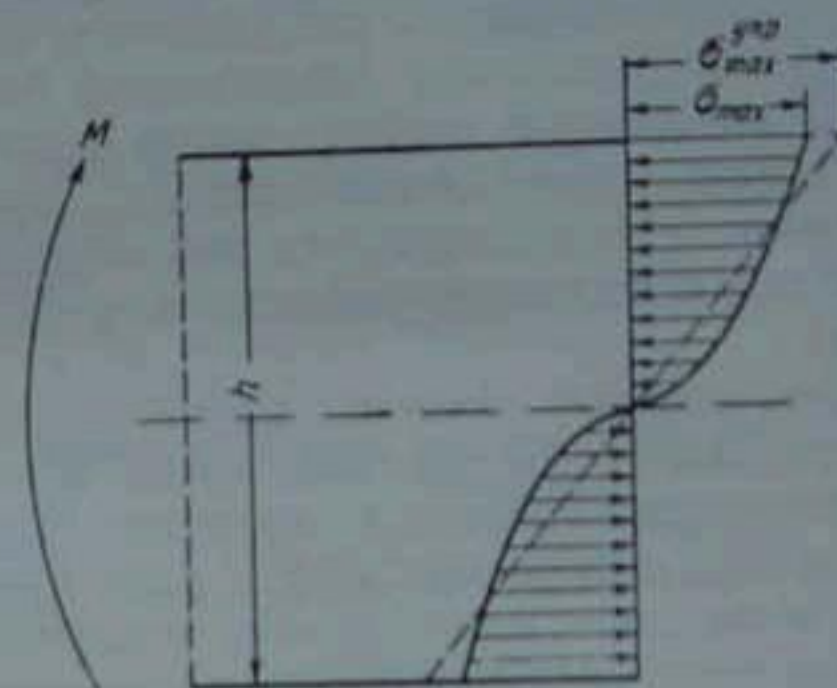


Рис. 24. Распределение напряжений в поперечном сечении изгибаемой ледяной балки

быстрее, чем напряжение. В местах, где при начальной упругой деформации возникли более высокие напряжения сдвига, появляется возможность для быстрой пластической деформации, но в силу неразрывности деформаций этому будут в некоторой степени препятствовать более медленно деформируемые (менее напряженные) соседние участки. В итоге напряжения в наиболее напряженных участках будут частично уменьшаться (релаксировать) за счет увеличения напряжений в ближайших менее напряженных участках.

Пример перераспределения напряжений для случая изгиба ледяной балки (Войтковский, 1957) показан на рис. 24. Пунктирной линией здесь показано распределение напряжений в поперечном сечении балки в начальный момент после приложения нагрузки (при упругой деформации). Сплошной линией показано распределение этих же напряжений в стадии установившейся ползучести. Как видим, максимальные напряжения у верхней и нижней поверхности балки уменьшились, а напряжения в средней части увеличились.

Скорость перераспределения внутренних напряжений обуславливается величиной и неоднородностью началь-

ных напряжений сдвига в деформируемом массиве льда. Чем выше интенсивность напряжений сдвига, тем быстрее может происходить пластическая деформация и тем быстрее могут релаксировать напряжения. Особенно интенсивное перераспределение напряжений бывает в случаях, когда в начальный момент после приложения нагрузки возникают напряжения сдвига, превышающие предел длительной ползучести, так как в местах повышенных напряжений создаются условия для прогрессирующего течения.

Напряжения сдвига, превышающие предел длительной ползучести, могут сохраняться лишь в течение некоторого ограниченного периода времени. При наличии таких напряжений может произойти разрушение деформируемого объема льда в результате ускоряющейся ползучести или высокие напряжения уменьшаются за счет их перераспределения.

Перераспределение внутренних напряжений вызывает уменьшение скорости пластической деформации нагруженного образца или массива льда в целом. Поэтому при наличии неоднородного напряженного состояния начальная неустановившаяся стадия ползучести с постепенно уменьшающейся скоростью может быть весьма длительной. Это можно видеть на примере вдавливания в лед жестких штампов. Так, согласно опытам, проведенным И. Н. Вотяковым в 1958 г. в лаборатории механики грунтов Северо-Восточного отделения Института мерзлотоведения АН СССР, скорость погружения штампа в лед постепенно уменьшилась примерно в течение 1000 час и только после этого устанавливалась постоянная скорость погружения (рис. 25). Здесь продолжительность периода до установления постоянной скорости деформирования оказалась в 10—20 раз больше, чем при чистом сдвиге.

При рассмотрении вопроса о перераспределении внутренних напряжений в деформируемом массиве льда всегда надо четко разграничивать напряжения сдвига и напряжения всестороннего сжатия. Перераспределение внутренних напряжений обуславливается процессами ползучести и релаксации, которые могут существовать лишь при наличии напряжений сдвига и практически не зависят от напряжений всестороннего сжатия. Поэтому наличие больших и неравномерно распределенных нормаль-

ных напряжений само по себе еще не говорит о возможности перераспределения напряжений. Например, под средней частью штампа большого размера, нагруженного большой нагрузкой, перераспределения внутренних

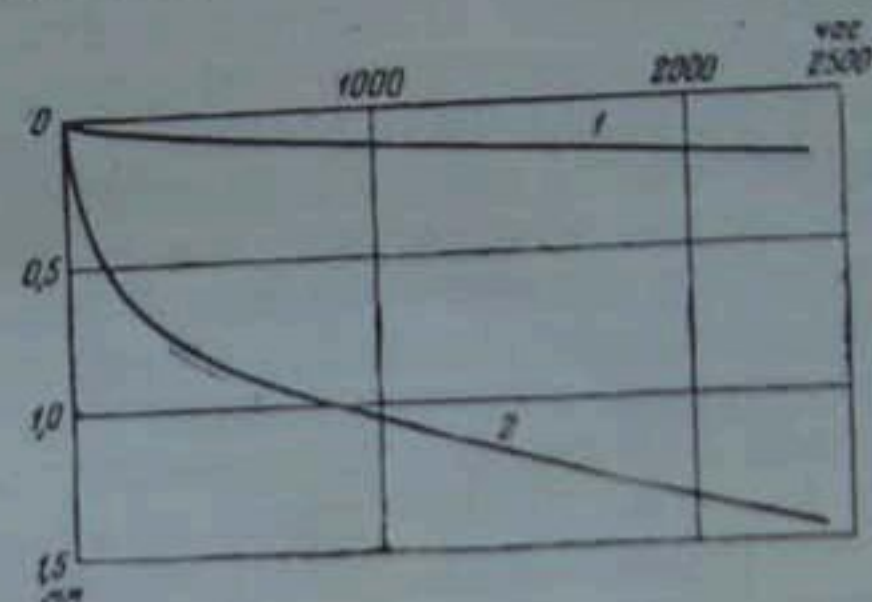


Рис. 25. Вдавливание в лед плоского круглого штампа площадью 30 см² при $t = -3,5^\circ$:
1 — при $\sigma = 2$ кг/см²; 2 — при $\sigma = 5$ кг/см²

напряжений может не быть, несмотря на высокие напряжения, так как лед здесь будет находиться в условиях всестороннего сжатия. Основной же зоной перераспределения напряжений будут области около краев штампа, где возникают большие напряжения сдвига.

Влияние структуры льда на ползучесть

Кристаллы льда обладают резко выраженной анизотропией механических свойств. Поэтому все приведенные выше количественные соотношения и характеристики ползучести применимы полностью лишь для характеристики деформирования поликристаллического льда с беспорядочной ориентировкой кристаллов в больших по сравнению с размерами отдельных кристаллов объемах, когда лед можно рассматривать как сплошное изотропное тело. Для льда с отчетливо выраженной ориентацией кристаллов основные закономерности ползучести остаются без существенных изменений, однако скорость ползучести может изменяться в зависимости от направления действующих напряжений сдвига относительно направления

осей кристаллов. В результате этого коэффициенты n и K , характеризующие установившуюся ползучесть [формулы (7) и (16)], могут отличаться от указанных выше чаще в сторону увеличения. Объясняется это тем, что при наличии ориентированной структуры в отдельных случаях увеличивается возможность деформирования льда без разрушения его отдельных кристаллов, например при совпадении поверхностей сдвига с базисными плоскостями кристаллов или с контактами между кристаллами. В таких случаях внутреннее сопротивление деформации может быть меньше, чем при деформировании льда беспорядочной структуры, и соответственно скорость ползучести может быть больше. В наших опытах по кручению труб и изгибу балок из льда с определенной ориентировкой кристаллов (Войтковский, 1957) значение коэффициента n в отдельных случаях достигало 2,4 и K — величины $9 \cdot 10^{-5}$.

Влияние структуры льда особенно сильно сказывается при наличии напряжений сдвига, превышающих предел длительной ползучести, когда имеет место ускоряющаяся ползучесть.

Глава V

ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА

Пределом прочности или временным сопротивлением любого материала называется величина напряжений, при которых он разрушается. Для льда такая величина является в некоторой степени условной, так как его разрушение не обусловлено однозначно достижением определенного предела напряжений. Ввиду значительной роли явлений ползучести начало разрушения льда и соответствующая этому моменту величина внутренних напряжений существенно зависят от скорости приложения нагрузки, условий деформирования и других факторов. Это и является одной из причин больших колебаний значений предела прочности льда, определяемых различными исследователями.

Предел прочности льда обычно определяется как величина максимального напряжения (сопротивления) в испытываемом образце льда перед его разрушением при «быстром» нагружении. В зависимости от вида деформации различают пределы прочности: при сжатии, растяжении, изгибе и срезе.

Специфика механических свойств льда приводит к тому, что определяемые значения предела прочности льда носят несколько другой характер и назначение, чем обычно применяемые пределы прочности различных материалов. Предел прочности характеризует предельное сопротивление материала внешним усилиям и используется обычно для определения возможных нагрузок, которые может выдержать какая-нибудь конструкция или деталь, изготовленная из данного материала. В случае же использования льда как строительного материала или

несущего основания допускаемая нагрузка определяется не величиной допускаемых напряжений, которые должны быть меньше предела прочности, а допускаемой в зависимости от конкретных условий величиной и скоростью пластической деформации льда (Войтковский, 1954).

Данные о величине предела прочности льда необходимы в основном в тех случаях, когда рассматривается вопрос борьбы со льдом. Они нужны, например, при расчете сооружений подверженных воздействию льда, для оценки возможных сил взаимодействия между льдом и сооружением. Величина предела прочности характеризует также усилие, необходимое для механического разрушения льда.

Сопротивление льда раздавливанию. В табл. 7 приводятся основные результаты опытов по определению предела прочности льда при одностороннем сжатии, проведенных различными исследователями. Из этих данных видно что сопротивление льда меняется в широких пределах в зависимости от структуры льда, ориентировки кристаллов относительно направления сжатия, температуры и других факторов. При этом наблюдается значительный разброс значений предела прочности, даже при испытании аналогичных по своей структуре образцов в одинаковых условиях.

Следует отметить, что величина предела прочности льда в значительной степени зависит от условий деформирования — размеров испытываемых образцов и скорости приложения нагрузки (или скорости деформирования), на что большинство исследователей мало обращало внимания. Так, по данным Н. А. Цытовича (Цытович, Сумгин, 1937), предел прочности при сжатии одинаковых образцов льда изменялся в зависимости от скорости нарастания нагрузки в следующих пределах:

Скорость нарастания нагрузки, $\text{кг/см}^2 \cdot \text{мин.}$	20	36	50
Предел прочности при сжатии, кг/см^2	60	37	24

Аналогичное явление было отмечено К. Н. Коржаниным (табл. 8), который установил, что увеличение скорости деформирования приводит к уменьшению предела прочности, причем влияние скорости деформирования особенно сильно сказывается при более низких темпера-

Таблица 7

Предел прочности льда при одностороннем сжатии

Исследователь, год	Характер льда	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Предел прочности, кг/см^2			Литература
			σ_1	σ_{II}	σ	
Васенко Б. П., 1899	Искусственный	10—18	—	—	12—50	Васенко, 1899
То же	Речной	12—17	20	37—46	—	Там же
Бель, 1911	•	0	37—55	25—54	—	Комаровский
То же	•	8—10	—	—	34—78	Там же
Барнес и Маккей, 1914	•	0	17—40	16—39	—	•
Бессонов Е. А., 1915	•	—	10—26	29—61	—	Бессонов, 1923
Сергеев Б. Н., 1921	•	—	—	—	10—75	Сергеев, 1929
Пинегин В. Н., 1923	Речной, верхняя часть	0—2	18	21	—	Пинегин, 1923
То же	То же	12—15	25	29	—	Там же
•	•	31—35	28	38	—	•
•	Речной, средняя часть	0—2	28	36	—	•
•	То же	12—15	33	33	—	•
•	•	31—35	69	76	—	•
•	Речной, нижняя часть	0—2	12	18	—	•
•	То же	12—15	18	20	—	•
•	•	31—35	32	38	—	•
Арнольд-Алябьев В. Н., 1923—1928	Из Финского залива	0	22	—	—	Арнольд-Алябьев, 1929
То же	То же	1	26	—	—	Там же

Ариольд-Алябьев В. Н. Из Финского залива 1923—1928		Окончание таблицы 7 Ариольд-Алябьев, 1929	
•	•	—	—
•	•	—	—
•	•	—	—
Коржавин К. Н., 1934	Речной	—	—
То же	•	—	—
•	•	—	—
Бригада КОВМ, 1936—1937	Подземный	—	—
То же	То же, загрязненный грунтом	—	—
•	•	—	—
Вейнберг Б. П.	Лед грунтовой извести	—	—
•	Среднее значение для верхней части	—	—
То же	То же, для нижней части	—	—
Карташкин Б. Д., 1943—1945	Бассейновый	—	—
То же	Наливной	—	—
•	•	—	—
Коржавин К. Н., 1938	Речной	—	—
То же	•	—	—
Коржавин К. Н., 1950	•	—	—
Бутягин И. П., 1953	•	—	—

Примечания: а. — предел прочности льда при сжатии в направлении, перпендикулярном к осям кристаллов;

а. — то же, при сжатии в направлении осей кристаллов;

с. — то же, в случаях, когда нет отчетливо выраженной ориентировки кристаллов в испытываемом образце или эта ориентировка неизвестна.

турах, а по мере приближения к 0° это влияние уменьшается. Зависимость предела прочности от скорости относительной деформации S (в пределах от 0,0007 до 0,0417 сек⁻¹) он представляет (Коржавин, 1951) эмпирической формулой

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt[3]{S}}, \quad (30)$$

где a — эмпирический коэффициент (при -3° $a = 3,1$; при 0° $a = 2,5$).

Отмечаем, что такого рода зависимость может существовать лишь при относительно больших скоростях деформирования, так как при малых скоростях наблюдается обратная картина: увеличение скорости деформирования приводит к увеличению сопротивления (см. рис. 18).

Таблица 8

Предел прочности льда (кг/см²) при сжатии в зависимости от скорости деформации и температуры

Скорость деформирования* v , см./мин	Температура, $-^\circ\text{C}$					
	0	2	4	6	8	10
2	14,5	21,2	27,5	35,0	41,2	48,9
20	9,7	10,0	10,5	11,5	13,0	14,2

* Скорость сжатия кубиков размером 10×10×10 см в направлении, перпендикулярном к осям кристаллов.

При сжатии образец льда часто начинает разрушаться раньше того момента, когда напряжения в нем достигнут предела прочности. Так, при испытании на сжатие образцов подземного льда (Л. С. Хомичевская, 1940) отмечалось, что трещины в образцах начинают появляться при напряжениях в 2—3 раза меньших предела прочности. Образец льда, в котором образовались трещины, может разрушиться со временем и без увеличения напряжений, т. е. при более или менее длительном действии того напряжения, при котором образовались трещины. Это приводит к тому, что при длительном действии нагрузки или при очень малой скорости ее нарастания предел прочности льда может существенным образом уменьшиться.

Влияние размеров испытываемых образцов на величину предела прочности до настоящего времени изучено недостаточно. Сравнивая результаты испытаний кубиков размером $10 \times 10 \times 10$ и $20 \times 20 \times 20$ см³, К. Н. Коржавин (1940) отмечал повышение предела прочности для больших размеров образцов. Но такое повышение по-видимому, наблюдается не всегда. Так, И. П. Бутягин (1955) утверждает, что при опытах, проведенных в естественных условиях разрушения ледяного покрова, предел прочности при различных видах деформации крупных образцов льда был меньше, чем при испытании малых образцов.

Предел прочности льда зависит от температуры и увеличивается по мере ее понижения. Эта зависимость может быть выражена эмпирической формулой (Коржавин, 1940):

$$\sigma = A + B\theta, \quad (31)$$

где θ — отрицательная температура льда, °C (без знака минус);

A и B — эмпирические коэффициенты (для случая раздавливания кубиков льда размером $10 \times 10 \times 10$ см³ со скоростью $v = 2$ см/мин в интервале температуры от 0 до -10° ($A = 15$ и $B = 3,4$)).

Предел прочности льда при сжатии в направлении осей кристаллов $\sigma_{\parallel}$ обычно больше, чем при сжатии в направлении, перпендикулярном осям кристаллов, $\sigma_{\perp}$. Так, по данным К. Н. Коржавина (1951), отношение $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ для ледяного покрова без заметных признаков ослабления связей между кристаллами при температуре от 0 до -3° составляет в среднем 1,3—1,5. Во время весеннего таяния, когда происходит заметное ослабление связей между кристаллами, это отношение возрастает и может достигать 3,6.

Прочность естественного ледяного покрова по его толщине неодинакова. Наиболее высоким пределом прочности обладает лед в средней части, а наименьшей прочностью — лед в нижней части покрова.

Сопротивление льда разрыву при растяжении зависит в основном от тех же факторов, что и

сопротивление раздавливанию, только величина предела прочности значительно меньше и колеблется в меньших пределах (табл. 9). Кроме того, на величину предела прочности большое влияние оказывают различные включения и структурные неоднородности, которые могут стать очагом разрушения. Если при сжатии образец льда после появления трещин может допускать еще дальнейшее увеличение нагрузки, то при растяжении образец льда разрывается обычно без предварительного образования трещин.

Сопротивление льда излому определяется путем изгиба образцов льда или части ледяного покрова, например путем изгиба вырезанных в покрове коньколей — «клавишей». Наиболее вероятными очагами разрушения являются разрывы в растянутой зоне или скалывание в местах наибольших касательных напряжений и, соответственно, начало разрушения должно определяться достижением предельных растягивающих напряжений или предельных напряжений сдвига.

Величина предела прочности льда при изгибе обычно определяется как максимальное растягивающее напряжение в изгибаемом образце льда перед его разрушением, вычисляемое на основании формул для линейно упругого тела. При таком подходе определяемая величина максимального напряжения оказывается больше фактического напряжения в испытываемом образце, так как во время испытаний льда на изгиб наряду с упругими деформациями имеют место и пластические деформации, при которых распределение напряжений в изгибаемом образце изменяется по сравнению с распределением напряжений при линейно упругой деформации в сторону уменьшения максимальных напряжений (см. рис. 24).

Таким образом, определяемый предел прочности является до некоторой степени условной величиной, несколько большей, чем фактические максимальные напряжения при изломе. Этим, на наш взгляд, и объясняется тот факт, что по данным большинства исследователей предел прочности льда при изгибе (табл. 10) оказывается больше предела прочности при растяжении, так как рост фактических растягивающихся напряжений в изгибаемом образце выше предельного сопротивления разрыву маловероятен.

Предел прочности льда при растяжении

Исследователь	Характер льда	Температура, °C	Предел прочности, кг/см ²	Литература
Васенко Б. П., 1897	Искусственный	4-12	11-19	Васенко, 1897
Хесс, 1902	Глетчерный	—	7	Там же
Пинегин В. Н., 1923	Речной, средняя часть, $0 \perp f$	0-2	10	Пинегин, 1923
То же	То же	12-15	12	Там же
.	.	31-35	14	.
.	Речной, средняя часть, $0 \perp f$	0-2	11	.
.	То же	12-15	15	.
.	.	31-35	18	.
.	Речной, нижняя часть, $0 \perp f$	0-35	5-8	.
.	То же, во $0 \perp f$	0-35	10-13	.
Вейсберг Б. П., 1940	Среднее значение из 235 испытаний	—	11,1	Вейсберг, 1940
Карташкин Б. Д., 1943-45	Речной	3-8	9-12	Карташкин, 1947
То же	Наливной	3-18	10-18	Там же

Изложенные соображения не препятствуют практическому пользованию для расчетов условий излома льда приведенными значениями предела прочности, учитывая, что допущенное завышение напряжений при определении предела прочности будет компенсироваться соответствующим уменьшением фактических напряжений против расчетных в интересующих нас случаях. Надо только и при расчетах исходить не из величины фактических напряжений, а из расчетных напряжений, рассматривая лед условно как линейно упругое тело.

Величина предела прочности льда при изгибе весьма существенно зависит от размеров изгибаемых образцов и скорости приложения нагрузки. Так, по данным И. П. Бутягина (1955), предел прочности малых образцов (сечением 7×7 и 10×10 и длиной 50 см) в среднем в три раза больше, чем предел прочности крупных консольных образцов, вырезанных в ледяном покрове. В. В. Лавров (1958) сделал попытку теоретически объяснить влияние размеров испытываемых образцов льда на величину предела прочности и предложил соответствующие расчетные формулы. Теоретические предположения, принятые Лавровым, являются в некоторой степени спорными, поэтому предложенные им формулы здесь не приводятся.

Согласно этим формулам, например, получаем, что если при изломе образца толщиной 4,5 см и длиной 35 см предел прочности составляет 23 кг/см^2 , то при изломе образца толщиной 34 см и длиной 250 см предел прочности снизится до 9 кг/см^2 . Аналогично, если предел прочности при изломе ледяного покрова толщиной 0,35 см будет равен 21 кг/см^2 , то при толщине покрова в 1-2 м он будет около 7 кг/см^2 .

Зависимость сопротивления излому от скорости нагружения была отмечена К. Н. Коржавиным. Согласно его данным (см. табл. 10), увеличение скорости изгиба от 2 до 20 см/мин уменьшало предел прочности с 9,2 до $3,6 \text{ кг/см}^2$.

Отмечено (Орлов, 1940), что сопротивление льда при изломе образца в воде несколько меньше, чем при изломе «сухого» льда. Сопротивление ледяного покрова, на примере изгиба ледяных «лавишей», при изгибе вниз обычно больше, чем при изгибе вверх (Неронов, 1946; Бутягин, 1955).

Предел прочности льда при изгибе

Исследователь	Характер льда	Температура, °С	Предел прочности, кг/см ²	Литература
Васенко Б. П., 1897	Речной	15	25—45	Васенко, 1897
То же	Искусственный	15	30—42	Там же
Вейнберг Б. П., 1912	Речной, верхняя часть	6	8,3	Вейнберг, 1913
То же	• средняя часть	0	13,0	Там же
•	• нижняя часть	0	12,7	•
Бессонов Е. А., 1913—1915	Речной	3	11—31	Бессонов, 1923
Сергеев Б. Н., 1921	Речной, верхняя часть	0	11,4	Сергеев, 1929
То же	• средняя часть	0	9,9	Там же
•	• нижняя часть	0	14,4	•
Пинегин В. Н., 1923	Речной	5—8	18	Пинегин, 1923
То же	•	15—19	33	Там же
Пеллер А. Ю., 1923—1928	•	0,2—32	5,7—22,1	Пеллер, 1929
Басин М. М., 1934	•	0	11,8	Коржавин, 1951
Коржавин К. Н., 1937	Речной, при скорости деформации $v=2$ см/мин	0	9,2	Там же

Окончание таблицы 10

Коржавин К. Н., 1937	То же, $v=20$ см/мин	0	3,6	Коржавин, 1951
Орлов Ф. Ф., 1940	Речной	8—10	3—45	Орлов, 1940
То же	Речной, излом в воде, $v \perp f$	0	25	Там же
•	• излом в воде, $o \parallel f$	0	14	•
Вейнберг Б. П., 1940	Речной, среднее значение	3	16	Вейнберг, 1940
Трошинский Н. П., 1942	Речной, изгиб ледяных клавишей в воде	0	7,1	Коржавин, 1951
Шинцов Н. Д., 1938—1943	То же	1	1,4—8,3 (ср. 4)	Шинцов, 1947
Шинцов Н. Д., 1942	Речной	2	9—13	Там же
То же	•	5	10—16	•
•	•	10	13—20	•
•	•	20	18—19	•
Неронов Ю. Д., 1943	Речной, изгиб ледяных клавишей	0	2,8—5,6	Неронов, 1946
Карташкин Б. Д., 1943—1945	Речной	3—21	8—24	Карташкин, 1947
То же	Названной	1—3	8—'6	Там же
•	•	4—27	12—23	•
•	•	40	20—24	•
Бутягин И. П., 1953	Речной, изгиб ледяных клавишей	0	1,5—5,5 (ср. 3,6)	Бутягин, 1955

Чем выше температура льда, тем меньше его сопротивление излому. По данным опытов Ф. Ф. Орлова (1940), при повышении температуры от -10 до $-0,5^\circ$ предел прочности льда уменьшался приблизительно на 46%.

Сопротивление льда срезу. В табл. 11 приведены основные данные о величине предела прочности льда при срезе по материалам различных исследователей. Как видно, прочность может меняться в широких пределах. Большей частью предел прочности при срезе меньше, чем при растяжении (Б. П. Вейнберг, 1940) в среднем почти в два раза ($\sigma_{\text{раст}} \approx 11,1 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_{\text{ср}} \approx 5,8 \text{ кг/см}^2$). Однако при низких температурах в отдельных случаях сопротивление срезу может значительно превосходить сопротивление разрыву. Величина предела прочности при срезе так же, как и при других видах разрушения, увеличивается с понижением температуры и может изменяться в зависимости от структуры льда и направления среза относительно направления осей кристаллов. Кроме того, как показывают опыты С. С. Вялова (Vialov, 1958), сопротивление льда срезу зависит от величины нормального давления в плоскости среза, увеличиваясь с ростом последнего. Есть также основания полагать, что на величину предела прочности оказывают значительное влияние условия среза: способ проведения опыта, размеры образца, скорость приложения нагрузки или скорость среза и т. п. Но эти вопросы изучены еще недостаточно.

Прочность смерзания льда с различными телами зависит от материала, характера его поверхности и температуры. Некоторые значения предельных сил смерзания льда приведены в табл. 12. Из приведенных данных видно, что силы смерзания существенно увеличиваются с понижением температуры и при шероховатой поверхности. Силы смерзания изменяются также в зависимости от условий смерзания льда с телом, которые обуславливают структуру льда и направление осей кристаллов в месте контакта. Силы смерзания зависят от скорости возрастания нагрузки. При быстром возрастании нагрузки разрушение носит хрупкий характер, причем в зависимости от материала и состояния его поверхности разрушение может происходить не строго по контакту, а частично проходить по льду. Так, при опытах по выдер-

Таблица 11

Предел прочности льда при срезе

Исследователь	Характер среза	Температура, $^\circ\text{C}$	Предел прочности, кг/см^2	Литература
Пинетин В. Н., 1922—1923	Речной, средняя часть, $0 \perp 1$	0—2	6	Пинетин, 1923
То же	То же	12—15	10	Там же
•	•	31—35	13	•
•	Речной, средняя часть, $0 \parallel 1$	0—2	6	•
•	•	12—15	9	•
•	•	31—35	12	•
Речной, нижняя часть, $0 \perp 1$	0—23	7—9	•	•
То же, $0 \parallel 1$	0—23	6—9	•	•
Речной	1—24	5—35	•	Комаровский, 1932
Искусственный	0	9	•	Шытович, Сумгин, 1937
•	•	0,4	11	Там же
•	•	2,9—6,1	27—38	•
•	•	10,1	56	Вейнберг 1940
•	Среднее значение из 111 испытаний	—	5,8	•
Вейнберг Б. П., 1940	Речной (срез перемычки между лунками)	0	1,5—8,3 (ср. 3,5)	Буцагин, 1958
Буцагин И. П., 1926—1957	То же, через вскрытом реку	0	2,2	Там же

Исследователь	Материал и характер поверхности	Температура, °С	Сила смерзания, кг/см ²	Литература
Бель, 1911	Бетон с оштукатуренной поверхностью (не железной)	0	8—11	Комаровский, 1932
Шытович Н. А., 1930	Дерево (сосна) с гладкой поверхностью	1,1	13—16	Там же
То же	•	1	5,2	Шытович, Сумгин, 1937
•	•	5	6,2	Там же
•	•	7	11,6	•
•	•	10	13,7	•
•	•	20	22,0	•
•	•	5—10	11,5	•
•	Бетон с гладкой поверхностью	5—10	9,8	•
Альтберг В. К., 1948	Железо	0,085	0,14	Альтберг, 1948
То же	•	0,32	0,52	Там же
•	•	0,50	0,81	•
•	•	1,09	2,95	•
•	Битум	0,08	0,025	•
•	То же	1,09	0,28	•

гиванию замороженных в лед деревянных стержней С. С. Вялов (1956) наблюдал случаи, когда разрушение сопровождалось резким треском и разрывом льда, отдельные кусочки которого сохранялись на выдернутом стержне. В таких случаях отмечались наибольшие значения сил смерзания. При длительном же взаимодействии нагрузок

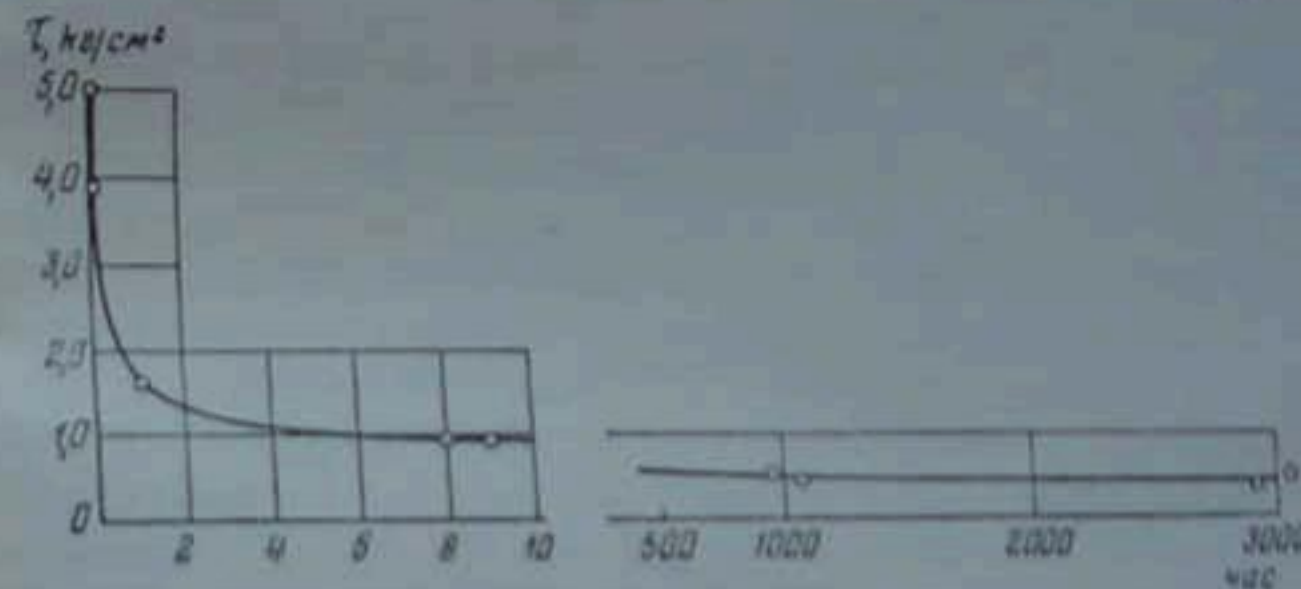


Рис. 26. Кривая длительной прочности смерзания льда с деревом при $t = -0,4^\circ$

или при их медленном возрастании имело место скольжение стержня по льду. Величина сил смерзания в этих случаях оказывалась значительно ниже.

На рис. 26 приведена кривая длительной прочности смерзания льда с замороженными в него деревянными стержнями (Вялов, 1956), которая показывает, как меняется прочность смерзания в зависимости от времени действия нагрузки до момента выдергивания стержня. При быстром нарастании нагрузки силы смерзания доходили до 5 кг/см^2 . При нагрузках, вызывающих силы сцепления в 1 кг/см^2 , выдергивание проходило через 8—12 часов, а при $0,5 \text{ кг/см}^2$ — через 1—3 тысячи часов.

Сопротивление льда местному смятию может быть значительно больше, чем сопротивление льда раздавливанию. По данным К. Н. Коржавина (1955), предел прочности льда при местном смятии может в 2—2,5 раза превосходить предел прочности при общем одностороннем сжатии. Для случаев смятия речного льда им предлагается следующая формула, определяющая зависимость предела прочности льда смятию $\sigma_{см}$ в зависимости от предела прочности при сжатии $\sigma_{сж}$.

ширины льдины B и ширины площадки смятия b (имеется в виду смятие на краю льдины по всей его толщине):

$$\sigma_{см} = \sigma_{сж} \sqrt[3]{\frac{B}{b}}. \quad (32)$$

При вдавливании в лед жесткого тела (штампа) величина сопротивления льда и характер его разрушения зависят от размеров и формы штампа, скорости вдавливания (или скорости приложения нагрузки к штампу), а также от размеров и конфигурации того объема льда, в который вдавливается штамп. Конечно, при этом играют роль и все другие факторы, влияющие на предел прочности льда при сжатии — температура, строение льда и т. п. Так, применяя вместо полуциркулярного очертания штампа треугольное с углом заострения в 60° при прочих одинаковых условиях, К. Н. Коржавин (1955) наблюдал уменьшение усилия, потребного для внедрения штампа, в 1,5—2 раза.

При медленном нарастании нагрузки и при длительном действии нагрузок, вызывающих малые по сравнению с пределом прочности напряжения под штампом, имеет место плавное погружение штампа, обусловленное ползучестью льда. Быстрое нарастание нагрузки вызывает в некоторой зоне около штампа хрупкое разрушение льда с образованием трещин.

Прочность речного льда в период ледохода значительно снижается (в 1,5—3 раза). Лед в периоду весеннего ледохода под действием солнечных лучей и тепла начинает таять по всей толщине. В первую очередь оттаивание происходит на контактах между кристаллами, где в процессе замерзания образуются пленки минерализованной воды, замерзающей и соответственно тающей при пониженной температуре. При таянии этих прослоек образуются полости с пониженным давлением, куда может проникать воздух. В результате этого лед мутнеет, становится рыхлым, и его прочность быстро понижается.

Для определения возможных сил взаимодействия между льдом во время весеннего ледохода и опорами мостов и различными гидротехническими сооружениями можно пользоваться предложенными К. Н. Коржавиным (1955)

расчетными значениями пределов прочности льда в зависимости от скорости его движения (табл. 13).

Таблица 13

Предел прочности речного льда (кг/см^2) в период весеннего ледохода в зависимости от скорости его движения (м/сек.)

Характер воздействия	Реки севера и Сибири			Реки Европейской части СССР		
	Под- вижка 0,5	Полный ледоход		Под- вижка 0,5	Полный ледоход	
		1,0	1,5		1,0	1,5
Сжатие	6,5	5,0	4,5	3,5	2,5	2,0
Местное смятие . .	16	13	11,5	8,0	6,5	5,5
Изгиб	7,5	6,0	5,5	4,0	3,5	3,0
Срез	—	3—6	—	—	1,5—3	—
Растяжения	—	7—9	—	—	3—4	—

Сопротивление льда динамическим нагрузкам. Динамическими нагрузками обычно принято называть такие нагрузки, при действии которых наблюдаются существенные ускорения частиц нагружаемого тела или соприкасающегося с ним другого тела, например, при ударе или при колебаниях.

При вынужденных колебаниях, вызывающих знакопеременные напряжения, во льду могут появиться трещины, которые постепенно растут и являются причиной разрушения. В итоге величина предела прочности с увеличением количества циклов изменения напряжений уменьшается.

Б. Д. Карташкин (1947) отмечал, что ледяные балки, находящиеся под действием сравнительно небольшой статической нагрузки, при вынужденных колебаниях в большинстве случаев разрушаются. Наибольшее дополнительное динамическое напряжение, которое выдерживала ледяная балка, не разрушаясь достаточно длительное время (10 млн. циклов) при температуре минус $5-9^\circ$ и находясь под действием статической нагрузки, вызывающей максимальное напряжение $2,5 \text{ кг/см}^2$ (при пределе прочности в 16 кг/см^2), было приблизительно равно

1,5 кг/см². Наименьшее дополнительное динамическое напряжение, выше которого балки разрушались почти мгновенно, было примерно равно 2,75 кг/см². Таким образом, предел прочности при динамическом воздействии нагрузки уменьшался в 3—4 раза.

Характер деформации при ударе зависит от скорости действия нагрузки (удара). Малая скорость удара вызывает лишь упругие деформации. При возрастании скорости удара наблюдаются упругопластические деформации, и наконец наступает хрупкое разрушение. Вопросы сопротивления льда ударной нагрузке изучены еще недостаточно.

ЛИТЕРАТУРА

- Альтберг В. Я. Силы смерзания льда с некоторыми веществами. Тр. Гос. гидролог. ин-та, вып. 4 (58), 1958.
- Арнольд-Алябьев В. И. Исследования прочности льда финского залива в 1923, 1927 и 1928 гг. Изв. Глав. геофиз. обсерватории, № 2, Л., 1929.
- Берденников В. П. Изучение модуля упругости льда. Тр. Гос. гидролог. ин-та, вып. 7 (61), 1948.
- Бессонов Е. А. Изд-во Томского технол. ин-та, т. 43, 1923.
- Бутягин И. П. Исследование прочности ледяного покрова р. Оби в весенний период. Метеорология и гидрология, № 3, 1955.
- Бутягин И. П. О прочности ледяного покрова при изгибе. Тр. Трансп.-энерг. ин-та, вып. V, Новосибирск, 1955.
- Бутягин И. П. О прочности ледяного покрова при срезающих усилиях. Тр. Трансп.-энерг. ин-та, вып. VII, Новосибирск, 1958.
- Васенко Б. П. Лед. Сб. Ин-та инж. путей сообщ. Вып. I, СПб., 1899.
- Вейнберг Б. П. О внутреннем трении льда. Ж. русск. физ.-хим. о-ва, т. 38, вып. 3—6, 1906.
- Вейнберг Б. П. Влияние температуры на механические свойства речного льда. Изв. Глав. геофиз. обсерватории, № 2, Л., 1929.
- Вейнберг Б. П. Лед. Гостехтеориздат, 1940.
- Войтковский К. Ф. Расчет сооружений из льда и снега. Изд-во АН СССР, 1954.
- Войтковский К. Ф. Докл. АН СССР, т. 110, № 3, 1956.
- Войтковский К. Ф. Экспериментальные исследования пластических свойств льда. «Сезонное промерзание грунтов и применение льда для строительных целей», Изд-во АН СССР, 1957.
- Вялой С. С. Длительная прочность вечноммерзлых грунтов и допущения на них давления. Тр. Игарской научн. исслед. мерзлотной станции, Изд-во АН СССР, 1954.
- Вялой С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. Докт. дисс. филоз. ин-та мерзотоведения АН СССР, М., 1956.
- Донченко Р. В., Шульман А. Р. Начальные стадии деформации льда. Тр. Гос. гидролог. ин-та, вып. 16(70), 1949.
- Иванов К. Е., Лавров В. В. Об одной особенности механизма пластической деформации льда. Ж. техн. физ., т. XX, вып. 2, 1950.
- Иванов К. Е., Шульман А. Р., Кобенко П. П. Деформации

- ледяного покрова при движении грузов. Ж. техн. физ. т. XIV, вып. 3, 1946.
- Карташкин Б. Д. Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда. Тр. ЦАГИ, № 607, 1947.
- Кобяко П. П., Шискин Н. И., Марей Ф. И., Иванова Н. С. Пластическая деформация и вязкость льда. Ж. техн. физ. т. XXI, в. 3, 1946.
- Комаровский А. Н. Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод. Госэнергоиздат, 1932.
- Коржавин К. Н. Наблюдения над изменением прочности льда р. Обь у г. Новосибирска к периоду весеннего ледохода 1934 г. Тр. НИВИТ, в. III, Томск, 1933.
- Коржавин К. Н. Исследование механических свойств льда. Тр. НИВИТ, Новосибирск, 1940.
- Коржавин К. Н. Воздействие льда на опоры мостов. Докт. дисс., М., 1951.
- Коржавин К. Н. Воздействие льда на опоры мостов и гидротехнических сооружений. Тр. Трансп.-энерг. ин-та, вып. V, Новосибирск, 1955.
- Лавров В. В. Вязкость льда в зависимости от температуры. Ж. техн.-физ., т. XVII, в. 9, 1947.
- Лавров В. В. Докл. АН СССР, т. 122, № 4, 1958.
- Линьков Е. М. Упругие свойства льда и методы их изучения. Вестн. Ленингр. ун-та, серия физ. и хим. № 16, вып. 3, Л., 1957.
- Неронов Ю. Н. К вопросу о величине временного сопротивления на изгиб весеннего тающего льда. Материалы к вопросу о ледовых переправах. Гидрометеониздат, 1946.
- Орлов Ф. Ф. Прочность льда р. Оки на изгиб. Тр. Горьков. ин-та инж. водн. транспорта, т. VII, Речиздат, 1940.
- Педдер А. Ю. Определение прочности льда р. Ангара. Ж. геофиз. и метеорол., т. VI, вып. 1, 1929.
- Пинегин В. Н. Предварительное сообщение об исследованиях прочности речного льда в связи с температурными изменениями. Вестн. Сиб. инженеро-в, т. IV, № 5, Томск, 1923.
- Пинегин В. Н. Об изменениях модуля упругости и коэффициента Пуассона у речного льда при сжатии. Наука и техника, орг. Одесс. ИТО ВСНХ, № 3—4, 1927.
- Савельев В. А. Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоемов. Докт. дисс., фонды ин-та мерзлотоведения АН СССР, М., 1953.
- Савельев В. А. Изучение механических и физических свойств льда (руководство). Изд-во АН СССР, 1957.
- Сергеев В. Н. Устройство зимней переправы вагонов по льду и работа ледяного слоя под действием нагрузки. Ледяные переправы. Сборник отд. инж. техн. НКПС, № 18, М., 1929.
- Соколов Н. А. Ж. прикл. физ., 3, 1926.
- Филиппова Л. И., Шульман А. Р. О релаксации напряжений во льду. Тр. Гос. гидролог. ин-та, вып. 16 (70), 1949.
- Ханина С. К., Шульман А. Р. Изучение течения естественных льдов. Тр. Гос. гидролог. ин-та, вып. 16 (70), 1949.
- Хомичевская Л. С. О временном сопротивлении сжатию вечных мерзлых грунтов и льда естественной структуры. Тр. комит. по вечной мерзлоте, т. X, Изд-во АН СССР, 1940.

- Цытович Н. А. и Сумгин М. И. Основания механики мерзлых грунтов. Изд-во АН СССР, 1937.
- Шишов Н. Д. О прочности льда. Метеорология и гидрология, № 2, 1947.
- Шульман А. Р. Текучесть поликристаллического льда. Тр. гос. гидролог. ин-та, вып. 7 (61), 1948.
- Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. Изд-во АН СССР, 1955.
- Brockamp B. und Mothes H. Seismische Untersuchungen auf dem Pasterze-Gletscher. Zs. für Geophysik, VI, H. 8, 1930 (482—500).
- ✓ Deeley R. M. The viscosity of ice. Proc. Roy. Soc., v. 81, N A547, 1908 (250—259).
- ✓ Ewing M., Crary A. P. and Thorne A. M. Propagation of elastic waves in ice. Physics, v. 5, N 6, 1934 (165—168).
- Gerard J. A., Perutz M. F., Roch A. Measurement of the velocity distribution along a vertical line through a glacier. Proc. Roy. Soc. A 213, N 1115, 1952.
- ✓ Glen J. W. Experiments of the deformation of ice. J. Glaciology, v. 2, N 12, 1952.
- ✓ Glen J. W. and Perutz M. F. The growth and deformation of ice crystals. J. Glaciology, v. 2, N 16, 1954 (397—403).
- ✓ Glen J. W. The creep of polycrystalline ice. Proc. Roy. Soc. ser. A, v. 228, N 1175, 1955 (519—538).
- Haeffeli R. Observation on the quasi-viscous behavior of ice in a tunnel in the Zmutt Glacier. J. Glaciology, v. 2, N 12, 1952.
- Hess H. Elasticität und innere Reibung des Eises. Ann. der Physik, Leipzig, B. 8, 1902 (405—431).
- ✓ Jellinek H. and Brill R. Viscoelastic properties of ice. J. appl. physics, v. 27, N 10, 1956 (1198—1209).
- Koch K. R. Über die Elastizität des Eises. Ann. der Physik, Leipzig, B. 41, 1913 (709—727); B. 45, 1914 (237—258).
- Lagally M. Die Zähigkeit des Gletschereises und die Tiefe der Gletscher. Zs. für Gletscherkunde, Leipzig, B. XVIII, 1930.
- Mc Connell J. C. Proc. Roy. Soc., 49, 1891 (323).
- ✓ Nakaya U. Viscoelastic properties of snow and ice in Greenland Ice Cap. The deformation of single crystals of ice. Symposium of Chamonix «Physics of the movement of the ice», Belgique, 1958 (199—212, 229—240).
- Owston F. G. and Lonsdale K. J. Glaciology, v. 1, N 3, 1948 (118).
- ✓ Rigby G. P. Effect of hydrostatic pressure on velocity of shear deformation of single ice crystals. J. Glaciology, v. 3, N 24, 1958 (273—278).
- Røyen N. Istryck vid temperatur höjningar. Hyllminskrift, Stockholm, 1922.
- ✓ Shoenky P. A. The mechanism of ice straining and its recrystallization. Symposium of Chamonix «Physics of the movement of the ice», Belgique, 1958 (244—248).
- ✓ Steinemann S. Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals. J. Glaciology, v. 2, N 16, 1954 (404—412).
- ✓ Vialov S. S. Regularities of ice deformation. Symposium of Chamonix «Physics of the movement of the ice», Belgique, 1958 (383—391).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Строение и физические свойства льда	5
Глава II. Основные закономерности деформирования льда	13
Глава III. Упругие свойства льда	34
Глава IV. Ползучесть льда	47
Глава V. Предел прочности льда	79
Литература	97

Кирилл Феофанович Войтковский

Механические свойства льда

*Утверждено к печати Северо-Восточным отделением Академии наук СССР
мерзлотоведения им. В. А. Обручева Академии наук СССР*

Редактор издательства И. Н. Николаева
Технический редактор И. Ф. Козальская

РИСД АН СССР № 18-1011. Сдано в набор 30.V.1960 г. Подписано к печати
1.VIII.1960 г. Формат 84×108₁₆. Печ. л. 9₁₆. Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 4,7.
Тираж 1600 экз. Т-1201. Изд. № 4110. Тка. экз. № 145.

Цена 3 руб. 30 коп., с 1/1-61 г. — 32 коп.

Издательство Академии наук СССР, Москва, Б-62, Подосенский пер., 21

За типографию Изд-ва Академии наук СССР, Москва, Н. Багманова, 21.

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
	2 стр.	пунктирной линией	кривой
57	8 стр.	7 ₀	7 ₀
	11 стр.	7 ₀	7 ₀
60	18 стр.	повышения	превышения

К. Ф. Войтковский