

50X1-HUM

**Page Denied**

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ГОД  
1957—1958  
ANNÉE GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE

**ИЗУЧЕНИЕ  
МЕХАНИЧЕСКИХ  
И ФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ЛЬДА**

РУКОВОДСТВО



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР  
Москва—1957

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ГОД  
1957—1958  
ANNEE GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE

ИЗУЧЕНИЕ  
МЕХАНИЧЕСКИХ  
И ФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ЛЬДА

РУКОВОДСТВО

*Study of mechanical  
and physical properties  
of ice  
Manual*

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР  
Москва—1957

## ОТ СОСТАВИТЕЛЯ

Настоящая работа имеет целью изложить наиболее существенные методы изучения строения, фазового состава, термических и механических свойств льда и отчасти снега.

При изучении льда необходимо учитывать все факторы, влияющие на его свойства. Основными из них являются тепловой режим, миграция вещества в жидком, газообразном и даже в твердом состоянии, строение, пористость и фазовый состав.

При изучении механических свойств льда необходимо знать структуру его, так как прочность кристалла льда проявляется резко выраженную анизотропию. Кроме того, механические свойства в значительной степени определяются содержанием во льду незамерзшей воды (рассола) и наличием пор. Фазовый и химический состав льда в свою очередь зависят от температурного режима и процессов миграции. Какие из указанных факторов и в какой мере оказывают доминирующее влияние на изучаемое свойство, специально определяется в каждом конкретном случае, поскольку условия формирования, влияние окружающей среды, интенсивность процессов для разных видов льда отличаются друг от друга.

Руководство подготовлено  
рабочей группой по гляциологии  
Межведомственного комитета  
по проведению Международного геофизического года

Ответственный редактор  
доктор географических наук проф. В. А. Кудрявцев

Составитель  
доктор геолого-минералогических наук проф. Б. А. Савельев

## 1. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛЬДА

Анизотропия прочности ледяного покрова связана с кристаллографической ориентировкой кристаллов, составляющих ледяной покров, с количеством и формой воздушных пор, прожилков рассола, включений обломков горных пород, прослоек мелкозернистого материала и др.

Только при отчетливом представлении пространственного расположения кристаллов, пор, минеральных прослоек, включений и прожилков рассола представляется возможным выяснить природу различного рода упругих, пластических и хрупких деформаций. При изучении структуры льдов ставится задача определить размеры, формы, взаимное расположение и кристаллографическую ориентировку кристаллов и их пространственное размещение вместе с включениями.

Осуществить это можно двумя способами:

- 1) выявлением структуры путем избирательного таяния,
  - 2) изучением структуры в поляризованном свете.
- В первом случае можно использовать солнечную радиацию, применяя искусственное облучение или обменное прогревание током высокой частоты. Проявление структуры можно произвести, если воздействовать током высокого напряжения или резко понижая температуру, применяя для этих целей жидкий азот. Указанными методами можно изучить поверхность и объем образца или выделять отдельные кристаллы для дальнейших исследований.
- Вторым способом, применяя поляризованную фотографическую установку и поляризационный микроскоп в сочетании со столиком Федорова, можно измерить размеры кристаллических зерен, воздушных пор и прожилков с рассолом, а также определить кристаллографическую ориентировку кристаллов.

## ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ

Когда поверхность льда подвергается облучению солнечными лучами или на близком расстоянии (5—10 см) электролампы мощностью 1000 вт и более при температуре льда, близкой к 0°, в результате неравномерной интенсивности таяния на поверхности возникают контуры кристаллов.

Возникновение этих контуров объясняется различной степенью поглощения лучистой энергии минерализованными прослойками и самими кристаллами.

Прослойки, окружающие кристаллы, являясь лучшими поглотителями радиации и обладая более низкой температурой плавления, чем сам кристалл, тают раньше. Вследствие этого на гладкой поверхности льда возникает канавки, окаймляющие кристаллы.

Выявленную структуру можно сфотографировать в отраженном свете при помощи бинокулярной лупы с фотонасадкой; структурный узор можно также перенести на бумагу. Для этого на поверхность образца накладывается бумага и по ней производится растушевка мягким карандашом.





тонким крестом. Пластина помещается внутрь окуляра. Окуляр вставляется в тубус таким образом, чтобы одна из нитей линзы в плоскости симметрии микроскопа, а другая — перпендикулярно к ней. В окуляре № 2 или СССР 6х выдвигается пластина — микрометр (см. рис. 3). Она может иметь форму линейки (рис. 3, а), разделенную на 100 частей, или форму квадратной сетки, стороны которой разделены на 20 частей (рис. 3, б). При помощи линейки измеряется длина и сечение зерна, а сеткой пользуются для измерения площади.

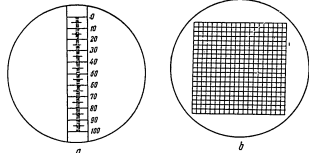


Рис. 3. Окуляр-микрометр  
а — линейный, б — сетчатый

Приведение микроскопа в рабочее положение. Пользуясь объективом, определяют общее увеличение микроскопа. Объект-микрометр помещается на столик так, чтобы линейка была параллельна вертикальной нити окуляра, и производится фокусировка. Рядом, на расстоянии четкой видимости, параллельно нити помещается объектная линза. Наблюдая одним глазом объект-микрометр, а другим — линзу, определяют увеличение. Предполагая, что 50 делений по объект-микрометру соответствуют 0,4 мм и равны 20 мк по линейке. В этом случае увеличение составляет  $50 (20 : 0,4 = 50)$ .

Перед началом наблюдений проверяется центровка микроскопа. Центровку следует производить с той степенью точности, с какой это необходимо для решения задачи. Образец обычно помещается в точку пересечения нитей окулярного креста, т. е. в центр поля зрения. При вращении столика образец не должен смещаться в сторону от точки пересечения нитей. Для этого необходимо центровать систему, т. е. совместить оптическую ось с осью вращения столика. Запятна на образце какою-нибудь выходящая точка и пересечения образцов, поставить эту точку на сечение нитей. Затем повернуть столик на 180°, отметить, насколько точка отбывает от креста. Раздвинуть на глаз это расстояние пополам и передвинуть туда образец. Тем самым точка образцов устанавливается на ось вращения столика. При помощи центрировочных винтов совмещают точку образцов с точкой пересечения нитей.

Иллюженные приемы центровки применимы при условии, если точка образцов при повороте столика на 180° не уходит за пределы поля зрения. Если реперная точка уходит за пределы поля, тогда следует вновь установить точку образцов на сечение нитей и произвести снова все операции, как описано выше. Затем необходимо наладить правильное освещение, т. е. совместить ось светового пучка с оптической осью системы микроскопа и добиться равномерной освещенности всего поля зрения. При открытом тубусе (без окуляра) и без анализатора устанавливается такой наклон зеркала, при котором в тубусе наблюдается изображение источника света в центре поля зрения. Наведение на фокус производится сначала вращением кремальеры, а при окончательной наводке — микрометрическими винтами. При фокусировке сильных объективов с малым фокусным расстоянием рекомендуется опустить тубус почти до образца и затем, медленно поднимая его, получить четкое изображение.

При работе с микроскопом необходимо вести наблюдение, держа оба глаза открытыми, иначе развивается астigmatизм. Выдающая четкость креста нитей осуществляется перемещением подвижной линзы окуляра. Для этой цели вынимается окуляр и линза перемещается над белым экраном до появления реального изображения креста нитей. Затем устанавливается перпендикулярность нитей. Для этого на столике близ центра поля зрения помещается предметное стекло с линейкой. Одна из нитей ориентируется параллельно одной из линий линейки предметного стекла, после чего поворачивая столик, достигают параллельности другой нити креста. Разность между двумя отсчетами должна быть равна 50°.

Последней операцией является установка шифра в срединное положение. Ее рекомендуется производить при слабом или среднем увеличении. Осветив поле зрения, включают анализатор и поворачивают анализатор до максимального затенения поля. В правильно установленном микроскопе шифры расположены так, что направления протекания или колебаний параллельны нитям окулярного креста. Чтобы убедиться в пра-

вильном расположении шифров, устанавливают кристалл с заводом прямым погасанием на столик в положение, при котором ребро кристалла совмещается с одной из нитей креста. При вращении анализатора поворачивают столик в обе стороны и находят, что максимальное погасание соответствует перпендикулярному положению кристалла. В поляризованном микроскопе вращающийся вокруг своей оси столик имеет сбоку поперек, позволяющий отсчитывать углы поворота с точностью до десятой доли градуса. В нужном положении столик можно закрепить.

Определение размеров зерна в шлифе. Используемые для кристаллографических исследований льда шифры должны иметь толщину от 0,4 до 0,8 мм. Для определения размеров зерен пользуются окуляр-микрометром (рис. 3). Он представляет собой стеклянную пластинку с нанесенной на нее шкалой, которая вставляется в окуляр. Окуляр-микрометр измеряет не сам предмет, а его изображение. Следовательно, для определения размеров зерен в миллиметрах необходимо знать цену деления шкалы. Она определяется при помощи объект-микрометра, представляющего собой стеклянную пластинку с нанесенной на нее шкалой, равной 2 мм и разделенной на 200 частей. Поместив объект-микрометр на столик микроскопа и сфокусировав микроскоп на его деления, увидим шкалу объект-микрометра, каждое деление которой равно 0,01 мм.

Шкалы объект-микрометра переключаются шкалой окуляр-микрометра. Сопоставляя их в поле зрения, можно определить, какому количеству делений по шкале объект-микрометра соответствует  $n$  делений окуляр-микрометра. Допустим, что 50 делений шкалы окуляр-микрометра соответствуют 200 делениям объект-микрометра. Тогда цена деления шкалы окуляр-микрометра определится так:  $\frac{200}{50} \cdot 0,01 = 0,04$  мм.

Необходимо определить цену деления окуляр-микрометра для каждой комбинации объектива с окуляром. До того, как приступить к измерениям отдельных зерен, устанавливают размеры шифра. Для этого используется специальное приспособление, называемое салазками. Салазки прикрепляются к столику микроскопа двумя винтами. В салазках имеются зажимные планки, между которыми помещается предметное стекло со шифром. Пользуясь двумя подвижными винтами салазок, можно перемещать шифр в любом направлении в плоскости столика. Наряду с этим можно производить перемещение строго по прямой в заданном направлении.

Один край шифра следует совместить с нитью окулярного креста и отсчитать начальное положение, затем передвинуть шифр параллельно измеряемой длине до совмещения противоположного края с этой же нитью и произвести второй отсчет. Разность отсчетов по поперечнику дает искомую длину шифра. Подобным же образом измеряют и ширину шифра.

Если линейные размеры шифра больше пределов, до которых раздвигаются салазки, то длину измеряют при помощи промежуточной реперной точки. На шифре выбирают отчетливо выраженную точку и производят измерение в два этапа: от начала шифра до реперной точки и от этой точки до противоположного конца шифра. На измеренной площади подсчитывается общее количество кристаллов. При определении размеров зерен, имеющих неправильную форму, необходимо указывать длину и ширину, а для зерен неправильной формы — средний размер в поперечнике. Не менее важно указывать наибольший и наименьший размеры зерен.

Определение размеров зерен при помощи окуляр-микрометра производится следующим образом: зерно располагается в поле зрения так, чтобы на одном его крае начиналась шкала, а вся измеряемая сторона помещалась внутри шкалы. Положим, что измеряемая сторона зерна имела 32 деления. Зная цену деления шкалы, равную 0,04 мм, получим истинный размер зерна:  $32 \times 0,04 = 1,28 = 1,3$  мм.

В случае, если зерно не укладывается в шкалу, измерение производят в два этапа. Для этого выбирают промежуточную реперную точку и измерение

ведут до нее, а затем передвигают начало шкалы в эту точку и производят отсчет от реперной точки до конца кристалла. Общй размер получается в результате суммирования двух отсчетов.

Измерение площадей кристаллов льда и инородных включений во льду. Измерение площадей производится с целью определения содержания посторонних включений во льду. Для этого применяют квадратно-клетчатый окуляр-микрометр. Исходя из положения Денеса, имеем:

$$v_1 : v_2 : v_3 = n_1 S : n_2 S : n_3 S,$$

где  $v_1, v_2, v_3$  — объемы зерен и включений во льду;  
 $n_1, n_2, n_3$  — число ячеек квадратно-клетчатого окуляр-микрометра, приходящихся на долю каждого компонента;

$S$  — площадь одной квадратной ячейки микрометра.  
 Предположим, что шифр содержит три различных компонента, а именно: зерна льда, пузырьки воздуха и явочки с рассолом. Их процентное соотношение можно выразить так:

$$\frac{n_1 \cdot 100}{Zn} : \frac{n_2 \cdot 100}{Zn} : \frac{n_3 \cdot 100}{Zn},$$

где  $Zn$  — число клеток в исследуемом шифре. Подсчет площадей делается так: стороны шифра, укрепленного в салазках, совмещают соответственно с вертикальной и горизонтальной нитями креста окуляра. Производят измерения всегда в одинаковом порядке. Например, начиная с верхнего левого угла, двигаясь вправо, вниз и налево и т. д.

Допустим, что вся площадь шифра равняется 400 мм<sup>2</sup>, из этой площади на долю льда приходится 360 клеток, т. е.  $\frac{360 \cdot 100}{400} = 90\%$ , на долю воздушных пор падает 30 клеток или  $\frac{30 \cdot 100}{400} = 7,5\%$  и прожилки занимают 9 клеток, т. е.  $\frac{9 \cdot 100}{400} = 2,2\%$ .

Окончив подсчет на этой площади шифра, перемещаемся на соседнюю, руководствуясь реперными точками. Производим таким путем измерение всей площади, находим средний процент для каждого составляющего. При подсчете могут происходить небольшие ошибки за счет неполных клеток. Выработав стандартный способ подсчета, эту погрешность можно свести к минимуму.

Измерение толщиной зерен в шифре. Если у микрометрического винта микроскопа имеется шкала с установленной ценой деления, то можно измерить толщину зерен ледяного шифра с допустимой погрешностью. Для этого подбираться объектив с глубиной фокуса, соответствующей толщине шифра. При помощи микрометрического винта микроскоп фокусируется на верхнюю зерно и отмечается положение по шкале. Затем он фокусируется на нижнюю точку зерно, и опять делается отсчет по шкале. Разность в отсчетах, умноженная на цену одного деления, выраженного в миллиметрах, дает кажущуюся толщину зерно  $h_1$ . Истинная толщина  $h$  равна кажущейся, умноженной на показатель преломления льда  $n_1$ ,  $h = h_1 \cdot n_1$ . Показатель преломления подсчитывается как отношение синусов углов падения и преломления, т. е.  $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ .

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ КРИСТАЛЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ**

Одноосные кристаллы. Используя сходящийся свет, возможно определить ориентировку кристаллов в шифре, отннчить одноосный кристалл от двуосного, распознать разрез индикатрисы и установить ее оптический знак. Сходящийся свет получается с помощью короткофокусной линзы Л<sub>2</sub>. Фокус сходящегося луча света находится в исследуемом кристалле, выходя из которого пучок света превращается в расходящийся пучок. Чтобы уловить расходящийся пучок, применяют короткофокусный

объектив. Пучок лучей рассматривается в увеличенном виде, для чего используют линзу Вернера в сочетании с соответствующим окуляром.

Во время наблюдения одноосных кристаллов возникает характерная интерференционная картина при прохождении луча через плоскость шифра, перпендикулярную к оптической оси кристалла. В фокальной плоскости объектива возникает темный крест, ветви которого лежат на нитях окуляра, проектирующих главные сечения никелей (см. рис. 4). При вращении столика микроскопа крест не смещается, если его ось совпадает с осью оптической системы или занимает параллельное ей положение. Если оптическая ось кристалла наклонена под небольшим углом к плоскости шифра, то центр креста проектируется не в центре поля зрения, а несколько в стороне. При этом ветви креста остаются параллельными направлениям колебаний в никелях, а оптическая ось при вращении столика описывает конус вокруг его оси.

Крест пересекается концентрическими кольцами, окраска и густота которых меняется. В монохроматическом свете кольца имеют темную окраску, а в белом — цветную. Их концентрация к периферии увеличивается.

Полнение креста в поле зрения обусловлено способностью кристалла разлагать луч на два составляющие его луча: а) необыкновенный, с колебаниями в главном сечении (N<sub>0</sub>); он пересекает шифр по диаметру, проходящему через точку пересечения луча со шифром, и б) обыкновенный, с колебаниями в плоскости пластинки (N<sub>e</sub>) и перпендикулярно к тому же диаметру. И только падающий на шифр луч, направление которого совпадает с оптической осью кристалла, распространяется по ней, не претерпевая никаких изменений.

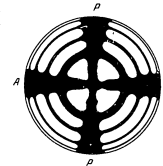


Рис. 4. Коноскопическая фигура одноосного кристалла. Плоскость разреза перпендикулярна к оптической оси

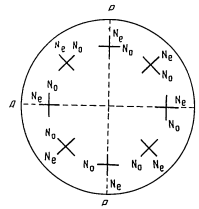


Рис. 5. Колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

Если одноосный кристалл имеет наклон оптической оси, то коноскопическая фигура в виде креста смещается вбок или исчезает. Тогда вместо цельного креста при вращении столика в противоположных квадратах поочередно

находятся в обратной зависимости от толщины шифра, от силы дугопреломления кристалла и от расстояния данного кольца от центра коноскопической фигуры.

Если одноосный кристалл имеет наклон оптической оси, то коноскопическая фигура в виде креста смещается вбок или исчезает. Тогда вместо цельного креста при вращении столика в противоположных квадратах поочередно



но появляются концы его ветвей. Передвигаясь, они сохраняют параллельность нитям окуляра. Разрезы, параллельные оптической оси, не имеют такой отчетливой конусообразной фигуры, как при перпендикулярном сечении. При вращении столика, в момент совпадения оптической оси с направлением колебания в каком-либо из николей, в поле зрения возникает широкий размытый крест. Если поворот продолжать, крест перейдет в мало отчетливую темно-серую гиперболу.

Д в у о с и ы е к р и с т а л л и. Двусосые кристаллы возникают в результате напряженности данного тела. Они дают характерную интерференционную картину в плоскости, перпендикулярной к острой бисектрисе. При параллельном положении осей индикатрисы данного разреза главным сечениям в поле зрения возникают две точки, окруженные кольцами, темными при монохроматическом освещении и спектрально окрашенными в

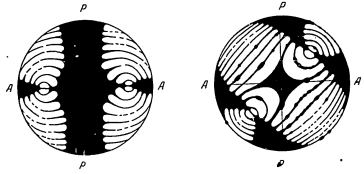


Рис. 6. Конусообразная фигура двусосого кристалла. Плоскость оптических осей совпадает с направлением колебаний поляризатора. Плоскость разреза перпендикулярна оптической оси

белом свете (см. рис. 6). Эти точки являются местами выхода оптических осей. Природа колец вокруг них та же, что и колец одноосных кристаллов. Отличие между ними состоит в том, что у двусосых кристаллов кольца не круговые, а имеют форму кривых, называемых **делинксаттами**.

При удалении от оптических осей делинксатты сближаются в единые общие кривые. Между основными точками возникает **темная фигура**, напоминающая крест. Балка такого креста, параллельная **тулой бисектрисе**, длиннее, чем поперечная балка. При вращении столика микроскопа форма тупого креста нарушается. Он превращается в **гиперболу**, вершины которой совпадают с выходами оптических осей и с **основными**, расположенными по направлению нитей окуляра, т. е. **главными сечениями** николей. Делинксатты при вращении столика сохраняются.

При односторонней ориентировке оптических осей, которая наблюдается в средних и нижних слоях ледяного покрова **трещиных** водоемов, нередко из-за неясности контуров возникает **трудность** в определении их числа. В таких случаях постоянство конусообразной фигуры каждого кристалла в поле зрения микроскопа и малейшее **перемещение** креста свидетельствуют о появлении в поле зрения нового кристалла. **Малейшее** смещение креста, о появлении в поле зрения нового кристалла, **соответствует** числу кристаллов с оптическию осью примерно перпендикулярной **плоскости** шлифа<sup>6</sup>.

Измерение угла между **длинами** под микроскопом. Перемещая образец до тех пор, пока вершина измеряемого угла не приблизится к центру поля, **устанавливают** одну из сторон этого

угла параллельно одной из нитей креста и отсчитывают по лимбу положение столика. Затем, вращая столик, достигают параллельности между второй стороной угла и той же нитью и делают снова отсчет по лимбу. Разность в отсчетах равна измеряемому углу.

Для измерения нового угла образец переводят до положения, при котором вершина этого угла окажется вблизи центра поля зрения, и производят измерения указанным выше способом.

Измерение угла спайности. При различных деформациях в ледяном шлифе появляются трещины по плоскости спайности кристаллов. Угол между плоскостями спайности является важным признаком, по которому можно судить о классификации кристаллов. При этом необходимо выбирать такие трещины, в которых плоскости спайности расположены вертикально к плоскости шлифа. Если трещина рассекает образец косо относительно поверхности шлифа, то измерение угла между трещинами может быть неточным из-за смещения верхней линии трещины относительно нижней. При этом погрешность возрастает с увеличением толщины шлифа.

Вертикальные трещины легко отличить от наклонных. Характерным их признаком является то, что они кажутся более узкими, чем наклонные. Для определения при большом увеличении, пользуясь микрометрическим винтом, поднимают и опускают тубус микроскопа. Вертикальные трещины остаются на месте, а наклонные смещаются в сторону. Измерение угла спайности производится так же, как измерение угла между ребрами.

Измерение угла погасания. Угол, образованный какой-либо кристаллографической осью в кристалле с одной из осей оптической индикатрисы  $N_2$ ,  $N_3$  или  $N_4$  называется углом погасания. В различных сечениях льда он обычно измеряется относительно трещины спайности, ограниченной и удлинения. Прямое, или полное, погасание наступает, когда какое-либо главное кристаллографическое направление кристалла, параллельное одной из осей **залика**, совпадает с сечением николей. В кристалле льда с разрезом, перпендикулярным оптической оси, наблюдается симметричное погасание. Оно заключается в том, что направление погасания **делит** пополам угол, образованный линиями равнозначных кристаллографических направлений. Выполнив объектив №3 и анализатор, можно произвести фокусировку микроскопа на ребро, или след грани, или на трещинную спайность, относительно которых измеряется угол.

Поворачивая столик микроскопа, совмещаем данное кристаллографическое направление с одной из нитей окулярного креста и берем отсчет по лимбу столика. Затем вращаем столик, пока не произойдет полное погасание и вторично отсчитываем по лимбу. Разность отсчетов и является искомым углом погасания.

Следует заметить, что не всегда удается точно уловить максимальное погасание. Для уменьшения погрешности рекомендуется определять момент погасания как среднее из двух отсчетов. Первый отсчет полного погасания производится при вращении столика по часовой стрелке, а второй — при вращении против часовой стрелки. Проверка точности осуществляется поворотом николя на **небольшой** угол в обе стороны. Одинаковое просветление поля свидетельствует о точном определении.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАКА УДЛИНЕНИЯ КРИСТАЛЛА

Оптически знаком данного разреза кристалла называется ориентальное расположение присутствующих в нем осей индикатрисы. Расположив два кристалла на столике один над другим в положение, при котором колебания в них направлены параллельно, можно получить один из двух вариантов. Если совпадают одинаковые оси обоих кристаллов (т. е. совпадают как направления колебаний, так и показатели преломления данного сечения индикатрисы), то мы наблюдаем **прямую параллельность**. Если же совпадают разноименные оси данного сечения индикатрисы, то мы наблюдаем **обратную параллельность**.

<sup>6</sup> Способ предложен Б. А. Савельевым.

В случае прямой параллельности разности хода, приобретаемые светом при прохождении через оба кристалла, равны сумме скоростей первого и второго кристалла. При обратной параллельности разности хода происходит их вычитание. Если наблюдается обратная параллельность разности хода обоих кристаллов, то наступает полное погасание (темнота).

При положительном удлинении кристалла по его длине совершаются колебания луча, имеющего большой показатель преломления. В случае, когда по длине кристалла колеблется луч с меньшим показателем преломления, это означает, что кристалл обладает отрицательным удлинением. Знак удлинения определяется двумя способами: методом компенсации при помощи кварцевого клина и при помощи так называемых пробных пластинок.

Определение знака одноосного кристалла осуществляется так. Кристалл помещают на столик и поворотом его устанавливают максимальное погасание, которое соответствует параллельности колебаний в кристалле колебаниям в николах. Затем поворачивают столик на  $45^\circ$  и вставляют кварцевый клин в специальную прорезь в микроскопе. Если при продвижении клина интерференционная окраска повышается, значит разность хода кристалла прибавилась к разности хода клина, т. е. имеет место прямая параллельность. В случае обратной параллельности по мере продвижения клина вперед наблюдается понижение интерференционной окраски, поскольку при этом разность хода клина вычитается из разности хода кристалла. Понижение интерференционной окраски имеет максимум погасения, который соответствует моменту полной компенсации, т. е. равенству разности хода кристалла и разности хода клина. Дальнейшее продвижение клина вновь приводит к повышению окраски. В таком состоянии клина и кристалла разность хода клина становится больше разности хода кристалла.

Обычно вдоль клина кварца расположена ось с большим показателем преломления. Она обозначается  $N_x$ . На клине имеется ориентир, указывающий расположение осей, зная которые, нетрудно определить расположение осей в кристалле. Наиболее точное определение достигается при обратной параллельности клина и изучаемого кристалла. В этом случае возможно подобрать (компенсировать) разность хода клина, равную разности хода кристалла и клина, а при желании можно получить обратную. Это достигается поворотом столика на  $90^\circ$  от первоначального положения.

При работе с кварцевым клином следует избегать сильного освещения, так как оно уменьшает резкость компенсации. Параллельность и ослабление света осуществляется уменьшением диафрагмы. Характер параллельности может быть установлен также по изменению цветов в кристалле. Если при продвижении клина тонким концом вперед кристалл из синего становится красным, то именно обратная параллельность, а если из красного становится синим, то параллельность прямая.

Когда изучаемый кристалл уменьшается в толщине от центра к краям, то под микроскопом при скрепленных николах на поверхности кристалла наблюдаются интерференционные полосы, наименьшие свой цвет от более низких окрасок на краях к более высоким в центре. При продвижении кварцевого клина тонким концом вперед окраски могут повышаться или понижаться. Для первого случая будет иметь место прямая параллельность, для второго — обратная. Можно заметить, что при прямой параллельности концы интерференционного — обратная. Можно заметить, что при прямой параллельности концы интерференционного — обратная. Можно заметить, что при прямой параллельности концы интерференционного — обратная. Можно заметить, что при прямой параллельности концы интерференционного — обратная.

Пользуясь этим способом не нужно брать отсчеты по лимбу столика, ставить кристалл на погасание и располагать направление колебаний под углом  $45^\circ$ , как это делалось при компенсационном методе. При обратной параллельности кристалла и кварцевого клина лучше заметны пересечения цветных полосок.

Другой способ определения знака кристалла осуществляется при помощи гипсовой пластинки, которая, будучи вставлена в тубус микроскопа между николами, принимает красно-фиолетовую окраску с длиной волны порядка 550 нм. Эта окраска указывает на видную определения знака удлинения кристаллов, обладающих низкой разностью хода первого порядка.

При расположении кристалла параллельно пластинке получается один из цветов зоны второго порядка, а при обратной параллельности — один из цветов зоны первого порядка. В первой зоне имеются синий и белый цвета, отсутствующие во второй, а во второй зоне — синий, желтый и зелено-желтый, отсутствующие в первой. Появление одного из этих цветов позволяет определить параллельность, имеющую место в данном положении кристалла. Чтобы определить параллельность, достаточно перевернуть пластинку и вновь вставить ее в микроскоп.

На гипсовой пластинке имеются ориентиры, указывающие расположение осей и позволяющие определить знак удлинения кристалла. Для кристаллов с различными сечениями (в видеф ляда) можно установить связь между знаком удлинения и оптическим знаком кристалла. Для кристаллов средних сингоний в оптических положительных с главною осью симметрии совпадает ось вращения индикатрисы  $N_x$ , а в отрицательных отрицательных — ось вращения  $N_y$ . Таким образом, если кристаллы удлинены по главной оси, знак удлинения и оптический знак кристалла совпадают, если кристаллы сплюснуты по главной оси (что встречается значительно реже у льдов водного образования), то знак удлинения будет обратной оптическому знаку кристалла.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДИКАТРИСЫ ПРИ ПОМОЩИ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТОЛΙΚА ФЕДОРОВА\*

Процесс кристаллооптических измерений при помощи универсального вращающегося столика сводится к отысканию плоскостей симметрии индикатрисы. При помощи столика Федорова можно измерить угол выхода оптических осей и величину показателей преломления. Пользуясь оптическими компенсаторами, определяют оптический знак кристаллов. Прибор дает возможность придавать шлифу требуемое положение в пространстве и тем создавать любую ориентировку сечения индикатрисы кристалла фактической плоскостью объектива.

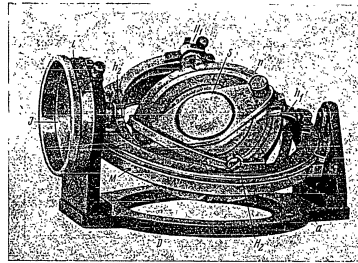


Рис. 7. Столик Федорова:

$D$  — основание столика,  $I$  — горизонтальная ось,  $i$  — лимб для отсчета угла поворота по оси  $I$ ,  $N_x$ ,  $N_y$  — главные оси  $N_x$ ,  $N_y$  — душка с делениями для отсчета поворота вокруг оси  $N_x$ ,  $N_y$  — круг, вращающийся вокруг оси  $N_x$ , перпендикулярной к оси  $I$ ,  $a$  — круг, вращающийся вокруг оси  $N_x$ ,  $S$  — стеклянный элемент.

Универсальный столик укрепляется на предметном столике поляризационного микроскопа с помощью двух винтов, вставляемых в специальные гнезда. Имеются универсальные столики двух систем — литые и четырехосные. Конструкция пятносного столика ускоряет работу, поскольку он в ряде случаев позволяет измерять углы без нанесения кристаллографических направлений на стереографическую проекцию. Так как определение кристаллографических параметров ледяных кристаллов вполне обеспечивается четырехосным универсальным столиком, можно ограничиться его описанием.

Столик состоит из стойки (см. рис. 7) с кольцом  $M$ , вращающимся вокруг горизонтальной оси  $I$ . Вращение по оси  $I$  фиксируется с помощью винта  $i$ , укрепленного на боковом выступе столика. Внутри кольца  $M$  прикреплено кольцо  $N$ , вращающееся на оси  $N_x$  перпендикулярной оси  $I$ . На кольце  $N$  укреплен круг, ось вращения которого перпендикулярна к плоскости шлифа. На краю круга имеется метка для отсчета угла поворота по делениям, нанесенным на кольце  $N$ . В центре круга находится отверстие

\* Прибор, предложенный Е. С. Федоровым в 1893—1894 гг.

стве, куда вкладывается стеклянная полусфера. На ней при помощи верхней полусферы дуэма крепления винтами укрепляется шлиф. Для создания плотности контакта шлифа и стеклянных полусфер и для получения примерно единого показателя преломления системы используют в качестве промежуточной жидкости глицерин. Таким образом, конструкция универсального столика позволяет вращать шлиф в плоскости  $M$  и наклонять около оси  $I$ , вращать в плоскости  $N$  и наклонять около оси  $H$ .

Кроме того, возможно вращение столика вместе с платформой микроскопа. Все изменения положения объекта, осуществленные поворотом вокруг осей  $I$  и  $H$  и в плоскостях  $M$  и  $N$ , могут быть измерены на соответствующих лимбах. Изменение наклона около оси  $H$  осуществляется двумя подвижными дужками, укрепленными на кольце  $M$ . Все оси арретрируются в нужный момент соответствующими винтами. При работе со стеклянными шаровыми сегментами необходимо вносить поправку на то отклонение линзы в показателях преломления стекла и льда. Поправка на отклонение определяется следующим уравнением:

$$\sin \beta = \frac{N_g}{N_a} \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол, измеренный на столике,  
 $N_g$  — показатель преломления стекла относительно воздуха ( $N_g = 1,52$ ),  
 $N_a$  — показатель преломления льда относительно воздуха ( $N_a = 1,311$ ),  
 $\beta$  — истинный угол.

Для того чтобы вводить поправку и на изменение направления луча ввиду несходства показателей преломления у стекла и льда, следует пользоваться приведенной ниже таблицей перевода углов  $\alpha$ , измеренных на столике Федорова, в истинные углы  $\beta$ .

Таблица 1

Перевод измеренных на универсальном столике углов в истинные

$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
0	0	11	12,7	21	24,5	31	36,5	41	49,3	51	64,0
1	1,1	12	13,9	22	25,7	32	37,8	42	50,7	52	65,7
2	2,3	13	15,1	23	26,9	33	39,0	43	52,0	53	67,4
3	3,5	14	16,2	24	28,1	34	40,3	44	53,4	54	69,3
4	4,6	15	17,4	25	29,3	35	41,5	45	54,8	55	71,3
5	5,8	16	18,6	26	30,5	36	42,8	46	56,3	56	73,4
6	6,9	17	19,8	27	31,7	37	44,1	47	57,7	57	75,8
7	8,1	18	20,9	28	32,9	38	45,4	48	59,2	58	78,7
8	9,3	19	22,1	29	34,1	39	46,7	49	60,8	59	82,3
9	10,4	20	23,3	30	35,8	40	48,0	50	62,3	60,9	86,9
10	11,4	21	24,5	31	36,5	41	49,3	51	64,0		
11	12,7										

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ КРИСТАЛЛОВ ЛЬДА НА СТОЛИКЕ ФЕДОРОВА

Подготовка универсального столика заключается в его горизонтальной и вертикальной центровке. Горизонтальная центровка осуществляется при ослабленном положении винтов, укрепляющих столик Федорова на

столике микроскопа. Поворачивая столик в плоскости  $M$  по оси  $N$ , определяют смещение центра столика относительно центра поля зрения. Центрировка производится по характерной реперной точке шлифа, установленного на столике. После устранения этого смещения столик плотно зажимают креплениями винтами.

Вертикальная центровка производится при вынутом объективе и опущенном столике микроскопа. Кольцо  $M$  поворотом около оси  $I$  устанавливает в вертикальное положение до совмещения края кольца с центром поля зрения. Делается отчет по лимбу, затем кольцо поворачивается на поворота до совмещения края на противоположной стороне кольца с центром поля зрения и делается повторный отчет. Разность в отсчетах с соответствующим знаком дает поправку на вертикальную центровку столика. Приемы определения ориентировки оптической оси кристаллов льда были разработаны П. А. Шумским.

При работе с универсальным столиком употребляют трехкратные и шестикратные объективы или специальные длиннофокусные объективы с увеличением от 5 до 30. В зависимости от наклона оптической оси кристалла к оси микроскопа имеются несколько приемов измерений.

Если оптическая ось кристалла находится под углом, не превышающим  $50^\circ$  к оси микроскопа, то такая ориентировка находится в полярной области. Определение пространственного расположения оптической оси в этом случае заключается в следующем. Поворотом шлифа вокруг оси  $N$  достигается погасание исследуемого кристалла, затем вращаем его вокруг оси  $I$ . Если при этом погасание сохраняется, то шлиф возвращается в начальное положение.

Теперь задача заключается в установлении оптической оси кристалла в положение, параллельное оси микроскопа. Для этого вращаем столик от нулевого положения вокруг оси  $A$  на  $45^\circ$  и поворотом вокруг оси  $I$  достигаем погасания. Проверкой правильности ориентировки кристалла относительно оси микроскопа служит сохранение темноты при вращении столика вокруг оси  $A$ . После этого производятся отсчеты по осям  $I$  и  $N$ . В случае, если оптическая ось находится в экваториальной области, то при помощи столика Федорова осуществляется ее установка в положение, перпендикулярное оси микроскопа (плоскость индикатрисы параллельна оси микроскопа).

Измерения производятся в следующей последовательности. Поворачиваем шлиф вокруг оси  $N$  на  $90^\circ$  относительно исходного его положения, затем вращаем до погасания кристалла и вокруг оси  $I$  поворачиваем на  $30-35^\circ$ . В этом положении поворотом вокруг оси  $H$  осуществляется погасание, после чего по оси  $I$  поворачиваем шлиф в нулевое положение и производим отсчеты по осям  $N$  и  $H$ .

Некоторые затруднения в определении ориентировки оптических осей кристаллов льда встречаются в том случае, когда оптическая ось либо параллельна оси микроскопа, либо отклоняется на небольшой угол, и когда оптическая ось расположена почти в плоскости шлифа. В первом случае при вращении шлифа вокруг осей  $M$  и  $A$  поле сохраняется темным.

Определение ориентировки производится так. Поворачиваем столик вокруг оси  $I$  на  $15-20^\circ$ , находим погасание по оси  $N$  и записываем отчет. Затем поворачиваем на  $15-20^\circ$  по оси  $H$ , находим погасание по оси  $I$  и делаем отчет по оси  $I$ .

Во втором случае оба погасания по оси  $N$  сохраняются при вращении вокруг оси  $I$ . Определение начинается с установки погасания по оси  $N$ . Затем поворачиваем столик на  $15-20^\circ$  вокруг оси  $I$  и добиваемся погасания вращением по оси  $H$ . При сохранении погасания вокруг оси  $N$  производим отсчеты по  $N$  и  $H$ . Если погасание по оси  $N$  не сохраняется, то оно сохраняется при достижении компенсации по оси  $I$ .

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. ПОСТРОЕНИЕ СТЕРЕОГРАММ

Результаты измерений ориентировки кристаллов в ледяном шлифе наносятся на сетку Шмидта (рис. 8). Обычно она имеет 10 см в диаметре и бывает разбита меридианами и параллелями на равные площадки через каждые  $2^\circ$ . Пересечение оптической оси кристалла с нижней полушароидальной проекцией на сетку. Равноплощадная сетка позволяет при проектировании ориентировки кристаллов из сферы на плоскость подсчитывать количество оптических осей на единице площади без введения поправок.

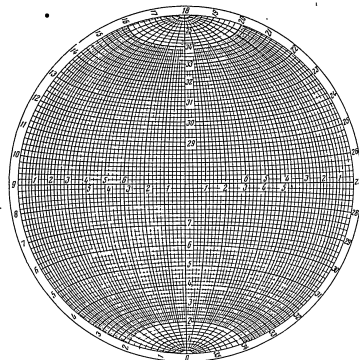


Рис. 8. Сетка Шмидта

Кальку накладывается на сетку Шмидта и закрепляется иглой в центре сетки. Затем на кальку наносится два полюса сетки. Для определения пространственного положения кристаллов льда в шлифе достаточно выяснить положение оптических осей в двух любых взаимно перпендикулярных плоскостях. Положение осей относительно третьей плоскости определяется геометрическим построением из первых двух. Одна из плоскостей характеризует выход оптических осей в полярном положении, другая соответствует осям в экваториальном положении. Точки в полярном положении наносят в такой последовательности:

- 1) поворачивают кальку от начального положения на угол, равный отсчету по оси  $N$ , отмечая его по большому кругу сетки;
  - 2) если измерение производилось по оси  $L$ , то от центра по меридиану откладывается величина измеренного угла.
- Если отсчет велся по оси  $H$ , то найденный угол откладывается от центра по экватору. Фиксация на сетку выхода оптических осей, ориентированных

18

в экваториальной области, производится аналогично вышеописанному, но отсчеты по осям  $L$  и  $H$  производятся от периферии к центру.

После нанесения на сетку Шмидта точек выхода оптических осей кристаллов в изучаемом шлифе льда производится определение концентрации точек, выражаемой в процентах по методу Е. А. Кузнецова. Для подсчета количества точек на диаграмме используются трафареткой, представляющей собой целлюлозную пластинку с вырезанным на ней кружком диаметром в 1 см. Диаметр проекции равен 10 см, следовательно, площадь кружка составляет 1/100 часть всей площади проекции.

Такое соотношение площадей проекции и круга трафаретки облегчает определение концентрации точек. При малом количестве измерений для ускорения подсчета используются трафаретки с большими просветами, равными 2, 3, 4 и более процентам площади проекции. Но наиболее удобной является трафаретка площадью в 1%.

При подсчете концентрации точек возможны три варианта. Первый, когда выделенная кругом трафаретки площадь лежит целиком внутри общей диаграммы. Второй, когда часть площади, ограниченная кругом трафаретки, выходит за границы окружности диаграммы. И третий вариант, когда точки лежат на самой окружности проекции.

Вначале производится процентная оценка всех точек, лежащих внутри диаграммы. Для этого применяются разнообразные способы. Можно рекомендовать начинать подсчет с верхнего левого квадранта, затем переместиться в верхний правый, в нижний правый и закончить нижним левым квадрантом проекции. Трафаретка устанавливается центром на пересечение жирных сантиметровых линий наверху первого квадранта и подсчитываются точки, попавшие внутрь круга. Вычисленный таким образом процент заносится в центр, около точки пересечения жирных сантиметровых линий сетки Шмидта. Затем передвигают трафаретку на один сантиметр вправо по жирной линии и производят второй отсчет. Эту операцию продолжают до тех пор, пока все точки, расположенные в сантиметровом радиусе около жирной горизонтальной линии, не будут проинтерполированы в пределах окружности диаграммы. После этого перемещают трафаретку ниже на один сантиметр и продолжают такой же подсчет, но уже справа налево.

Если часть площади, ограниченная кругом трафаретки, выходит за границы общей диаграммы, то для подсчета применяют двойную трафаретку, так называемый счетчик по периметру. Это целлюлозная пластинка, на концах которой вырезаны круги диаметром 2 см каждый. Центры кругов расположены на расстоянии 10 см друг от друга. Счетчик укреплается иглой в центре диаграммы и передвигается по кругу до совмещения центра круга трафаретки с интересующим нас местом пересечения жирных линий.

Число точек в обоих кругах трафаретки определяется независимо на то, куда попадет центр противоположного круга. Показания складываются, и их сумма представляется в точке пересечения сантиметровых линий первого круга.

Нанесение цифр на самой окружности диаграммы осуществляется следующим образом. Устанавливают центры окружности двойной трафаретки точно на окружность диаграммы. Затем выбирают в качестве исходной точку пересечения сантиметровых линий, лежащих вблизи окружности диаграммы, и подсчитывают число точек в обоих кругах. Сумма всех точек, выраженная в процентах, пишется в центрех кругов двойной трафаретки. Передвигнув трафаретку на 1 см в одну из сторон, повторяют ту же процедуру. Подсчет производится на протяжении  $180^\circ$  по окружности.

Затем проводят изолинии, соединяющие точки одинаковой плотности. Сначала обрисовывают контуры областей с наибольшей плотностью точек, а потом и всех остальных. Если по ходу движения изолинии отсутствуют

3\* 19

нужные плотности, то направление изолинии определяется интерполированием соседних значений плотностей до требуемой.

В процессе оконтуривания могут образоваться изолированные участки диаграммы. Если контурная линия пересекает окружность, то продолжать ее следует с точки, лежащей на диаметрально противоположном месте. Его можно найти при помощи счетной двойной трафаретки, используя ее центральную линию в качестве направляющей. Полученную таким путем

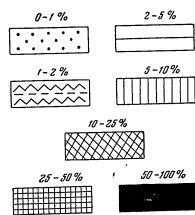


Рис. 9. Обозначения плотности оптических осей на стереограмме (по П. А. Шумскому)

то излишек отсчитывается в том же направлении, по той же параллели, но с противоположной стороны проекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Белякин. Кристаллооптика. Госгеотехиздат, М., 1949.
2. Е. А. Кузнецов. Краткий курс метода Федорова в петрографии. Московский университет, 1949.
3. В. Б. Татарский. Кристаллооптика и измеренный метод определения вещества. Ленинградский университет, 1942.
4. Л. И. Цукерман. Практическое руководство по микрофотографии. Металлургиздат, М., 1950.
5. П. А. Шумский. Основы структурного ледоведения. АН СССР, М., 1955.

II. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЛЬДА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ

Пористостью называется отношение объема воздушного промежутков, находящихся между кристаллами, к общему объему образца льда. Наиболее точным способом измерения пористости является гидростатическое взвешивание. Для этого применяются специальные гидростатические весы (см. рис. 10). На одной стороне коромысла вместо обычной высокой подвески прикрепляется чашечка с грузом, уравновешивающим второе плечо. На дне чашечки имеется крючок для крепления образца, а под ней устанавливается резервуар с керосином. Весы позволяют производить взвешивание с точностью до 0,01 г.

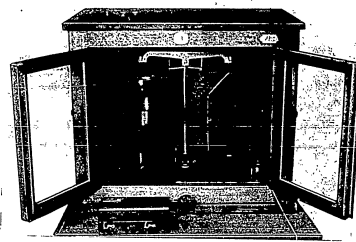


Рис. 10. Весы для гидростатического взвешивания

Перед каждой серией опытов необходимо определять плотность керосина. Это можно делать по изменению веса металлического шарика известного объема в воздухе и в керосине.



В качестве растворителя необходим спирт-ректификат точно установленной крепости или несмешанный при  $-20^\circ$  раствор хлористого кальция с известным титром.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДЯНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Откалывают кусочки льда, приготовленного из дистиллированной воды, весом примерно 2—3 г, помещают в металлический бокс и взвешивают. Бокс с образцом устанавливается в ультратермостат с постоянной отрицательной температурой, рядом помещается колба с растворителем. Охлаждающая жидкость в ультратермостате при помощи циркуляционного насоса перетекает через внешнюю оболочку термостата, внутри которого помещен сосуд Дьюара, предназначенный для опыта. Таким образом, охлаждающая жидкость, циркулирующая в системе ультратермостат — термостат, обеспечивает одинаковую температуру калориметрического сосуда Дьюара, образца и растворителя.

После того как был выдержан установленный срок в ультратермостате, приступают к непосредственному измерению. Пипеткой забирают 200 см<sup>3</sup> растворителя и переливают его в сосуд Дьюара. Чтобы избежать ошибки в результатах, необходимо производить стандартное освобождение пипетки от жидкости. Сосуд Дьюара закрывают пробкой, вставляют термометр Бекмана, предварительно отрегулированный на нужный интервал температур, непрерывно помещая, через каждую минуту производят отчет температуры. На этом завершается начальный период опыта.

Когда изменение температуры примет постоянное значение и не превысит  $0,003-0,002^\circ$  в минуту, наступает главный период опыта. В это время образец вносится в растворитель. Главный период кончается полным растворением образца. Это определяется по изменению хода температуры.

Чтобы избежать изменения температуры образца, перенос осуществляется так: быстро вытаскивают бокс из ультратермостата и стряхивают образец в поставленный рядом сосуд Дьюара. Затем один наблюдатель производит взвешивание бокса, а другой продолжает отчет температуры.

Конечный период опыта наступает, когда прекращается резкое падение температуры. Этот период, как и начальный, длится 10 мин. После окончания опыта вносится поправка на калибр капилляра термометра Бекмана. Для этого термометр Бекмана, если он не имеет готовых поправок, должен быть прокалиброван по методу, описанному М. М. Поповым (1954).

Желательно, чтобы температура помещения была примерно такой же, как и температура опыта. При отсутствии холодильного помещения сосуд Дьюара необходимо окружить термозащитной оболочкой с температурой, близкой к температуре образца. Для этого можно использовать смеси измельченного льда и поваренной соли. Варьируя количество хлористого натрия в смеси, можно получить различные температуры вплоть до эвтектической точки, равной  $-21,4^\circ$ . При вычислении ледяного коэффициента необходимо внести поправку на тепловой эффект разведения, а также на потерю тепла через излучение в окружающую среду в ходе главного периода опыта.

#### ПОПРАВКА НА ТЕМПЕРАТУРУ РАЗВЕДЕНИЯ РАСТВОРИТЕЛЯ

В сосуд Дьюара помещают 200 см<sup>3</sup> растворителя, выдержанного при  $+20^\circ$ , прибавляют 1 г воды той же температуры и, непрерывно помещая, определяют по термометру Бекмана максимальное повышение температуры. Затем устанавливают, как повышается температура смеси при прибавлении 2, 3 и 4 г воды, каждый раз для новых порций растворителя, но при тех же температурных условиях. На основании полученных данных строят график  $\Delta t = f(g)$ , где  $g$  — вес воды, прибавляемой к растворителю.

24

Так же производится серия определений при  $+10^\circ$  и  $+5^\circ$ . Полученные результаты дают возможность установить зависимость между тепловой разбавления и температурой опыта, т. е. при  $g = \text{const}$ ,  $\Delta t = f(T)$ , где  $T$  — температура опыта.

Поправку на теплоту разведения, определяемую в области отрицательной температуры опыта, находят экстраполированием найденной зависимости  $\Delta t = f(T)$ , при  $g = \text{const}$ .

Точно так же находится поправка на разведение растворителя образцами соленого льда. Экспериментально установлено, что содержащиеся в образцах льда соли практически не влияют на теплоту разведения. Поэтому можно применить найденные для пресного льда значения теплоты разведения в качестве поправок при разведении солеными образцами.

За время главного периода опыта, когда происходит растворение льда, через излучение теряется тепло. Поправка на теплоизлучение определяется наблюдением за теплообменом между прибором и окружающей средой до и после главного периода. На основании этого поправку на теплоизлучение находят по приведенным ниже формулам.

Количество жидкой фазы во льду устанавливается по разности между весом образца и весом чистого льда, содержащегося в нем. Количество чистого льда в образце находят по понижению температуры растворителя с учетом поправок на теплоизлучение и разведение. Опыт производится в такой же последовательности, как и определение ледяного коэффициента.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА ЛЕДЯНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПО ДАННЫМ ОПЫТА

В качестве примера приведены данные опыта, полученные в холодильной камере лаборатории Института мерзлотоведения АН СССР. Вес образца  $g_{\text{обр}} = 1,18$  г,  $t_{\text{камеры}} = -4,3^\circ$ ,  $t_{\text{образца}} = 4,7^\circ$ .

время (в мин.)	температура (в $^\circ\text{C}$ по Бекману)
0	4,714
1	4,713
2	4,712
3	4,711
4	4,710
5	4,708
6	4,040
7	3,984
8	3,964
9	3,916
10	3,894
11	3,874
12	3,858
13	3,842
14	3,830
15	3,822
16	3,810
17	3,803
18	3,799
19	3,800
20	3,800
21	3,800
22	3,800
23	3,800
24	3,800

- $Q_0 = \frac{4,714 + 4,708}{2} = 4,711$ , где  $Q_0$  — средняя температура начального периода.
- $V = \frac{4,714 - 4,708}{5} = 0,0012$ , где  $V$  — изменение температуры в один промиллюсек времени начального периода.
- $Q_n = \frac{3,799 + 3,800}{2} = 3,800$ , где  $Q_n$  — средняя температура конечного периода.
- $V' = \frac{3,799 - 3,800}{5} = -0,0002$ , где  $V'$  — изменение температуры в один промиллюсек времени конечного периода.
- $\sum_{i=1}^{n-1} t = 46,617$ , где  $\sum_{i=1}^{n-1} t$  — сумма температур калориметра, отсчитанных через равные промежутки времени (1 мин.) за главный период, исключая последний отчет.
- $t_0 + t_n = \frac{4,708 + 3,799}{2} = 4,254$  (средняя температура главного периода).
- $\sum_{i=1}^{n-1} t + \frac{t_0 + t_n}{2} = 46,617 + 4,254 = 50,871$ .

8.  $nQ_0 = 13 \times 4,718 = 61,243$ , где  $n$  — число промежутков в отсчетах главного периода.
  9.  $D = \left( \sum_{i=1}^{n-1} t + \frac{t_0 + t_n}{2} \right) - nQ_0 = 50,871 - 61,243 = -10,372$ .
  10.  $V' - V = -0,0002 - 0,0012 = -0,0014$ .
  11.  $Q_n - Q_0 = 3,800 - 4,714 = -0,914$ .
  12.  $nV' = 13 \times 0,0012 = 0,0156$ , где  $n$  — число промежутков в отсчетах главного периода.
  13.  $\Delta t = \frac{D(V' - V)}{Q_n - Q_0} + nV' = \frac{-10,372(-0,0014)}{-0,914} + 0,0156 = -0,0003$ .
  14.  $t_n$  — конечная температура главного периода с учетом поправки на теплообмен.  $t_n' = t_n + \Delta t = 3,799 - 0,0003 = 3,7987$ .
  15.  $t_n - \Delta T = 3,7887 - 0,05 = 3,749$ .
- Здесь  $\Delta T$  — температурная поправка на разведение, определяется из графика  $\Delta T = f(g_{\text{сл}})$ , где  $g_{\text{сл}}$  — навеска льда, равная весу талой воды, образовавшейся из образца.
16.  $t_0 - (t_n' - \Delta T) = 4,708 - 3,749 = 0,959$ .
  17.  $K = \frac{0,959}{1,18} = 0,813$  (градус/грамм), где  $K$  — ледяной коэффициент, т. е. величина понижения температуры растворителя одним граммом льда.

Пример определения количества твердой и жидкой фазы в засоленном льду\*

время (в мин.)	температура (в °C по Бекману)
0	4,270
1	4,266
2	4,266
3	4,266
4	4,266
5	4,266
6	3,372
7	3,352
8	3,302
9	3,278
10	3,256
11	3,240
12	3,220
13	3,212
14	3,202
15	3,193
16	3,186
17	3,179
18	3,174
19	3,170
20	3,163
21	3,163
22	3,163
23	3,167
24	3,170
25	3,170

Вес образца  $g_{\text{сл}} = 2,01$  г, температура камеры =  $-6^\circ$ , температура образца =  $-5,1^\circ$ .

1.  $Q_0 = \frac{4,270 + 4,266}{2} = 4,268$ .
2.  $V = \frac{4,270 - 4,266}{5} = 0,0008$ .
3.  $Q_n = \frac{3,160 + 3,170}{2} = 3,165$ .
4.  $V' = \frac{3,160 - 3,170}{5} = -0,002$ .
5.  $\sum_{i=1}^{n-1} t = 61,135$ .
6.  $\frac{t_0 + t_n}{2} = \frac{4,266 + 3,160}{2} = 3,713$ .
7.  $\sum_{i=1}^{n-1} t + \frac{t_0 + t_n}{2} = 61,135 + 3,713 = 64,848$ .
8.  $nQ_0 = 20 \times 4,268 = 85,360$ .
9.  $D = \left( \sum_{i=1}^{n-1} t + \frac{t_0 + t_n}{2} \right) - nQ_0 = 64,848 - 85,360 = -20,512$ .
10.  $V' - V = -0,002 - 0,0008 = -0,0028$ .
11.  $Q_n - Q_0 = 3,165 - 4,268 = -1,103$ .
12.  $nV' = 20 \times 0,0008 = 0,016$ .
13.  $\Delta t = \frac{D(V' - V)}{Q_n - Q_0} + nV' = \frac{-20,512(-0,0028)}{-1,103} + 0,016 = 0,036$ .
14.  $t_n' = t_n + \Delta t = 3,160 - 0,036 = 3,124$ .
15.  $t_n - \Delta T = 3,124 - 0,135 = 2,989$ .
16.  $t_0 - (t_n' - \Delta T) = 4,266 - 2,989 = 1,277$ .

\* Основные обозначения те же, что в предыдущем разделе.

17.  $\frac{t_0 - (t_n' - \Delta T)}{K} = \frac{1,277}{0,813} = 1,57$  г.
  18. Количество жидкой фазы находится по разности между весом образца и весом чистого льда, содержащегося в образце (2,01 - 1,57 = 0,44).
  19. Выразим количество жидкой фазы в процентах к общему весу образца:  $\frac{0,44 \times 100}{2,01} = 21,90\%$ .
- Таким образом установлено, что в образце соленого льда при  $-10^\circ$  содержится 21,90% рассола.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Как видно из изложенного, для количественного определения состава не требуется знать абсолютные значения температуры, достаточно измерить относительное изменение ее за период опыта.

Относительное изменение температуры устанавливается при помощи термометров Бекмана или дифференциальных термометров, или термистрами с точностью до 0,0001°. Точность определенная зависит, кроме того, и от взвешивания. Обычные аналитические весы имеют точность до 0,0001 г. Если принять, что падение температуры за главный период опыта составляет 0,01%. При навеске образца весом 2 г и погрешности взвешивания 0,0001 г ошибка будет не больше 0,01%. Следовательно, при использовании точной регистрирующей аппаратуры объективная ошибка будет порядка 0,02%.

Если производить взвешивание с точностью обычных технических весов до 0,01 г, а температуру измерять до 0,001° обычным термометром Бекмана, то объективная погрешность в определении жидкой фазы составит 0,6%.

Описанный метод обладает тем преимуществом, что для определения содержания жидкой фазы не требуется знать теплоемкость рассола, содержащегося во льду. Кроме того, для характеристики температурных изменений в процессе опыта можно ограничиться ее относительным смещением, применяя термометр Бекмана, что значительно повышает точность измерений. Различные в теплоемкостях конечных систем, возникающее при калибровке прибора и при измерениях, не может вызвать существенной ошибки, поскольку определяющей величиной в тепловом эффекте процесса разведения является большая скрытая теплота плавления льда, которая немного превосходит незначительное изменение теплоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Э. Гиттерман. Труды Солонной лаборатории Академии наук СССР, вып. XV, АН СССР, М., 1937.
2. М. Попов. Термометрия и калориметрия. МГУ, 1954.
3. С. Савинов. О талини снега. Метеорологический вестник № 4 и 5, СПб., 1907.
4. Н. Вадегер. Schweizer mineralogische und petrographische Mitteilungen.
5. W. E. Ringler. Über die Veränderungen in der Zusammensetzung des Meerwasser salzes beim Anfröhen. Verb. u. n. R. I. J. S. I. V. h. O. n. d. Z. e. l., E. D. III-V., 1906



### III. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПЫТАНИЮ ЛЬДА НА ПРОЧНОСТЬ

Чтобы выиснить закономерности в изменениях механических свойства льда в процессе его формирования и исчезновения, необходимо проводить исследование прочности льда на различных горизонтах, учитывая температуру, наличие пор, структурные и текстурные особенности, а также (в отношении морского льда), учитывая распределение солей и рассола. Только при комплексном и длительном изучении указанных свойств можно объяснить протекающие в ледяном покрове явления, приводящие к изменению его прочности.

Ввиду одинаковых условий формирования и разрушения горизонтальных слоев ледяного покрова в морских и пресных водоемах вследствие незначительности их, состав, пористость и структура льда претерпевают незначительные изменения в горизонтальном простирании. Все же некоторые местные отклонения, наблюдающиеся в составе, пористости и структуре, могут отразиться на точности измерений и требуют статистического подхода к наблюдениям. При этом должен учитываться размер испытываемого образца. Исследования механических свойств на малых образцах могут привести к значительному разбросу результатов из-за большей вероятности случайных отклонений в составе и пористости. На качестве наблюдений может отразиться также и размер применяемого штампа; чем меньше штамп, тем больше случайных отклонений в показаниях и тем больше требуется произвести измерений, чтобы получить надежные результаты.

Таким образом, количество измерений и размер образца устанавливаются в каждом отдельном случае с учетом состава, пористости, структуры льда и размера применяемого штампа.

На участке минимум в десяти точках необходимо проводить систематические наблюдения за толщиной и плотностью снежного покрова, их следует увязывать с регулярными наблюдениями за толщиной льда. Полностью нужно в одной точке следить за температурой снега на поверхности и на двух горизонтах внутри снежного покрова и на границе снега и льда.

Структура метаморфических льдов, как один из основных факторов, влияющих на прочность льда, менее упорядочена, чем кристаллических льдов, так как их формирование и дальнейшее изменение проходит более сложным путем. При изучении структуры фирна и ледникового покрова следует учитывать влияние на ориентировку, размеры и поверхность кристаллов сложного комплекса явлений. Среди них: неравномерное сжатие и напряжение, неоднородная скорость смещения, изменение пористости, термодиффузия, ледяное устойчивое температурное режима в нижних, глубоких слоях и меняющегося — в верхних, фазовые превращения, миграция и др. Следовательно, принимая во внимание сложность и разнообразие условий их образования, невозможно дать общую программу изучения метаморфических льдов.

28

В каждом конкретном случае необходим подход с учетом местных особенностей.

Нужно обратить внимание на стратиграфическое наблюдение за структурой и другими свойствами льда в местах контактов ледника с горной породой, при слиянии ледников, а также в начале и в конце их. Организация опытных площадок, разработку шурфов, бурение скважин, записку обнажений следует производить, сообразуясь с размерами ледника, уклоном ложа и условиями осадконакопления, абляции и гидрогеологическими особенностями.

#### ПРЕДЕЛ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ СЖАТИИ

За пределом пластичности возникают напряжения, приводящие к разрушению льда. Измерение предела пластичности при одностороннем сжатии осуществляется на прессе с образцами кубической формы. Испытание заключается в измерении нагрузки при постепенном и равномерном увеличении ее до максимальной, приводящей к разрушению образца.

Для этой цели применяются десититовые масляные или пружинные прессы. Равномерное движение поршня удобнее осуществлять автоматической регулировкой подачи в цилиндр масла, которое нагнетается насосом, работающим от электромотора. Верхняя платформа прессы шарнирно крепится к червячному винту со штурвалом, позволяющим опускать платформу до плотного соприкосновения с образцом. Оптимальные размеры образцов —  $10 \times 10 \times 10$  см.

Образцы заданной формы выпиливаются из льдины, вырубленной и извлеченной из ледяного массива. При этом отмечаются ориентировка образца относительно поверхности ледяного массива («верх», «низ», «бок»), структурные и текстурные особенности его и глубина слоя, из которого он выточен. В журнале наблюдений необходимо записывать направление разрушающего усилия относительно «верха» — грани образца, параллельной поверхности замерзания. Перед испытанием образец не менее двух часов выдерживается при заданной термостатированной температуре. В лаборатории термостатирование осуществляется в холодильной камере или шкафу. В полевых условиях можно использовать снежные и ледяные помещения с применением ледосоляного охлаждения, позволяющего получить различные устойчивые минусовые температурные режимы в течение нескольких дней.

Перед закладкой в пресс образец тщательно промеряют крошечным в трех основных направлениях. Между образцом и площадками прессы прокладывается несколько листов фильтровальной бумаги. Ее назначение — устранить влияние неровностей на гранях образца, которые особенно отражаются на показаниях в начальный момент испытаний.

После того, как образец поставлен на нижнюю платформу, вращением штурвала опускают верхнюю платформу до слабого соприкосновения с образцом. Затем, накачивая масло, приподнимают поршень со скоростью, при которой давление увеличивается на  $1 \text{ кг/см}^2$  в 1 сек. Поднятие поршня продолжается до полного разрушения образца. При этом отмечается время и показания индикатора в момент первого треска и при полном разрушении образца. Не исключена возможность, что под нагрузкой образец будет течь, не разрушаясь. Особенно часто это случается с соевым льдом при высокой температуре. Тогда рекомендуется производить сжатие до момента, когда высота образца уменьшится на половину первоначальной. После испытания поршень несколько опускают, верхнюю платформу поднимают и забирают обломок льда для определения содержания солей и рассола, а в специальных случаях — для изучения структуры и пористости.

29

Предел пластичности  $\sigma$  при одностороннем сжатии вычисляется по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{b \cdot a} \text{ кг/см}^2,$$

где  $P$  — максимальное усилие в кг, получаемое из 10 определений при помощи градуированной таблицы или графика;  
 $a$  и  $b$  — размеры поперечного сечения образца в см.  
 Запись наблюдений производится согласно табл. 3.

Таблица 3  
 Результаты испытания образцов льда на одностороннее сжатие

1	2	3	4	5			8	9	10	11	12	13	14	15	16
				а	в	h									
Макс. поперечный диаметр	Длина образца	Макс. образец	Процент влаги проб (в см)	Размеры образца (в см)			Предел прочности на сжатие (в кг)	Предел прочности на сжатие (в кг)	Предел прочности на сжатие (в кг)	Предел прочности на сжатие (в кг)	Максимальное показание манометра	Время окончательного разрушения (в сек.)	Максимальное показание манометра	Характер разрушения образца	Примечание

ПРЕДЕЛ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ

Определение величины разрушающего усилия на изгиб можно осуществить на масляном десятитонном прессе или пружинном прессе с использованием соответствующих весовых дополнительных приспособлений. Для этого на нижнюю платформу прессы устанавливается подставка с двумя опорными выступами на расстоянии 10 см друг от друга.

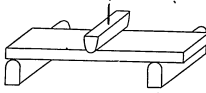


Рис. 11. Изгиб образца

В центр верхней платформы ввинчивается удлиненный штамп с закругленными краями. Образец льда в виде прямоугольной призмы свободно опирается на выступы подставки. При помощи штурвала к образцу подводится верхняя платформа до слабого соприкосновения. Последний удерживается на верхней платформе прессы в таком положении, чтобы его ребро приходилось поперек образца, лежащего на опорах.

Затем насосом накачивают масло с постоянной скоростью, повышая давление на  $1 \text{ кг/см}^2$  в 1 сек. до окончательного разрушения образца. Попутно отмечают максимальное показание манометра и время от начала опыта до разрушения образца. Если максимальное показание не совпадает с временем окончательного разрушения образца, то в журнале наблюдений делается соответствующее примечание.

Образцы выпиливаются из различных слоев льдины, вырубленной из ледяного покрова. При этом отмечается расстояние слоя, из которого вырезан образец, от поверхности замерзания или залегающая и ориентировка образца относительно поверхности. Выпиленный образец закладывается в специальную форму и шлифуется наждачной бумагой крупного зерна, пока не будет достигнута ровная поверхность граней и их параллельность.

Подготовленные таким образом образцы выдерживаются в течение 7-8 часов в термостате при заданной отрицательной температуре. Перед испытанием размеры образца измеряются с помощью штангенциркуля, желательно в нескольких местах, как в направлении, в котором будет действовать сила (высота образца  $h$ ), так и в направлении, перпендикулярном высоте (ширина образца  $b$ ).

В журнале наблюдений отмечается направление разрушающего усилия относительно поверхностей залегающих или замерзания. Испытание должно производиться по возможности быстро, чтобы за температуру испытания можно было принять температуру термостата, в котором выдерживались образцы. После разлома образца обломки его складываются, зарисовываются линии излома, а затем производится исследование на содержание воздуха, солей и рассола. Некоторые куски используются для структурного анализа.

Предел пластичности  $\sigma$  или разрушающее усилие на изгиб определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ кг/см}^2,$$

где  $L$  — расстояние в см между опорами, на которых установлен образец,  
 $b$  — ширина образца в см,  
 $h$  — высота образца в см,  
 $P$  — максимальное усилие в кг (получается из графика), построенного на основании результатов десяти отдельных измерений.

Форма записи испытаний прилагается ниже (см. табл. 4).

Таблица 4  
 Результаты испытания образцов льда на изгиб

1	2	3	4	5			8	9	10	11	12	13	14	15	16
				L	b	h									
Макс. поперечный диаметр	Длина образца	Макс. образец	Процент влаги проб (в см)	Размеры образца (в см)			Предел прочности на изгиб (в кг)	Предел прочности на изгиб (в кг)	Предел прочности на изгиб (в кг)	Предел прочности на изгиб (в кг)	Максимальное показание манометра	Время окончательного разрушения (в сек.)	Максимальное показание манометра	Характер разрушения образца	Примечание

Следует отметить, что в поперечных сечениях образца, достаточно далеко расположенных от концов стержня и от точек приложения нагрузок, приближенная теория Бернулли дает точные значения для нормальных напряжений и для кривизны упругой линии, т. е. поперечные сечения при изгибе стержня остаются плоскими и нормальными к осевой линии бруска.

В случае прямоугольного поперечного сечения достаточно точные результаты получаются при соотношении  $\frac{h}{b} > 1$ . Если ширина поперечного сечения велика по отношению к высоте, то отклонения от результатов приближенной теории становятся значительными, по в этом случае касательные напряжения вообще невелики и не имеют большого практического значения. Установленное экспериментальное распределение деформации по высоте ледяной балки симметричного сечения показывает, что нейтральная ось в ледяной балке находится на полувысоте и в данном случае применима гипотеза плоских сечений.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЛЬДА НА РАСТЯЖЕНИЕ**

Для испытания льда на растяжение используется пресс конструкции ДОРНИИ (рис. 12). Образцы изготавливаются в форме восьмерок с удлиненной шейкой. Наблюдения с применением поляризованного света за

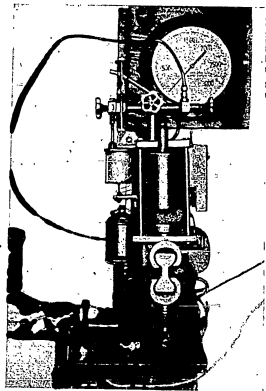


Рис. 12. Определение предельного напряжения ра-  
стяжения льда на прессе конструкции ДОРНИИ

напряженным состоянием, возникающим в образце льда под нагрузкой, показывают, что наибольшие напряжения  $\sigma_{max}$  имеют место в крайних точках сечения шейки и что они в 1,75 раза больше среднего напряжения, определяемого уравнением:

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (5)$$

где  $P$  — продольная сила, приложенная центрально,  
 $S$  — площадь поперечного сечения.  
Чем длиннее шейка образца, тем равномернее распределение вызванного внешними условиями напряжения по сечению в плоскости разрыва.  
Рекомендуется проводить испытание образцов, имеющих следующие размеры:

- общая длина . . . . . 520 мм,
- длина рабочей части . . . . . 250 мм,
- длина нароста головки . . . . . 90 мм,
- длина утолщения . . . . . 45 мм,
- размеры поперечного сечения . . . . . 50×25 мм<sup>2</sup>.

Величина разрушающего напряжения на разрыв определяется выражением (5). Результаты опытов записываются по следующей форме:

Таблица 5

№№ пп.	Дата	Характеристика льда (особенности структуры и состава)	Температура опыта (в °С)	Площадь сече- ния образца (в см <sup>2</sup> )	Предельная на- грузка на образец (в кг)	Разрушающее напряжение (в кг/см <sup>2</sup> )
1	2	3	4	5	6	7

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЛЕД ПО КОНТАКТНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Метод определения средней величины удельного давления по контактной сферической поверхности разработан чл.-корр. АН СССР Н. А. Цытовичем. Этот метод позволяет определять не только твердость тел, но и (используя современные теоретические исследования в области механики сплошных упруго-пластичных тел), по данным испытаний — предельное сопротивление твердых тел действию местной нагрузки.

Как известно, непосредственное измерение предельного напряжения на разрыв связано с изготовлением образцов льда в форме восьмерок, что сопряжено с значительными трудностями. Кроме того, в процессе обработки меняется структура образца, что искажает результаты измерений.

Метод шариковой пробы позволяет заменить сложные и трудоемкие измерения более надежными и простыми. Для упруго-пластичных тел существует следующая зависимость между величиной сжатия  $C$  и предельным напряжением на растяжение  $\sigma_s$ :

$$\sigma_s = 2C. \quad (6)$$

Предельное напряжение на растяжение можно выразить следующей теоретически найденной зависимостью через удельное давление на поверхности вдавливаемого поршня  $\sigma_{сф}$ :

$$\sigma_s \approx 0,38 \sigma_{сф} \quad (7)$$

В свою очередь, удельное давление на поверхности вдавливаемого шарика определяется из данных опыта по такой формуле:

$$\sigma_{сф} = \frac{P}{\pi D_{ш}^2} \quad (8)$$

где  $P$  — полная нагрузка на шарик в кг,  
 $D_{ш}$  — диаметр шарика в см,  
 $h$  — глубина погружения (в см) шарика в испытуемую среду.  
 Таким образом, по величине вдавливания шариковой пробы представляется возможным установить значение сил сцепления во льду согласно такому выражению:

$$C = 0,19 \frac{P}{\pi D_{ш} h} \quad (9)$$

Метод шариковой пробы дает возможность определять величины мгновенного и длительного сопротивления льдов действию внешнего усилия, а также определять коэффициент релаксации. Длительное сопротивление льда значительно меньше сопротивления, возникающего при быстром разрушении. Оно связано такой зависимостью с предельным сопротивлением льдов действию местной нагрузки:

$$P_{пред} = (2 + \pi) C_{дл} \quad (10)$$

где  $P_{пред}$  — величина предельного сопротивления,  
 $C_{дл}$  — величина длительного сцепления ( $C_{дл} = \frac{\sigma_{сдл}}{2}$ ).

Эта зависимость справедлива для плоской задачи. По мере погружения в тело шарикового штампа напряженность тела под действием постоянной общей нагрузки затухает, что вызвано явлением релаксации. Ослабление напряженности хорошо описывается экспоненциальным законом. Для льда экспоненциальный характер затухания напряженности заканчивается для каждой отрицательной температуры и заданной нагрузки в определенной точке, за которой начинается стационарный процесс, происходящий при постоянной скорости деформации. В интервале температур от 0 до  $-30^\circ$  любое тело с плотностью больше единицы проходит через лед, т. е. в этих условиях невозможно достичь полного затухания деформации. По изменению напряженности удельного давления, вызванного погружением шарика в лед, можно судить об изменении сил сцепления при разрушающем усилии, поскольку существует прямая зависимость между удельным давлением и силами сцепления.

Следовательно, силы сцепления так же зависят от времени действия нагрузки, как и удельное давление. Другими словами, изменение во времени сил сцепления под действием постоянной общей нагрузки подчиняется экспоненциальному закону и может быть выражено плавной кривой.

На оси ординат откладывают величины сил сцепления  $C$ , а на оси абсцисс — соответствующие определения  $C$  момента времени. Фигурирующая на графике величина длительного сцепления ( $C_{дл}$ ) характеризует деформацию. Для участка кривой, соответствующей экспоненте, можно записать:

$$C_t = C_{дл} + (C_{мг} - C_{дл}) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

где  $C_t$  — искомое значение силы сцепления;  
 $C_{мг}$  — мгновенное сцепление, на практике определяемое отсчетом деформации через десять секунд после начала опыта;  
 $\tau$  — время от начала затухания;  
 $t$  — время, за которое разность  $C_{мг} - C_{дл}$  уменьшилась в  $e$  раз (время релаксации).

Если известно значение  $C_t$ , то из выражения (11) можно определить  $C_{дл}$ , решив его относительно  $C_{дл}$ .

$$C_{дл} = \frac{C_t - C_{мг} e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}} \quad (12)$$

где  $Z_t = e^{-\frac{t}{\tau}}$ .  
 Выражение (12) позволяет с достаточной точностью определить  $C_{дл}$  по данным кратковременных измерений деформаций льда. Определение  $C_{дл}$  опытным путем сопряжено с испытаниями, длящимися несколько дней. Обработка результатов испытаний осуществляется по прилагаемой ниже форме:

Таблица 6

№№ шт.	Дата	Характеристика льда (особенности структуры и состава)	Температура опыта	Нагрузка на шариковый штамп (в кг)	Диаметр шарика $D$ (в см)	Показание по мессуре (в см)	Погружение шарикового штампа (в см)	Значение величины сцепления $C$ (в кг/см <sup>2</sup> )

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ПО ИЗГИБУ

Коэффициент внутреннего трения (коэффициент вязкости) есть полная сила сопротивления, отнесенная к единице поверхности сдвигаемого слоя и к единице угловой скорости сдвига при установившемся стационарном движении. Следовательно, коэффициент вязкости может характеризовать пластические деформации тела только в предельном стационарном его состоянии, когда при постоянной скорости деформации достигнута постоянная сила сопротивления, или постоянному внешнему усилию соответствует постоянная скорость деформации.

Методы определения коэффициента вязкости основываются либо на фиксации изменения внешнего усилия за определенный промежуток времени при постоянстве деформации, либо на наблюдении за изменением деформации под воздействием постоянной нагрузки.

Для измерения вязкости твердого тела по способу изгиба параллелепипедаобразного бруска, лежащего на опорах под постоянной нагрузкой, требуется дополнительное определение минимальной нагрузки для температуры, при которой начинается незаатухающее течение, с тем чтобы ввести соответствующую поправку в расчетное уравнение. Поскольку легкая балка даже без всякой нагрузки будет прогибаться под собственным весом, т. е. при любой нагрузке будет происходить незаатухающее течение, то определение минимальной нагрузки в данном случае не требуется.

Осуществление измерений по этой методике несложно. Возможно испытывать образцы ненарушенной структуры, вырезанные в заданном направлении из массива. Подбирая соответствующие нагрузки и линейные размеры бруска, можно свести к минимуму погрешность, возникающую в ходе опыта из-за изменения объема бруска и неравномерности в распределении напряжений по сечению образца, которая создается постоянным внешним воздействием.

Измерение деформации на приборе (рис. 13) производится при помощи мессуры, позволяющей отсчитывать прогиб с точностью до 0,001 мм (прогиб лучше измерять снизу балки).

Прогиб осуществляется металлическим валликом, соединенным со штоком. Благодаря направляющей муфте перемещение штока происходит строго вертикально. Применение валика исключает срез, который может возникнуть в результате использования другой формы штампа и уменьшить неравномерность в распределении напряжений в балке. Действие нагрузки передается через коромысло на шток с валиком.

На основании многочисленных испытаний льда на изгиб были найдены оптимальные размеры образца, позволяющие получать наиболее надежные результаты. Расстояние между опорами должно составлять 90 мм, ширина образца — 23—40 мм, а толщина — 15—20 мм. Очень тонкие образцы испытывать не рекомендуется, так как за пределом определенной толщины нарушается их структурная целостность.

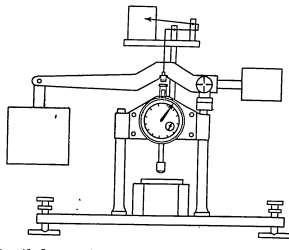


Рис. 13. Схема прибора для определения коэффициента вязкости льда по изгибу

При испытании необходимо обращать внимание на структуру льда и обязательно отмечать направление деформирующего усилия относительно ориентировки кристаллов в образце. Если ориентировка хаотична, то следует геометрически просуммировать все отмеченные при кристаллографическом исследовании данного образца выходы оптических осей кристаллов и найти результирующую ориентировку. Желательно характеризовать состав образца (количество рассола, соленость, пористость) и температурный режим опыта. Испытание проводится при постоянной температуре, колебания ее не должны превышать  $\pm 0,5^\circ$ .

Определение коэффициента вязкости по прогибу призматического стержня, нагруженного в центре сосредоточенной нагрузкой, производится для двух положений стержня. При первом оба конца стержня неподвижно закреплены, а при втором он свободно опирается на две подставки. В обоих случаях нагрузка действует перпендикулярно к длине стержня.

Для первого случая коэффициент вязкости  $\eta$  определяется из следующего выражения:

$$\eta = \frac{Pb^3}{48ab^3 \frac{dl}{dt}} \quad (13)$$

где  $P$  — действующая нагрузка,

36

$l$  — рабочая длина стержня (расстояние между опорами),  
 $a$  — ширина образца,  
 $b$  — толщина его,  
 $\frac{dl}{dt}$  — скорость деформации.

Уравнение (13) справедливо при  $\frac{dl}{dt} = \text{const}$ .

В случае, когда брусок лежит свободно, коэффициент вязкости рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta = \frac{Pb^3}{12ab^3 \frac{dl}{dt}} \quad (14)$$

в которой все обозначения и условия применения остаются такими же, как и в уравнении (13).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА И КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ\*

Модуль сдвига и коэффициент вязкости являются основными характеристиками прочности твердых тел. Существующие методы определения вязкости твердых тел имеют ряд недостатков, из-за чего они претерпевают некоторые искажения. При одних методах не учитываются изменения в плотности или объеме образца, которые возникают в процессе его испытания, при других происходит изменение формы образца, которое также приводит к погрешностям в измерениях.

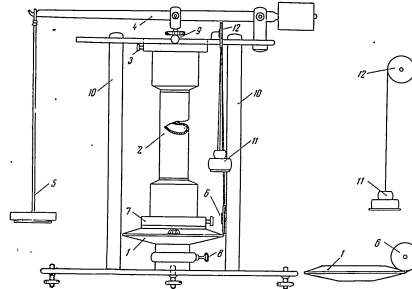


Рис. 14. Схема прибора для определения модуля сдвига и коэффициента вязкости по кручению образца

Почти все методы не устраняют искажения результатов измерения вязкости, появившегося в процессе испытания образца вследствие неравномерности распределения в них касательных и нормальных напряжений. Поскольку вязкое течение ледяной массы сопровождается рывком явлений при наличии касательных и нормальных напряжений, отличающихся от таковых при вязком течении образцов, то вносится некоторая погрешность при использовании данных лабораторных испытаний для характеристики поведения таких крупных объектов, как ледяная масса.

\* Метод разработан Н. А. Цытовичем и Б. А. Савельевым

37

Определение вязкости методом кручения цилиндрических стержней устраняет ряд недостатков указанных выше. При этом не происходит изменений объема, формы и отсутствуют нормальные напряжения в образце. Но возникающие неравномерные касательные напряжения по сечению образца не исключаются.

Н. А. Цытович предложил определять коэффициент вязкости методом кручения трубчатых образцов. В случае, если стенки образца достаточно тонки, возникающая при испытании неравномерность касательных напряжений по его сечению настолько незначительна, что погрешность находится за пределами чувствительности опыта.

Для определения модуля сдвига и коэффициента вязкости сконструирован прибор (рис. 14), позволяющий проводить испытания ледяных образцов на кручение при различных нормальных нагрузках. Прибор представляет собой каркас, состоящий из нижней и верхней платформ, укрепленных на двух массивных стойках II. Между двумя платформами помещается трубчатый образец 3; внешний торец его укреплен на шарнирном лимбе I, а верхний закрывается жестко. Вращение лимба осуществляется через систему блоков 6, 12 при помощи троса с грузом 11. Вертикальное давление на образец производится при помощи рычага 4, укрепленного на верхней платформе, и груза 5. Чтобы устранить неравномерность нагрузки по сечению образца, шток рычага опирается на шарик 8, который устанавливается на металлическую пластинку со специальной лункой, лежащую на верхнем основании образца. Благодаря этому удается избежать скола верхнего основания.

Для надежного удержания образца верхнему и нижнему его концам придают форму четырехугольной призмы. Закрепление образца осуществляется в пазык подвижными пластинками при помощи винтов 9 и 7. До начала испытания лимб устанавливается в нулевое положение и закрепляется винтом 6. Одновременно с включением секундомера ослабляется винт 8, и опыт начинается. Через определенные интервалы времени деформация регистрируется по поперечу лимба.

Расчет модуля сдвига G производится по такой формуле:

$$G = \frac{2Ml}{\pi(R_2^4 - R_1^4)} \quad (15)$$

где L — длина трубки,

$$I = \frac{M}{\varphi} = \frac{P \cdot R_2}{\varphi}$$

P — нагрузка,  
 φ — угол кручения,  
 R<sub>2</sub> — радиус круга вращения (радиус лимба),  
 R<sub>1</sub> — внешний радиус образца,  
 r — внутренний радиус образца.

Угол φ определяется по изменению смещения после полного затухания деформации. Модуль упругости E находится по известной зависимости E = 2G(1 + μ), где μ = 0,36 для льда (коэффициент Пуассона).

Вычисление коэффициента вязкости η по результатам испытания образца трубчатой формы на кручение производится по формуле:

$$\eta = \frac{PLgl}{M_p \frac{\partial \varphi}{\partial t}} \quad (16)$$

где P — нагрузка,  
 L — плечо пары сил,  
 g — ускорение силы тяжести,  
 l — длина трубки,  
 ∂φ/∂t — угловая скорость деформации.

M<sub>p</sub> — полярный момент инерции площади поперечного сечения цилиндра.

Если считать, что сдвигающаяся зона целиком претерпевает пластические смещения, можно записать:

$$M_p = \frac{2}{3} \pi k (R_2^3 - R_1^3) \quad (17)$$

где k =  $\frac{P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$ .

В окончательном виде расчетная формула будет иметь следующий вид:

$$\eta = \frac{3}{2} \frac{g l (R_2^3 - R_1^3)}{\frac{\partial \varphi}{\partial t} (R_2^3 - R_1^3)} \quad (18)$$

где R<sub>2</sub> — радиус лимба (без канавки),  
 R<sub>1</sub> — внешний радиус образца,  
 r — внутренний радиус образца.

Уравнение (18) справедливо только для стационарного процесса, т. е. когда  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{const}$ .

Для вычисления коэффициента вязкости необходимо построить график, на котором по оси ординат откладываются значения угла сдвига, по оси абсцисс — время. На графике выбирается прямой участок, соответствующий постоянной скорости деформации и определяется скорость  $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ , которая и используется при расчете.

Определение модуля сдвига и коэффициента вязкости льда описанным методом применимо только к искусственно изготовленным образцам, т. е. к полученным при замораживании льда в специальных формах. Вырезать образец такой сложной формы из ледяного массива очень трудно.

Таким образом, этот метод дает возможность установить более точно закономерности в изменении модуля сдвига и коэффициента вязкости при изменении теплового режима, структуры и состава в лабораторных условиях, но не приспособлен к применению его в полевых условиях.

#### СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЬДА СДВИГУ

Сопротивление льда сдвигу является основным показателем при определении движения ледников. Оно служит также основным элементом в характеристике явления торошения, в определении воздействия льда на сооружения и т. п.

Необходимо различать две возможные формы сдвигов:

- а) «поверхный» сдвиг,
- б) «глубокий» сдвиг.

«Поверхный» сдвиг проявляется при относительно небольших нормальных (сжимающих) напряжениях, возникающих, например, при торошении или воздействии ледяного покрова водоема на сооружения.

«Глубокий» сдвиг возникает при наличии высоких сжимающих нагрузок и проявляется в больших массивах льда, например, в ледниках.

Сопротивление льда сдвигу характеризуется соотношением между наибольшими касательными напряжениями τ<sub>n</sub> и нормальной составляющей напряжения P<sub>n</sub> в момент, предшествующий сдвигу. Сдвиг возникает, когда наибольшее касательное напряжение, действующее в данной зоне, превышает некоторое предельное значение, соответствующее внутреннему сопротивлению льда сдвигу. Нарушение прочности обусловлено возникновением необратимых деформаций на поверхностях скольжения.

Лед в отличие от других твердых тел, по-видимому, не обладает длительно сохраняющейся прочностью. Таким образом, изучение сопротивления льда сдвигу во времени зависит от скорости сдвига или от соотношения касательных и нормальных напряжений.

Если лед не обладает длительно сохраняемой прочностью, то деформация сдвига должна иметь место при любых минимальных касательных напряжениях. Но одни деформации протекают крайне медленно и с ними можно не считаться, другие совершаются быстро, и условия их проявления должны изучаться. Соотношение между касательными τ<sub>n</sub> и нормальными напряжениями P<sub>n</sub> описывается нелинейной зависимостью Морра:

$$\tau_n = f(P_n) \quad (19)$$

Графически эта зависимость определяется предельной кривой, отгибающей круги напряжений. В некоторых случаях, при небольшом диапазоне изменения сжимающего напряжения, отгибающую кривую можно аппроксимировать прямой такого вида:

$$\tau_n = P_n \lg \varphi + C, \quad (20)$$

где условно принято считать φ — углом внутреннего трения, C — сцепление. При φ = 0 налицо условие пластичности Сен-Венана, при котором отгибающая кривая переходит в горизонтальную прямую. В этом случае касательное напряжение есть величина постоянная, равная внутренним силам сцепления: τ<sub>n</sub> = C = const. В общем виде сопротивление сдвигу можно представить криволинейной зависимостью:

$$\tau_n = P_n \lg \varphi + C_n + C_s, \dots \quad (21)$$

Определение вязкости методом кручения цилиндрических стержней устраняет ряд недостатков, указанных выше. При этом не происходит изменения объема, формы и отсутствуют нормальные напряжения в образце. Но возникающие неравномерные касательные напряжения по сечению образца не исключаются.

Н. А. Дютов предложил определять коэффициент вязкости методом кручения трубчатых образцов. В случае, если стенки образца достаточно тонки, возникающая при испытании неравномерность касательных напряжений по его сечению настолько незначительна, что погрешность находится за пределами чувствительности опыта.

Для определения модуля сдвига и коэффициента вязкости сконструирован прибор (рис. 14), позволяющий проводить испытания ледяных образцов на кручение при различных нормальных нагрузках. Прибор представляет собой кардас, состоящий из нижней и верхней платформ, укрепленных на двух массивных стойках 10. Между двумя платформами помещается трубчатый образец 2; нижний торец его укреплен на вращающемся лимбе 1, а верхний закреплен жестко. Вращение лимба осуществляется через систему блоков 6, 12 и рычага 4, укрепленного на верхней платформе, и груза 5. Чтобы устранить неравномерность нагрузки по сечению образца, шток рычага опирается на шарик 3, который устанавливается на металлическую пластинку со специальной дугой, лежащую на верхнем основании образца. Благодаря этому удается избежать скола верхнего основания.

Для надежного удержания образца верхнему и нижнему его концам придает форму четырехугольной призмы. Закрепление образца осуществляется в гнездах подвижных пластинок при помощи винтов 8 и 7. До начала испытания лимб устанавливается в нулевом положении и закрепляется винтом 9. Одновременно с включением секундомера ослабляется винт 8, и опыт начинается. Через определенные интервалы времени деформация регистрируется по поперечу лимба.

Расчет модуля сдвига  $G$  производится по такой формуле:

$$G = \frac{2Ll}{\pi(R_1^4 - R_2^4)} \quad (15)$$

где  $L$  — длина трубки,

$$l = \frac{M}{\varphi} = \frac{P \cdot R_1}{\varphi},$$

$P$  — нагрузка,

$\varphi$  — угол кручения,

$R_1$  — радиус круга вращения (радиус лимба),

$R_2$  — внешний радиус образца,

$r_2$  — внутренний радиус образца.

Угол  $\varphi$  определяется по конечному смещению после полного затухания деформации. Модуль упругости  $E$  находится по известной зависимости  $E = 2G(1 + \mu)$ , где  $\mu = 0,35$  для льда (коэффициент Пуассона).

Вычисление коэффициента вязкости  $\eta$  по результатам испытания образца трубчатой формы на кручение производится по формуле:

$$\eta = \frac{PLl}{M_p \frac{\partial \varphi}{\partial t}}, \quad (16)$$

где  $P$  — нагрузка,

$L$  — плечо пары сил,

$l$  — ускорение силы тяжести,

$l$  — длина трубки,

$\frac{\partial \varphi}{\partial t}$  — угловая скорость деформации,

$M_p$  — полярный момент инерции площади поперечного сечения цилиндра.

Если считать, что сдвигающая зона целиком претерпевает пластические смещения, можно записать:

$$M_p = \frac{2}{3} \pi k (R_1^3 - R_2^3), \quad (17)$$

где  $k = \frac{P}{\pi(R_1^2 - R_2^2)}$ .

В окончательном виде расчетная формула будет иметь следующий вид:

$$\eta = \frac{3}{2} \frac{PLl}{\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} (R_1^3 - R_2^3), \quad (18)$$

где  $R_1$  — радиус лимба (без канавки),

$R_2$  — внешний радиус образца,

$r_2$  — внутренний радиус образца.

Уравнение (18) справедливо только для стационарного процесса, т. е. когда  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{const}$ .

Для вычисления коэффициента вязкости необходимо построить график, на котором по оси ординат откладываются значения угла сдвига, по оси абсцисс — время. На графике выбирается прямой участок, соответствующий постоянной скорости деформации и определяется скорость  $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ , которая и используется при расчете.

Определение модуля сдвига и коэффициента вязкости льда описанным методом применимо только к искусственно изготовленным образцам, т. е. к полученным при замерзании воды в специальных формах. Вырезать образцы такой сложной формы из ледяного массива очень трудно.

Таким образом, этот метод дает возможность установить более точно закономерности в изменении модуля сдвига и коэффициента вязкости при изменении теплового режима, структуры и состава в лабораторных условиях, но не приспособлен к применению его в полевых условиях.

#### СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЬДА СДВИГУ

Сопротивление льда сдвигу является основным показателем при определении движения ледников. Оно служит также основным элементом в характеристике явления торошения, в определении воздействия льда на сооружения и т. п.

Необходимо различать две возможные формы сдвигов:

а) «плоский» сдвиг,

б) «глубокий» сдвиг.

«Плоский» сдвиг проявляется при относительно небольших нормальных (сжимающих) напряжениях, возникающих, например, при торошении или воздействии ледяного покрова подошва на сооружения.

«Глубокий» сдвиг возникает при наличии высоких сжимающих нагрузок и проявляется в больших массивах льда, например, в ледниках.

Сопротивление льда сдвигу характеризуется соотношением между наибольшими касательными напряжениями  $\tau_n$  и нормальными составляющими напряжения  $P_n$  в момент, предшествующий сдвигу. Сдвиг возникает, когда наибольшие касательные напряжения, действующие в данной зоне, превысят некоторое предельное значение, соответствующее внутреннему сопротивлению льда сдвигу. Нарушение прочности обусловлено возникновением необратимых деформаций на поверхностях скольжения.

Лед в отличие от других твердых тел, по-видимому, не обладает длительно сохраняющейся прочностью. Таким образом, изучение сопротивления льда сдвигу во времени зависит от скорости сдвига или от соотношения касательных и нормальных напряжений.

Если лед не обладает длительно сохраняемой прочностью, то деформация сдвига должна иметь место при любых минимальных касательных напряжениях. Но если деформации протекают крайне медленно и с ними можно считать, другие совершаются быстро, и условия их проявления должны изучаться. Соотношение между касательными  $\tau_n$  и нормальными напряжениями  $P_n$  описываются нелинейной зависимостью Мора:

$$\tau_n = f(P_n). \quad (19)$$

Графически эта зависимость определяется предельной кривой, огибающей круги напряжений. В некоторых случаях, при небольшом диапазоне изменения сжимающего напряжения, огибающую кривую можно аппроксимировать прямой такого вида:

$$\tau_n = P_n \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (20)$$

где условно принято считать  $\varphi$  — углом внутреннего трения,  $C$  — сцеплением. При  $\varphi = 0$  имеем условие пластичности Сен-Венана, при котором огибающая кривая переходит в горизонтальную прямую. В этом случае касательное напряжение есть величина постоянная, равная внутренним силам сцепления:  $\tau_n = C = \text{const}$ . В общем виде сопротивление сдвигу можно представить криволинейной зависимостью:

$$\tau_n = P_n \operatorname{tg} \varphi + C_n + C_s, \dots \quad (21)$$

где  $C_0$  — сцепление, характеризующее связность (первично восстанавливаемое сцепление),  $C_1$  — сцепление, определяющее ненарушенное состояние.

Для определения льда сдвигу рекомендуется прибор с одной плоскостью среза и с усиленной конструкцией системы Н. Н. Маслова и Ю. Ю. Лурье (рис. 15). Прибор этот имеет рабочий цилиндр, состоящий из нижней и верхней обоемы, и загрузочные устройства, обеспечивающие передачу нормального и горизонтального сдвигающего усилия. Загрузочное устройство, предназначенное для создания нормального давления, имеет верхнее коромысло с закрепленным на нем поршнем и систему рычажного пресса. Загрузочное устройство для передачи образцу горизонтального усилия состоит из секторного рычага, ленты, соединительной вилки и других приспособлений.

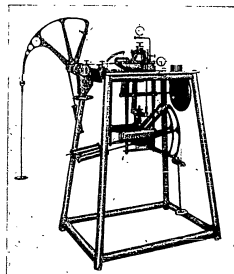


Рис. 15. Прибор системы Н. Н. Маслова и Ю. Ю. Лурье для определения предельного сопротивления сдвигающему усилию

Образец льда, имеющий форму цилиндра, помещается в рабочий цилиндр. Сдвиг образца осуществляется боковым перемещением верхней обоемы относительно нижней. Между обоемами имеется щель, в пределах которой происходит сдвиг образца. Ширина ее благодаря вращению установочных винтов может регулироваться в пределах от 0 (начало сжатия) до 3 мм (начало сдвига).

На приборе можно производить опыты с охлаждением, для чего имеется съемная ванна, прикрепляемая к подвижной панели. В нее можно помещать охлаждающую смесь (лед с солью, сухой лед и т. п.), которая будет поддерживать нужную температурный режим. Для проведения опытов с неанисотропной срезающей силой используется песок, дробь или вода, загружаемые в ведро, подвешенное на крюк ленты. Лента соединена с секторным рычагом, который в свою очередь связан тросом с верхней обоемой через соединительную вилку. Для обеспечения горизонтального направления тросового усилия имеются установочные винты, позволяющие осуществлять регулировку высотного положения системы.

До закладки образца в обоемы рабочего цилиндра добавляются, чтобы обе поверхности образца были ровными и взаимно параллельными. Образец должен иметь точно измеренную высоту, соответствующую габаритам рабочего цилиндра. В нижнюю обоему на установочный диск помещается

\* Более подробное описание содержится в Инструкции по лабораторному определению сопротивления грунта сдвигу. Институт Гидрометеорологического, М., 1952.

вкладыш из пористого камня, кружок фильтровальной бумаги и тормозной диск. Затем опускают образец в нижнюю обоему на глубину 10 мм. После этого на образец устанавливают верхнюю обоему так, чтобы установочные винты вошли в соответствующие гнезда в кронштейнах нижней обоемы. Сверху на образец накладывается тормозной диск, затем кружок фильтровальной бумаги и верхний вкладыш из пористого камня. Рабочий цилиндр с образцом устанавливается в прибор и производится предварительное обжатие, после чего приступают к проведению опыта.

Поскольку механические свойства льда проявляют ясно выраженную анизотропию, то испытания льда на сдвиг должны производиться при тщательном изучении структуры образца до и после опыта. Для льдов, имеющих беспорядочную ориентировку кристаллов, необходимо определять средненормальное направление или результирующее всех ориентировок кристаллов в шлифе, преимущественное направление и фиксировать угол между направлением сдвига и осредненной ориентировкой. Кроме того, необходимо определять пористость образца, его физический (фазовый) и химический составы и фиксировать температурный режим опыта.

Опыт производится следующим образом. Устанавливаются две мессуры (индикаторы) для регистрации нормального обжатия и горизонтального сдвига так, как это показано на рис. 15. Предварительное обжатие осуществляется заданной вертикальной нагрузкой при установленной температуре. Площадь образца равна 40 см<sup>2</sup>. Показание индикатора записывается до завершения деформации образца. Процесс считается законченным, если в течение суток деформация образца не превышает 3% от общей деформации.

После обжатия мессуры, регистрирующая вертикальную деформацию, снимается. Затем приступают к проведению опыта на сдвиг. Рабочий цилиндр соединяется с загрузочными приспособлениями для нормального давления и сдвигающего горизонтального усилия. В ведро насыпают дробь или песок небольшими порциями до тех пор, пока стрелка горизонтального индикатора не придет в слабое движение. Затем включают секундомер и через каждую минуту записывают в журнал показание индикатора. После затухания деформации прикладывают вторую ступень сдвигающего усилия. Так продолжают до тех пор, пока не наступит сдвиг, соответствующий положению, при котором скорость деформации либо начнет расти, либо примет постоянное несатущающее значение, без изменения ступени сдвигающего усилия.

Деформация считается затухшей, если образец перемещается менее чем на 0,02—0,03 мм в минуту. После опыта образец извлекают для других физических испытаний и взвешивают дробь или песок. На основании полученных результатов строят график зависимости сдвигающего напряжения  $\sigma_n$  от вертикальной нагрузки  $P_n$ . В одном и том же масштабе по оси ординат откладывают сдвигающее напряжение, а по оси абсцисс — вертикальную нагрузку. По графику определяют угол внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления ( $C$ ). Сдвигающее напряжение для строго горизонтального сдвига определяется таким выражением:

$$\sigma_n = \frac{g_{\max} - g - g_0}{S} \cdot 10 \text{ кг/см}^2, \quad (22)$$

где  $g_{\max}$  — вес дробей (с ведром), которая вызвала сдвиг (в кг),  
 $g$  — вес добавленной в ведро дробь, которая вызвала несатущающую деформацию (в кг),

$g_0$  — вес пустого ведра (в кг),

$S$  — площадь образца (в см<sup>2</sup>),

$10$  — соотношение плеч секторного рычага.



Результаты испытаний на сдвиг записываются по следующим формам:

Таблица 7  
Деформация образца при предварительном обжатии

Дата	Время от начала опыта	Вертикальная нагрузка $P_n$ (в кг/см <sup>2</sup> )	Показание вертикального индикатора	Приращение деформации (в мм)
1	2	3	4	5

Таблица 8  
Результаты измерений сопротивления льда сдвигу

Дата	Время от начала опыта	Угол между направлением сдвигающего усилия и плоскостью ориентации кристаллов	Плотность льда	Количество жидкой фазы	Температура опыта	Вертикальная нагрузка $P_n$ (в кг/см <sup>2</sup> )	Сдвиг $\tau$ (в кг/см <sup>2</sup> )	Приращение деформации в минуту (в мм)	Общая деформация (в мм)	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Березинцев. О прочности мерзлых грунтов. «Мералоговедение», т. 1, АН СССР, М., 1947.
2. Инструкция по лабораторному определению сопротивления грунтов сдвигу. Институт Гидроэнергопроект, М., 1952.
3. А. В. Ишлинский. Осесимметричная задача теории пластичности и проба Бриггса. «Прикладная математика и механика», т. VIII, в. 3, М., 1944.
4. Б. Д. Каргашкин. Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда. Труды ЦАТИ, № 607. Изд. боро новой техники, М., 1947.
5. В. В. Соколовский. Устойчивость оснований и откосов. Известия АН СССР, ОТН, № 8, 1952.
6. С. П. Тимошенко. Вопросы прочности в машиностроении. Кубуч, Л., 1934.
7. С. П. Тимошенко, Дж. Лессельс. Прикладная теория упругости. Гостехиздат, Л., 1930.
8. Н. А. Цытович. Определение сил сцепления мерзлых грунтов. Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. Сб. 2, АН СССР, М., 1945.

IV. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕДЯНОГО МАССИВА

Наблюдения над температурой ледяного массива производятся на различных горизонтах при помощи термомпар или термометров сопротивления. Ртутные термометры для этих целей применяют реже. Они менее удобны в употреблении, а при измерении температуры на больших глубинах дают значительную ошибку. Для каждого отсчета их приходится извлекать из шахты наружу, в среду с иной температурой, которая отражается на показаниях. При поднятии и опускании в шахте происходит перемишание воздуха, что вносит искажение в температурный режим наблюдаемого слоя. Термомпары и термометры сопротивления, будучи заложены на определенной глубине ледяного покрова, остаются там в течение всего срока наблюдения. С их помощью отсчеты температуры производятся без нарушения теплового режима.

**Термопары.** Если места соединений отдельных металлических проводников находятся при разных температурах, в цепи возникает электрический ток. Изменение температуры в спаих вызывает пропорциональное ему изменение электродвижущей силы в цепи. В замкнутой цепи, состоящей из проводников первого класса, при постоянной температуре сумма электродвижущих сил равна нулю. В цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных проводников, при разных температурах спаев возникает электродвижущая сила, равная сумме отдельных электродвижущих сил, возникающих в спаих. Условно принято металл, к которому идет ток в более нагретом спае, считать положительным полюсом.

Медноконстантовая термопара дает 41 мкв на один градус. Термоэлектрическая сила ее находится в следующей зависимости от температуры:

Температура (в °С)	Термоэлектрическая сила (в мкв)
0°	0
-20	-0,725
-40	-1,416
-60	-2,056
-80	-2,674
-100	-3,238
-120	-3,857
-140	-4,229
-160	-4,565
-180	-5,032
-185	-5,000

Отрицательный знак термоэлектрической силы означает, что ток течет от константана к меди.

Удельное электрическое сопротивление константана при 18°—0,4902 ом  $\frac{мм^2}{м}$  и при 100°—0,9130 ом  $\frac{мм^2}{м}$ . Температурный коэффициент электрического сопротивления при 12°,5  $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ ; при 25°  $\alpha = 2 \times 10^{-6}$ . Несмотря на высокую температуру плавления (свыше 1000°), верхний предел рабочих температур для константана не превышает 325°.

Константан в паре с железом дает 53 мкв на градус, в паре с хромоникелем — 56 мкв на градус. Теплоемкость константана  $C_{пст} = 0,0977$ , а теплоемкость меди  $C_{мд} = 0,0920$ . Железоконстантановая термопара в силу целого ряда обстоятельств менее применима, чем медноконстантановая термопара, хотя ее электродвижущая сила значительно больше медноконстантановой пары.

Железо обладает неоднородным структурным составом и легко корродирует на воздухе, что сказывается на его термоэлектрических свойствах. Все же, при отсутствии медных проводов, можно пользоваться железными, тщательно изолированными.

Электродвижущая сила ( $E$ ) большинства термопар с достаточной точностью связана кубичной зависимостью с температурой:

$$E = a \left( \frac{t}{100} \right) + b \left( \frac{t}{100} \right)^3 = c \left( \frac{t}{100} \right)^3 \quad (23)$$

Для комбинации медь — константан в интервале температур от  $-185^\circ$  до  $500^\circ$   $a = -3,60$ ,  $b = 0,444$ ,  $c = -0,023$ ; для комбинации железо — константан в интервале температур от  $-185^\circ$  до  $600^\circ$   $a = 4,65$ ,  $b = 0,374$ ,  $c = -0,049$ .

Температуру можно вычислить по данным измерения термоэлектрической силы:

$$\frac{t}{100} = \alpha E + \beta E^2 + \gamma E^3 \quad (24)$$

Комбинация медь — константан в указанном интервале температур имеет такие коэффициенты:  $\alpha = 0,305$ ,  $\beta = 0,0114$ ,  $\gamma = -0,00026$ ; комбинация железо — константан:  $\alpha = 0,227$ ,  $\beta = -0,0045$ ,  $\gamma = 0,0001$ . При изготовлении термопары следует принимать во внимание толщину и однородность проводов. Чтобы избежать ошибок, возникающей в результате теплопроводности проводников, сечение их должно быть минимальным. Но, в то же время, уменьшение сечения приводит к возрастанию сопротивления проводников, что снижает чувствительность термопары. Оптимальными условиями являются такие, при которых сечения обоих проводов относятся друг к другу как квадратные корни из произведений тепло- и электропроводностей. Для медноконстантановой пары диаметр проводов не должен быть меньше 0,3 мм.

В результате неоднородности проводников в термопаре могут возникнуть местные электродвижущие силы, искажающие результаты наблюдения. Неоднородность проводников может вызываться механическими причинами или физическими и структурными особенностями. Механические повреждения исчезают при прокаливании, структурные же изменения устранить невозможно. Один из способов определения неоднородности заключается в том, что проводник присоединяют к гальванометру и, подвергая нагреванию некоторую часть его, наблюдают за стрелкой гальванометра. Перемещение ее указывает на неоднородность проводника. В качестве нагревателя можно использовать водяную баню. Медные и константановые провода лучше брать в шелковой изоляции.

С целью предохранения проводов от повреждений, на них необходимо надеть каучуковые трубки или протянуть их через стеклянные трубки. Защищенные концы константановых и медных проводов попарно соединяются и спаиваются оловом. Спаи обматываются нитками, покрываются шеллаком и лаком. Один спай термопары погружается в исследуемую среду, второй является контрольным. Он находится в среде с известной температурой (в тающем льде).

Наиболее надежной проверкой термопар является градуировка их по эвтектическим точкам различных криогидратных смесей, состоящих из льда, воды и солей. Чтобы получить устойчивую температуру смеси, необходимо основательно измельчить лед и тщательно перемешать его с солью. Криогидратные смеси могут быть также получены вымораживанием насыщенных растворов солей. Вначале вымораживания выделяется лед или соль, пока не будет достигнута криогидратная температура, при которой происходит выпадение из раствора и солей, и льда. До полного отвердевания в этом случае будет сохраняться постоянная температура смеси. Если требуется получить промежуточные температуры, то подбирают соответствующие смеси нескольких солей со льдом или замораживают их растворы.

44

Таблица 9

Температура криогидратных смесей

Наименование солей	Концентрация (в г/л)		Температура криогидратной точки
	1	2	
Аммониевые квасцы	Насыщен. раствор	-	-0,24
Кальевые квасцы	"	"	-0,47
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	"	"	-1,2
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	"	"	-1,824
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	"	"	-2,1
$\text{KNO}_3$	"	"	-2,9
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	19,0 г/л	"	-3,9
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	27,0 г/л	"	-6,55
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Насыщен. раствор	"	-10,5
$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	"	"	-11,0
KCl	"	"	-11,1
$\text{NH}_4\text{Cl}$	"	"	-15,8
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	"	"	-17,55
$\text{NaNO}_3$	"	"	-18,5
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	"	"	-19,05
$\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	"	"	-21,2
$\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	"	"	-23,0
$\text{K}_2\text{CO}_3$ (кристаллич.)	"	"	-36,5
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	"	"	-54,0

В табл. 9 приведены температуры криогидратных точек наиболее употребительных смесей.

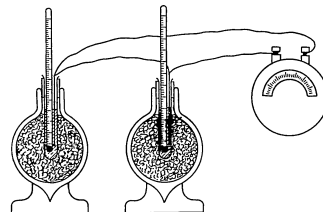


Рис. 16. Схема градуировки термопар при прямом измерении температуры

Приготовленная смесь загружается в сосуд Дьюара. Туда же помещают главные спай термопары вместе с нормальным термометром для контроля температуры смеси. Контрольные спай термопар и нормальный термометр вводятся во второй сосуд Дьюара с тающим льдом. Для лучшего контакта

термопары со смесью рекомендуется помещать их в пробирку с ртутью (см. рис. 16).  
При измерении температуры по этой схеме с чувствительным или зеркальным гальванометром точность отсчета может достигать 0,05°. Чувствительность можно увеличить в несколько раз, если применить термобатарею, состоящую из нескольких последовательно соединенных термопар (рис. 17).

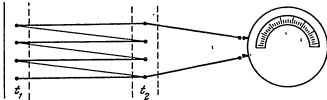


Рис. 17. Схема термобатареи

При прямом измерении термоэлектрической силы необходимо вводить поправку на потерю напряжения в самой термопаре. Поправка  $k$  находится из выражения:

$$k = \frac{R+r}{R}, \quad (25)$$

где  $R$  — сопротивление гальванометра,  
 $r$  — сопротивление термоэлемента или термобатареи.

Из выражения (25) видно, что чем меньше сопротивление термопары и больше сопротивление гальванометра, тем меньше становится поправка, тем ближе она к единице.

Определив для каждой термопары коэффициент  $k$ , ее показания  $n$  умножают на это  $k$ .

Определить точно поправку  $k$  не всегда удается, поскольку она зависит от сопротивления проводов, меняющегося с колебанием температуры. При этом одна часть проводов находится в одном температурном режиме, а другая — в другом.

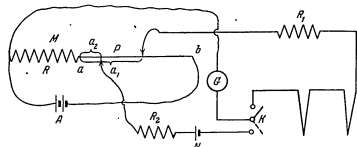


Рис. 18. Схема компенсационной установки

Наиболее точным измерением температуры, при котором сопротивление элемента почти не влияет на точность отсчета, является компенсационный метод. Его принцип основан на сбалансировании термосилы, возникающей в термопаре, встречным источником тока известного напряжения. Компенсация достигается подбором сопротивлений. Существует много разнообразных схем компенсации. Одна из них приведена на рис. 18. В этой схеме термопара через ключ  $K$  соединяется с нуль-гальванометром  $G$ ,  $A$  — аккумуля-

лятор на 2 в,  $N$  — нормальный элемент,  $M$  — магазин сопротивлений,  $P$  — реохорд.

Вначале компенсируют электродвижущую силу нормального элемента ( $E_N = 1,0183$  в) с напряжением аккумулятора  $A$ . Для этой цели включается аккумулятор на небольшую нагрузку, но не меньше 100 ом и, по мере надобности, отвечает сопротивление в пределах от 0,1 до 1 ом. Передвинут ползунок реохорда  $P$ , создаст разность потенциалов в цепи аккумулятора, равную напряжению во ветрешней цепи с нормальным элементом. В этом случае на общем участке указанных двух ветвей ток отсутствует, в гальванометре никакого отклонения не происходит. После того, как на единице длины мостика (реохорд  $P$ ) установлена определенная разность потенциалов, на место ветви нормального элемента включается ветвь термопары и перемещением ползунка по мостку достигается отсутствие тока в нуль-гальванометре. Искомая электродвижущая сила  $E_x$  определится из уравнения:

$$E_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R + \alpha_1}{R + \alpha_2}, \quad (26)$$

где  $R_1$  — величина сопротивления в магазине в цепи термопары,  
 $R_2$  — величина сопротивления в магазине в цепи нормального элемента,  
 $R$  — сопротивление в магазине, включенное в цепь аккумулятора,  
 $\alpha_1$  — плечо реохорда (мостика) при компенсации электродвижущей силы термопары,

$\alpha_2$  — плечо реохорда при компенсации э. д. с. нормального элемента. Измерение напряжения способом компенсации позволяет производить отсчеты с точностью до 0,2%, что соответствует предельной точности измерений с применением магазина сопротивлений.

#### ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Действие термометров сопротивления основано на свойстве чистых металлов изменять проводимость электрического тока с изменением температуры. С понижением температуры сопротивление уменьшается. Для малых разностей температур оно изменяется почти линейно. Так, у платины сопротивление возрастает на 0,4%, а у никеля — на 0,5% при повышении на 1°.

Наиболее подходящими металлами для изготовления термометров сопротивления являются платина и никель. Эти металлы могут быть получены в чистом виде, их структура устойчива в сравнительно большом диапазоне температур, никель слабо, а платина совсем не корродирует на воздухе и их сопротивления изменяются с изменением температуры по простому закону.

Измерение температуры сводится к сравнению искомого сопротивления с известным. В качестве эталонного сопротивления хорошим материалом служат марганец и константан, температурный коэффициент которых весьма близок к 0°. Для изготовления платинового или никелевого термометра сопротивления применяется проволока от 0,05 до 0,2 мм в диаметре. Длина ее определяется нулевым сопротивлением, которое не должно превышать 40 ом. Чтобы получить требуемую чувствительность термометра сопротивления, исходят из соотношения, по которому чувствительность измерений сопротивлений пропорциональна  $1/R$ , где  $i$  — сила тока в термометре,  $R$  — сопротивление термометра.

При малой термической инертности термометра целесообразно применять малое сопротивление и нагружать большей силой тока, тогда как у термометров с большой термической инертностью лучше увеличивать

сопротивление за счет уменьшения силы тока (выделяемое тепло пропорционально  $I^2$ ).

Форма термометров сопротивления может быть самой разнообразной. В качестве подводящих проводов обычно применяется медная звонковая проволока диаметром от 0,3 до 0,5 мм. Места соединения различных металлов должны находиться при постоянной температуре, как можно ближе друг к другу; в противном случае при разности в температуре контактов в них будут возникать вредные термоэлектрические токи. Чтобы избежать от вредного влияния термоэлектрических токов, возникающих в местах соединения непосредственно около подводящих проводов, вводят проволочную медную петлю — компенсатор такого же размера, что и подводящие провода.

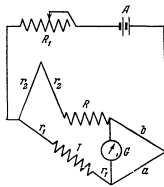


Рис. 19. Схема измерения температуры термометром сопротивления

При измерении температуры термометром сопротивления возникают следующие основные объективные погрешности:

1. Изменение структуры проводов, влекущее за собой изменение сопротивления.
2. Образование в термометре джоулева тепла.
3. Возникновение термоэлектрических сил в местах соединения.
4. Термическая инертность термометра.

Частично от этих погрешностей можно освободиться, используя для изготовления сопротивления прокаленную проволоку, вводя компенсаторы, варьируя сопротивление термометра и силу тока, проходящего через него.

Градировка термометров должна проводиться, примерно, при таких же условиях, при каких намечается проведение наблюдений. Предельная точность отсчета температуры при соблюдении указанных условий достигает 0,0001°. В полевых условиях точность отсчета осуществляется в пределах от 0,1 до 0,01°.

Измерение сопротивления производится компенсационным способом. Этот метод заключается в сравнении сопротивления термометра с известным сопротивлением. Подбор последнего производится до точного равенства сопротивления термометра. В этом случае ток, включенный в места соединения двух ветвей, будет поровну распределяться между ними и не отразится на нуль-гальванометре.

На рис. 19 дана схема измерения температуры термометром сопротивления с применением мостика Уитстона. В этой схеме приводятся следующие обозначения:  $T$  — термометр сопротивления,  $R$  — известное сопротивление,  $r_1$  и  $r_2$  — сопротивления соединительных проводов,  $a$  и  $b$  — плечи мостика Уитстона,  $G$  — нуль-гальванометр,  $A$  — аккумулятор,  $R_1$  — реостат, регулирующий подачу тока. Для уничтожения вредных термоэлектрических токов, возникающих в местах соединения, к термометру  $T$  и сопротивлению  $R$  подключаются по два провода. Каждая пара таких проводников  $r_1 r_1$  и  $r_2 r_2$  имеют соответственно одинаковые сечения и длину. В нуль-гальванометре  $G$  ток будет отсутствовать при следующем условии:

$$(r_1 + 2r_2) b = (R + 2r_2) \cdot a. \quad (27)$$

Если  $a = b$ , то  $r_1 = r_2$ . Значит, и  $T = R$ .

Для измерения температуры континентальных льдов (ледники, ископаемые льды, наледь и др.) термометры погружают в вертикальном положении

48

на требуемую глубину в скважину, выработанную буром. В настоящее время представляется возможным наладить автоматическую запись температуры.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛЬДА

Метод Ф. Мальмгрена. Принцип измерения основывается на измерении температурного градиента на определенном расстоянии от искусственного источника, излучающего тепло в течение установленного опыта. Возникающее при этом местное температурное поле претерпевает такие изменения: до нагревания температура льда, в котором расположены нагреватель и термометры, сохраняется постоянной и равной во всех точках изучаемого слоя. Во время нагревания возникает и растет температурный градиент; после нагревания возникшая температурная разность стремится к выравниванию.

Прибор для измерения теплопроводности состоит из нагревателя, изготовленного из константановой проволоки определенного сопротивления. Он представляет собой клубочек бифилярно смотанной проволоки. В одной плоскости с нагревателем на расстоянии 1—1,5 см от центра нагревателя помещается дифференциальная терморпара на две точки с точно измеренным расстоянием между собой. Константановая проволока, соединяющая оба спая, имеет значительную длину и располагается в виде петли. Подобная форма соединений двух спаев исключает возможность выравнивания температуры металлических проводами. Нагреватель и термометры закрепляются на маленьком пластмассовом каркасе с окном размером 6×6 см около нагревателя (см. рис. 20). Каркас укрепляется на конце деревянной рейки, вдоль которой проходит провод от нагревателя и термометра к столу, закрепленному на другом конце рейки. Для установки прибора в лед в нем вырубается лунка, куда погружается рейка с приемной частью прибора. Поперечная перекладина, скрепленная с рейкой, удерживает установку на требуемой глубине и придает ей вертикальное положение. Затем лунка засыпается измельченным льдом и заливается талой водой, полученной от таяния этого же льда. Небольшое изменение в структуре льда в лунке относительно всего массива практически не сказывается на теплопроводности.

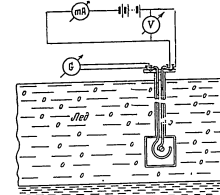


Рис. 20. Схема установки для измерения теплопроводности льда

Нагрев осуществляется пропусканием через нагреватель тока от аккумуляторной щелочной батареи. Контроль тока производится амперметром и вольтметром, а регулировка нагрева — реостатом. После опыта проверяется изоляция нагревательной проволоки. Для этого через нагреватель пропускается ток в 0,5, 1,0 и 1,5 а и одновременно измеряется напряжение. Критерием непогрешности изоляции является постоянство сопротивления нагревательного провода, которое находится из соотношения;

$$R = \frac{V}{I}$$

49

Примем часть установки может быть изготовлена самим наблюдателем. Для этого необходимы следующие материалы:

1. На нагреватель требуется 50 см константановой проволоки диаметром 0,6 мм и 900 см медной эмалированной проволоки диаметром 0,85 мм.
2. Для дифференциальной терморпары 25 см константановой проволоки диаметром 0,3 мм и 500 см медной эмалированной проволоки диаметром 0,3 мм.
3. Пластмассовый щиток размером 10×10 см.
4. Рейка для крепления приборов длиной 250 см.

Регистрирующая часть установки состоит из гальванометра чувствительностью  $10^{-7}$  а, амперметра со шкалой на 10 а, позволяющего регулировать силу тока с точностью до 0,05 а и вольтметра с точностью измерения до 0,01 а. Нагревание осуществляется электрическим током от щелочной батареи на 4,8 в (четыре последовательно соединенных элемента по 1,2 в каждый).

Порядок проведения опыта такой. Через нагреватель пропускается ток в 3 а за время  $\tau$  сек. Постоянство тока контролируется по амперметру, регулировка тока осуществляется двумя последовательно включенными реостатами на 100 и 35 см. С момента включения нагревателя через каждые 30 сек. изменение температуры фиксируется по гальванометру. Продолжительность нагревания определяется по степени возрастания градиента температуры. Нагревание прекращается как только разность в температуре спаев достигнет  $0,5^\circ$ . С момента прекращения нагревания отсчет температуры продолжается до полного исчезновения разности температуры.

При пропускании тока в  $I$  а за время  $\tau$  сек. с каждого сантиметра проволоки выделится тепло, равное  $q$ . Через некоторое время вышедшее тепло пройдет сквозь поверхность шара радиусом  $r$ . Следовательно, через каждый квадратный сантиметр поверхности пройдет  $\frac{q}{4\pi r^2}$  калорий ( $l$  — длина нагревательной проволоки,  $lq = Q$ ).

Воспользуемся дифференциальным выражением теплопроводности, представленным в таком виде:

$$dQ = -k dS \frac{\partial t}{\partial h}. \quad (28)$$

Принтегрируем выражение (28):

$$\int dQ = k \int dS \frac{\partial t}{\partial h} dt.$$

$$\text{Получим } \frac{Q}{S} = k \int_0^{\infty} \frac{\partial t}{\partial h} dt,$$

откуда

$$k = \frac{Q}{S \int_0^{\infty} \frac{\partial t}{\partial h} dt}, \quad (29)$$

где  $Q$  — количество тепла, выделенного нагревателем за время  $\tau$ , численно равное  $0,239 I^2 R \tau$ ;  
 $S = 4\pi r^2$  — поверхность сферы на расстоянии  $h$  от центра нагревателя,  
 $\frac{\partial t}{\partial h}$  — температурный градиент,  
 $\partial h$  — расстояние между спаями дифференциальной терморпары.

После подстановки соответствующих значений для  $Q$  и  $S$  выражение (29) примет вид:

50

$$k = \frac{0,239 I^2 R \tau}{4\pi r^2 \int_0^{\infty} \frac{\partial t}{\partial h} dt}$$

Интегральное выражение  $\int_0^{\infty} \frac{\partial t}{\partial h} dt$  равно площади, ограниченной осями

ординат и кривой типа  $\frac{\partial t}{\partial h} = f(\tau)$  (см. рис. 21). Практически это выражение определяется измерением указанной площади при помощи планиметра.

Существенным недостатком метода Ф. Маллерена является изменение структуры льда, происходящее за время опыта и вносящее искажение в теплопроводности. При сильном нагреве льда в нем возникают многочисленные трещинки термического происхождения, уменьшающие теплопроводность. Полностью избежать термической деформации льда при этом методе невозможно, но можно добиться значительного снижения ее за счет уменьшения нагрева. Опытным путем установлено, что нагревание должно осуществляться до предела, при котором возрастание температуры не превышает  $0,5^\circ$  за весь период опыта. Поскольку термическая деформация по льду с течением времени исчезает и время восстановления нарушенной структуры определяется минимумом в 10 дней, то интервал между двумя опытами не следует делать меньше этого срока.

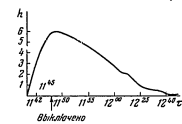


Рис. 21. График изменения температуры при определении теплопроводности

#### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПО МЕТОДУ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА

Метод регулярного режима, разработанный Г. М. Кондратьевым, использует одно из простых нестационарных тепловых состояний тела, т. е. его охлаждение или нагревание. Решение задачи об охлаждении или нагревании тела заключается в определении поля температур в любой момент времени, если задается поле температур для момента времени  $\tau = 0$  и известны физические свойства льда. Практически температурное поле образца определяется при условии постоянства температуры окружающей среды. В данном случае такой средой является жидкость.

Измерительная аппаратура и методика испытаний. Общий вид установки, применяющейся для измерения теплопроводности льда, показан на рис. 22. Она состоит из термостата с чувствительностью  $2,1 \times 10^{-10}$  а и  $R_{\text{ом}} = 800$  ом, двух декад сопротивлений и цилиндрических калориметров. Температура образцов измеряется при помощи медноконстантановой терморпары. Нулевой спай терморпары помещается в сферический сосуд Дьюара с тающим льдом. Образец цилиндрической формы выталкивается из льда; его диаметр равен внутреннему диаметру калориметра. В центре одного из оснований образца высверливается предназначенное для терморпары отверстие глубиной равное половине его высоты. Терморпары градуируются в интервале температур от 0 до  $-10^\circ$  по эталонным точкам смесей различных солей, льда и воды. Параллельно производится сравнение с показаниями психрометрического термометра. Образцы льда готовятся замораживанием воды. Для этого кало-

51

риметры заполняются водой и помещаются в холодильную камеру. Чтобы осуществить одностороннее выхолаживание, боковые стенки калориметров изолируются от окружающей среды. Для этой цели применяют специальные термостаты.

Перед испытанием образцы выдерживают в течение 24 час. при постоянной температуре в ультратермостате (см. рис. 24), в котором автоматически поддерживается постоянная температура с точностью до  $0,1^\circ$ . Опыт проводится в холодильной камере с температурой несколько ниже температуры ультратермостата. Определение температуропроводности производится

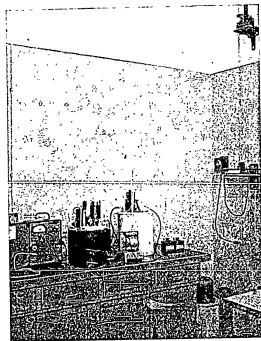


Рис. 22. Общий вид установки для измерения температуропроводности льда методом регулярного режима

в термостате с теплоизолирующей внешней оболочкой, в которой циркулирует метиловый спирт, охлажденный до нужной температуры. Циркуляция и регулировка температуры спирта осуществляется с помощью ультратермостата. Для создания дополнительного запаса холода в резервуар загружается охлаждающая смесь, состоящая из хлористого кальция и измельченного льда. Подогрев циркуляционной жидкости производится электрическим нагревателем автоматически через реле.

Внутри термостата находится калориметрическая жидкость — спирт-ректификат. Количество калориметрической жидкости определяется условиями опыта, согласно которым температурный скачок на границе образца и среды должен отсутствовать.

Иными словами, разность температур среды и поверхности образца должна быть равна нулю, или  $\alpha \rightarrow \infty$  ( $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи).

Практически эти условия выполняются в результате значительного превышения массы калориметрической жидкости над массой образца и благодаря надежной изоляции калориметра, уменьшающей теплообмен между калориметром и воздухом. Во время опытов, проводившихся в лаборатории Института мерзлотоведения АН СССР им. В. А. Обручева, внутри термостата заливалось 5 кг спирт-ректификата, а вес образца составлял около 200 г. Газовая между температурой образца и температурой калориметрической жидкости не должна быть меньше  $2^\circ$ . Однако не следует создавать слишком большой разницы, так как резкий перепад температуры сокращает период регулярного режима, а следовательно, увеличивает погрешность.

Перед началом опыта калориметрическая жидкость выдерживалась в течение 10 мин. при постоянной температуре. Затем концы термометры под-

ключались к гальванометру, и образец полностью погружался в жидкость. С момента погружения приступали к измерению температуры по перемещению светового зайчика на шкале гальванометра.

В начале при быстром ходе температуры отсчеты производились через 5 делений, а затем через 2 деления. Попутно отмечалось время. Опыт прекращался, когда смещение зайчика на одно деление занимало 5—10 сек. Продолжительность опыта колебалась в пределах 3—10 мин. в зависимости от качества и размеров образца.

Для обработки полученных результатов в каждом случае строился полулогарифмический график, на котором по оси абсцисс откладывалось время  $\tau$ , а по оси ординат  $\ln t$  или соответствующее значение  $\ln t$  (или отсчет по гальванометру).

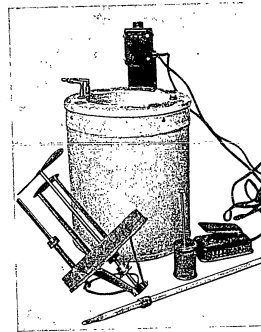


Рис. 23. Термостат, мешалка и калориметр

В начале опыта точки графика ложатся не по прямой, поскольку температурное поле в этот момент выражается не простым экспоненциальным законом. Начало регулярного режима характеризуется установившимся тепловым процессом, в котором обнаруживается прямолинейная зависимость между  $\ln t$  и временем  $\tau$ . Количественное выражение такой зависимости обусловлено термическими свойствами материала, формой и размером образца, местоположением спая термометры. Участок кривой с регулярным режимом охлаждения (рис. 25) выражается такой зависимостью:

$$t_a - t_{cp} = A t_0 e^{-\alpha \tau}, \quad (30)$$

где  $t_a$  — температура образца,  
 $t_{cp}$  — температура среды,  
 $A$  — константа, зависящая от начальных условий,

$\tau$  — время,  
 $m$  — коэффициент, зависящий от формы, размеров исследуемого тела, теплоемкости, температуропроводности и от граничных условий, характеризующихся величиной коэффициента теплоотдачи,  
 $\alpha$  — основание натуральных логарифмов.

На участке кривой с регулярным режимом величина  $m$  остается постоянной; она не зависит от времени и одинакова для всех точек системы. В этом

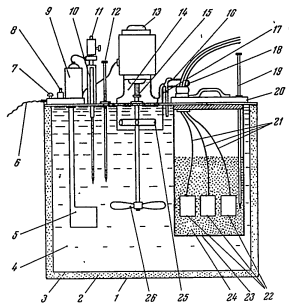


Рис. 24. Схема ультрагерметизата:

- 1 — обложка, 2 — изоляция, 3 — внутренняя стенка сосуда,
- 4 — спираль, 5 — нагреватель, 6 — провод, 7 — выключатель,
- 8 — сигнальная лампа, 9 — реле, 10 — контактный термометр,
- 11 — регулятор термометра, 12 — контрольный термометр,
- 13 — электромотор, 14 — подставка мотора, 15 — соединительная трубка, 16 — сигнальная трубка, 17 — питающая трубка,
- 18 — каучуковая трубка, 19 — контрольный термометр, 20 — крышка, 21 — термометр, 22 — образец льда,
- 23 — внутренняя сосуда, 24 — насос, 25 — центральная насос.

случае коэффициент  $m$  численно равен угловому коэффициенту прямой части графика:

$$m = \frac{\ln n_2 - \ln n_1}{\tau_2 - \tau_1} \quad (1/сек), \quad (31)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — отсчеты по гальванометру, соответствующие  $t_{x1}$  и  $t_{x2}$  для двух моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

При условии отсутствия температурного скачка на границе тела и среды, угловой коэффициент  $m$  пропорционален температуропроводности  $\alpha = bm$ . Здесь  $b$  — коэффициент формы. Для различных форм исследуемого тела значение  $b$  различно. Для образца цилиндрической формы  $b$  определяется из уравнения:

$$b = \frac{4}{\left(\frac{2,4048}{r}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{z}\right)^2}, \quad (32)$$

где  $z$  — высота образца,

$r$  — радиус его основания.

Коэффициент  $\alpha$  является мерой термической инерции тела и характеризует способность его к теплообмену независимо от качества материала. Вблизи некоторых точек температур измерение температуропроводности льда может привести к значительным искажениям. Эти температурные точки соответствуют кристаллизации отдельных солей из рассола или кристаллизации льда, обусловленных выделением тепла.



Рис. 25. График регулярного режима охлаждения цилиндрического образца

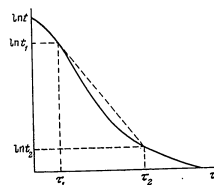


Рис. 26. Искажение регулярного режима охлаждения цилиндрического образца из-за конвекционных токов внутри образца

Выделяемая теплота кристаллизации искажает установившийся регулярный режим и, тем самым, делает невозможным определение коэффициента температуропроводности в узловых точках выпадения солей.

Характерным примером искажения результатов может служить график охлаждения, показанный на рис. 26. При правильно поставленном опыте он должен иметь в своей средней части прямолинейный характер. Вогнутость кривой графика указывает на то, что внутри материала имеются конвекционные токи. Одной из причин их возникновения является неправильная заделка термометра (допускает воздух). Выпуклая кривая графика (рис. 27) возникает в результате выделения скрытых теплот кристаллизации. Кроме того, искажения появляются в результате несоблюдения условий настоящей методики, например, из-за неравномерного отвода тепла через части калориметра. Следует избегать излишней массивности частей калориметра и увеличения его размеров. Материал, используемый для изготовления калориметра, должен обладать максимальной теплопроводностью и изотропностью. Ошибки могут возникнуть также за счет несовершенства формы калориметра, а следовательно, и образца.

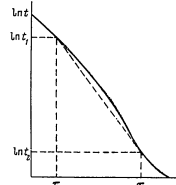


Рис. 27. Искажение регулярного режима охлаждения при кристаллизации

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  $\epsilon_{\alpha}$ ,  $\epsilon_C$  и  $\epsilon_t$ 

Если коэффициенты  $b$  и  $m$  определяются с точностью до 1—2%, то температуропроводность вычисляется по формуле  $\alpha = bt$  с точностью до 2—4%. Для материала, состоящего из смеси индивидуальных веществ удельная теплоемкость вычисляется по следующей формуле, справедливой при условии аддитивности теплоемкостей отдельных составляющих данную систему.

$$C_a = C_{\alpha} \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma + \dots} + C_{\beta} \frac{\beta}{\alpha + \beta + \gamma + \dots} + C_{\gamma} \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma + \dots} + \dots \quad (33)$$

Здесь  $\frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma + \dots}$ ,  $\frac{\beta}{\alpha + \beta + \gamma + \dots}$ ,  $\frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma + \dots}$  и т. д. — относительные доли отдельных составляющих в общей системе, а  $C_{\alpha}$ ,  $C_{\beta}$ ,  $C_{\gamma}$  — их теплоемкости.

Подобным способом удельная теплоемкость находится с точностью до 2—4%. Плотность материала  $\rho$  определяется весовым способом с точностью до нескольких долей процента. И, наконец, теплопроводность материала определяется из соотношения  $k = C\rho a$  с максимальной объективной погрешностью порядка 8%. Современная измерительная техника позволяет определить теплопроводность с точностью до 1—2%, как это делал Якоб в Германском государственном Физико-техническом институте. Гриффитс определял теплопроводность в Национальной физической лаборатории (Англия) с точностью до 0,5—1%.

## ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В ЛЕДЯНОМ МАССИВЕ

Тепловой поток, протекающий в ледяном массиве, обусловлен наличием в нем температурного градиента. От интенсивности теплового потока зависят физические, химические и механические процессы по льду, в том числе фазовые переходы, миграция, изменение пористости и т. п., которые, в свою очередь, отражаются на свойствах льда.

Тепловой поток может быть определен двумя методами. Первый метод заключается в измерениях температурного градиента за определенный промежуток времени и коэффициента теплопроводности. На основании результатов измерений вычисляется величина теплового потока  $Q$  по формуле:

$$Q = \lambda \frac{dt}{dh} \tau, \quad (34)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности льда,  
 $\frac{dt}{dh}$  — средненитегральный градиент температуры за время  $\tau$ .

Такой метод определения теплового потока является весьма трудоемким и не всегда применим.

Второй метод непосредственного измерения теплового потока имеет большие преимущества перед первым благодаря его универсальности и простоте. Измерение осуществляется при помощи термотранзистометров системы А. З. Дмитриева и при помощи теплометров, которые отличаются друг от друга только конструктивными особенностями.

Термотранзистометры и теплометры позволяют измерять тепловой поток, проходящий через ледяной покров в целом и дифференцированно через любой слой и любую поверхность раздела, измерять термическое сопротивление, коэффициент теплопроводности и направление теплового потока.

Прибор представляет собой пластинку, имеющую форму либо диска, либо квадратной формы, толщиной около 12—20 мм. Площадь пластинки

56

колеблется в зависимости от конструктивных особенностей прибора. Наиболее употребительным является дискообразный термотранзистометр диаметром около 125 мм системы А. З. Дмитриева.

Термотранзистометр состоит из плоского измерительного элемента, герметично изолированного сверху и снизу эбонитовыми пластинками, а с боков — термозащитным эбонитовым кольцом. На измерительном элементе расположена система дифференциальных медноконстантановых термор, последовательно соединенных на двух горизонтах. Спай термор жестко соединены на эбонитовой пластинке. В зависимости от необходимой точности измерений (иными словами — от величины температурного градиента среды) число спаев в термотранзистометрах колеблется от нескольких сотен до нескольких тысяч.

При наличии тепловых потоков в термотранзистометре возникает электродвижущая сила, пропорциональная температурному потоку среды. Ее измеряют либо полевым потенциометром, либо самопишущим электронным микропотенциометром. Затем умножают показания прибора на коэффициент градуировки, устанавливающий зависимость между электродвижущей силой (в милливольтх) и величиной теплового потока, выраженного в  $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot \text{сек}$ .

Градуировка термотранзистометров — сложная и ответственная операция. Она осуществляется при стационарном тепловом режиме, точно фиксированных элементах теплового потока, проходящего через градуируемый прибор, при строго вертикальном направлении теплового потока по отношению к плоскости прибора и при отсутствии боковых искажений температурного режима. Наибольшая точность градуировки достигается применением автоматики при регулировке теплового режима системы.

При градуировке используются нагреватели, представляющие собой тонкий металлический диск, полый внутри, несколько большего размера, чем градуируемый термотранзистометр. Внутри нагревателя помещается электроннагревательный элемент из марганциновой проволоки (марганцин обладает постоянством электросопротивления). Выделяемое нагревателем тепло определяется по формуле Джоуля — Ленца:

$$Q = 0,864 I^2 R \tau,$$

а на единицу площади —

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{0,864 I^2 R \tau}{F},$$

где  $I$  — сила тока в амперах,  
 $R$  — сопротивление в омах,  
 $F$  — площадь нагревателя.

Отсчет по шкале микропотенциометра показывает тепловой поток, проходящий через термотранзистометр. Он несколько меньше истинной величины теплового потока в измеряемой среде. Это незначительное занижение получается за счет сопротивления самого прибора. Наложение прибора на поверхность льда увеличивает термическое сопротивление в месте измерения теплового потока, что эквивалентно дополнительному слою льда с термическим сопротивлением, равным сопротивлению термотранзистометра. Таким образом, прибор измеряет заниженный тепловой поток. Если прибор поместить в среду с большим термическим сопротивлением, то показания термотранзистометра будут несколько завышенными. Уменьшение погрешности в измерении теплового потока за счет наличия в приборе краевого перепада температуры и собственного термического сопротивления прибора достигается соответствующими конструктивными усовершенствованиями (подбором материала для термотранзистометра с теплоизоляционными свойствами, близкими ко льду, и выбором размера прибора).

57



Поправка на отсчет по прибору определяется таким выражением:

$$Q_{\text{изм}}(r_b + R + r_n + R' + R'') = \dot{Q}_{\text{ист}}(r_b + R + r_n). \quad (35)$$

Здесь  $r_b$  — термическое сопротивление теплоотдаче,  
 $r_n$  — термическое сопротивление теплоотдаче,  
 $R$  — термическое сопротивление льда,  
 $R'$  — термическое сопротивление термотранзистора,  
 $R''$  — термическое сопротивление воздушного зазора между термотранзистором и поверхностью льда, если этот зазор имеется.  
 Из выражения (35) получим истинное значение теплового потока:

$$Q_{\text{ист}} = Q_{\text{изм}} \left( 1 + \frac{R' + R''}{r_b + R + r_n} \right). \quad (36)$$

Отличие термотранзистора от термомера заключается в различной конструкции термопар. В приборе Дмитриева провода термопар имеют так называемые температурные петли, обгибающие эбонитовую пластинку, на которой они смонтированы. Петли делаются для того, чтобы избежать искажения теплового потока за счет выравнивания температуры проводами, а следовательно, избежать уменьшения естественного градиента температуры. При изготовлении термопар следует установить оптимальные условия, которым соответствует минимальная погрешность прибора. Для этого подбирают определенный диаметр проводов. Большое сечение проводов приводит к выравниванию разности температуры среды на противоположных сторонах прибора, а чрезмерно малое увеличивает сопротивление спикоинстантановой проволоки сечением от 0,1 до 0,3 мм и медная сечением от 0,05 до 0,2 мм.

Термомеры не имеют температурных петель. Чтобы избежать выравнивания температуры среды проводами, их сечения несколько уменьшены, а инерция прибора увеличена на несколько минут. Поскольку в природе изменение тепловых потоков в ледном массиве происходит относительно медленно (оно определяется днями, а в некоторых случаях — неделями, месяцами и годами), то увеличение инерции прибора на несколько минут не отражается на качестве измерений. В то же время конструкция термомера позволяет увеличить число спавов во много раз без усложнения самого прибора и тем самым дает возможность повысить его чувствительность.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ ПО МЕТОДУ Б. А. САВЕЛЬЕВА

Прибор, служащий для измерения термического расширения, имеет специальную часть, предназначенную для погружения в лед на нужную глубину. Она состоит из никелевого резервуара с двумя отводами (рис. 28). Регистрирующая часть представляет собой стеклянную трубку со шкалой, возвышающейся над льдом. Трубка, в зависимости от глубины погружения, может иметь разную длину. Один отвод служит соединением резервуара со стеклянной трубкой, а второй — для пропуска воды внутрь резервуара медноконстантановой термопары, предназначенной для измерения температуры толуола, который заполняет резервуар и частично трубку. В качестве заполняющей жидкости толуол выбран из-за его низкой температуры затвердевания, равной  $-94,5^\circ$ . Толуол может быть получен в чистом виде, он не смешивается с водой. Поэтому при его применении в чистом виде обеспечивается постоянство коэффициента расширения.

Принцип действия прибора основан на том, что расширяющийся лед сжимает сосуд и выдвигает толуол вверх по измерительной трубке. При

этом объем поднявшегося толуола равен приращению объема за счет образования льда из рассола.

Введя поправки на изменение объема в результате теплового расширения или сжатия никелевого резервуара и самого толуола, можно вычислить приращение льда. Измерение температуры толуола во время опыта регистрировалось при помощи термопары. Учитывая, что заметные колебания температуры в ледном покрове имеют сравнительно большой период, измеренный часами, мы можем без большой погрешности в расчете принять температуру толуола равной температуре никелевого резервуара. Цена деления измерительной трубки устанавливается по весу вытекающей дистиллированной воды точно отмеренного объема с последующим перерасчетом. Для этого у измерительной трубки несколько ниже шкалы установлен край, с помощью которого регулируется количество воды, выпускаемой для взвешивания.

Для определения поправки на сжатие толуола устанавливается вес толуола, заполняющего резервуар до нулевой отметки на шкале при  $20^\circ$ . С этой целью взвешивается сначала пустой прибор, а затем — с толуолом. В последующем толуол заливается в прибор по весу. Зависимость приращения объема толуола от изменения его температуры определяется уравнением:

$$\Delta v = \frac{g_m}{d} \beta (t_1 - t_2) - \frac{g_m}{d}, \quad (37)$$

где  $g_m$  — вес толуола при  $20^\circ$ ,

$d$  — удельный вес толуола при  $20^\circ$ ,

$\beta$  — объемный коэффициент толуола,

$t_1$  — начальная температура ( $20^\circ$ ),

$t_2$  — конечная температура,

$\Delta v$  — приращение объема.

Чтобы определить поправку на изменение емкости никелевого резервуара, происшедшее вследствие температурного сокращения никеля, необходимо вычислить изменение поверхности резервуара, найти радиус измененного объема и вычислить приращение объема. Коэффициент линейного расширения никеля, в интервале температур от  $0^\circ$  до  $-190^\circ$ ,

$$d = \frac{dl}{dt} = 1,89 \text{ мм.}$$

Увеличение (уменьшение) поверхности резервуара:

$$4\pi r^2 d (t_1 - t_2) = S_1.$$

Если первоначально поверхность резервуара составляла  $S_0 = 4\pi r^2$ , то приращение поверхности выразится так:

$$\Delta S = S_1 - S_0 = 4\pi r^2 [2d(t_1 - t_2) - 1].$$

Найдем радиус конечного объема резервуара:

$$S_1 = 4\pi r_1^2 = 8\pi r^2 d (t_1 - t_2),$$

$$\text{откуда } r_1 = r \sqrt{2d(t_1 - t_2)}.$$

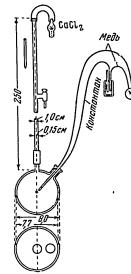


Рис. 28. Схема прибора для измерения термического расширения льда.

Объем резервуара после сокращения определится уравнением:

$$v_{рез} = \frac{4}{3} \pi r_1^3 = \frac{4}{3} \pi r^2 \sqrt{[2d(t_1 - t_2)]^2 - 1}.$$

Приращение объема в результате сжатия никелевого резервуара:

$$\Delta v_{рез} = \frac{4}{3} \pi r^2 [V \sqrt{[2d(t_1 - t_2)]^2 - 1}]. \quad (38)$$

Принимая, что  $\Delta h$  — разность отсчетов уровня толуола в трубке — соответствует определенному объему толуола  $v_t$ , где  $v_t = \pi r_2^2 \Delta h$  ( $r_2$  — радиус капилляра трубки), истинное объемное приращение льда  $\Delta h$  определится выражением:

$$\Delta h = v_t - \Delta v - \Delta v_{рез}. \quad (39)$$

Приращение, отнесенное на единицу длины, примет вид:

$$\frac{\Delta h}{S} = \frac{v_t - \Delta v - \Delta v_{рез}}{S_1}. \quad (40)$$

Подставляя в уравнение (40) найденные значения  $v_t$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta v_{рез}$  и  $S_1$ , получим следующее выражение:

$$\frac{\Delta h}{S} = \frac{\pi r_2^2 \Delta h - \frac{8m}{d} [\beta(t_1 - t_2) - 1] - \frac{4}{3} \pi r^2 [V \sqrt{[2d(t_1 - t_2)]^2 - 1}]}{8\pi r^2 d(t_1 - t_2)}. \quad (41)$$

Для измерения напряжений, возникающих во льду, на наружную часть прибора наклеивается проводочный электродатчик, который соединен последовательно с другим таким же датчиком, укрепленным внутри резервуара. Подобное соединение дает возможность исключить влияние температуры. Измерение производится компенсационным методом. Градуировка тензодатчиков, установленных на приборе, осуществляется в специальной камере, заполненной жидкостью, где изменение давления отмечается по манометру.

Для установки прибора во льду вырубает лунку и погружает его на нужную глубину. Специальные распорки придают трубке вертикальное положение. В процессе отсчета температуры контрольный спай термомпары должен иметь постоянную, точно установленную температуру. Для этого его помещают в сосуд Дьюара с тающим льдом.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛЬДОМ ЛУЧистой ЭНЕРГИИ ПО МЕТОДУ А. Г. КОЛЕСНИКОВА И Б. А. САВЕЛЬЕВА

При проведении опытов по облучению льдов использовались: осветительная лампа мощностью в 1500 вт, пирометр Янишевского с фильтрами и стрелочный гальванометр чувствительностью  $10^{-6}$  а.

Применявшиеся в работе светофильтры представляли собой стеклянные плоско-параллельные пластинки. На рис. 29, 30 и 31 представлены спектральные характеристики светофильтров  $W_7$ ,  $R_2$  и  $B_2$ . Фильтр  $W_7$  отсекает от лучистой энергии ультрафиолетовую часть спектра, фильтр  $R_2$  пропускает половину видимой части спектра, а фильтр  $B_2$  пропускает видимую часть спектра с длиной волны от 300 до 600 мк и длинноволновую инфракрасную радиацию от 1200 до 2800 мк.

Градуировка пирометра вместе со стрелочным гальванометром осуществлялась методом сличения его показаний с показаниями эталонного

пирометра, чувствительность которого известна. Установка состояла из осветительной лампы, включаемой в сеть через потенциометр, эталонного пирометра и градуированного пирометра. Потенциометр позволял изменить мощность лампы до требуемой освещенности. Сначала производился отсчет по эталонному пирометру, после чего на то же место помещался градуированный пирометр и отмечались его показания. Для большей

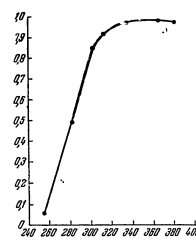


Рис. 29. Спектральная характеристика светофильтра  $W_7$

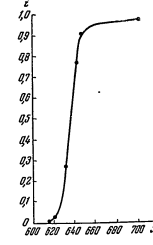


Рис. 30. Спектральная характеристика светофильтра  $R_2$

точности производили несколько таких отсчетов при незначительных изменениях мощности лампы. Чувствительность градуированного пирометра

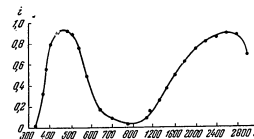


Рис. 31. Спектральная характеристика светофильтра  $B_2$

определялась из уравнения, употребляемого в Центральной аэрологической обсерватории Главного управления гидрометслужбы:

$$\eta = \frac{\alpha \cdot 10^6 (r_n - r_s)}{r_{cp}} \cdot \frac{(n + \delta_n)}{n_1}, \quad (42)$$

где  $\alpha$  — чувствительность эталонного пирометра, равная 0,925 мв/деление,

$r_n$  — сопротивление эталонного пирометра, равное 40 ом,

$r_s$  — сопротивление эталонного гальванометра, равное 41 ом,

$n$  — отклонение эталонного гальванометра,  
 $\delta_n$  — поправка на отсчет по эталонному гальванометру,  
 $n_1$  — отклонение градуируемого гальванометра,  
 $P_{сп}$  — чувствительность эталонного пирометра, равная 13,7 в на одну калорию,  
 $\eta$  — чувствительность градуируемого пирометра, равная числу калорий на одно деление гальванометра.

Результаты сличения показаний применяющегося пирометра с соответствующими показаниями эталонного пирометра приведены в табл. 10. С точностью до второго знака чувствительность использующегося пирометра принята равной 0,01 калории на деление.

Таблица 10

Результаты сличения с эталонным пирометром							
$n$	52,2	50,0	47,0	45,4	42,2	41,0	42,0
$n + \delta_n$	50,0	48,6	44,8	43,2	40,0	38,8	39,8
$n_1$	28,5	27,1	25,5	24,1	23,0	21,8	22,2
$\eta$	0,00957	0,00980	0,00960	0,00980	0,00950	0,00973	0,00980

Методика измерения поглотительной способности льда и снега состоит в определении количества падающей лучистой энергии, энергии, отраженной от поверхности, и в измерении количества энергии, прошедшей через лед и снег. Разность вошедшей и вышедшей энергии дает количество ее, поглощенное льдом или снегом.

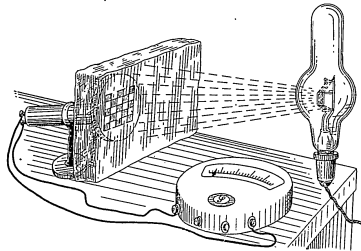


Рис. 32. Схема облучения льда при определении поглощения лучистой энергии

Падающая и отраженная радиация определялись при одном и том же расстоянии от лампы до пирометра. Для определения количества падающей энергии измерялось расстояние от центра излучательного венчика лампы до поверхности пирометра. Непосредственно у лампы, против ее венчика помещался непроницаемый диск с площадью, равной площади пи-

рометра. Расстояние от диска до пирометра точно фиксировалось. Пирометр устанавливался приемной частью перпендикулярно к падающему лучу. Включалась лампа и спустя несколько минут, необходимых для создания устойчивого накала нити лампы, производился отсчет по гальванометру. При измерении отраженной энергии на место пирометра устанавливалась льдина или кусок снега облучаемой поверхностью к падающему лучу, а на место затеняющего диска — пирометр. В одном из наших опытов найденная таким образом величина отраженной энергии для льда равнялась 31%, а для снега — 63%.

Расстояние между пирометром и облучаемой поверхностью сохранялось такое же, как и между затеняющим диском и пирометром в первом случае. При облучении льда затеняющий диск вновь ставился около лампы на прежнее место, а пирометр устанавливался за льдину, вплотную к ее поверхности (см. рис. 32).

Применение затеняющего диска позволило осуществлять однородное воздействие лучистой энергии при измерении отражений, падающей и проходящей радиации. Вычисление коэффициента и величины поглощения лучистой энергии слоем льда или снега производилось с помощью уравнений (43) и (44):

$$\beta = \frac{0,009^2 I_n r_0^2}{I_{сп}^2 r_1^2} \quad (43)$$

$$\Delta Q = I_{сп} \frac{r_0^2}{(r_0 + r)^2} (e^{-(n-1)\beta} - e^{-n\beta}) \text{ кал/см}^2. \quad (44)$$

Здесь  $\beta$  — коэффициент поглощения лучистой энергии льдом,

$I_n$  — энергия падающего луча,

$I_{сп}$  — энергия луча, прошедшего через льдину,

$r_0$  — расстояние от источника облучения до льда,

$r$  — толщина облучаемой пластинки,

$\Delta Q$  — количество тепла, поглощенное в единице объема льда, образованного телесным углом в 1 стерадиан, отстоящим на  $n$  см от облучаемой поверхности,

$e$  — основание натурального логарифма.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Методы изучения структуры льда . . . . .	3
II. Измерение плотности и фазового состава льда . . . . .	21
III. Общие указания по испытанию льда на прочность . . . . .	28
IV. Методы изучения термических свойств льда . . . . .	43

*Изучение механических и физических свойств льда*

Редактор *Б. И. Силькин*

Сдано в набор 23/У 1957 г. Подписано к печати 28/VI 1957 г. Формат А(Х)МФ(а). Тираж 1500 экз.  
Изд. № 2020. Тип. зак. № 1604  
Издательство Академии наук СССР, Москва В-64, Подкопский пер., 21  
2-я типография Издательства АН СССР, Москва Г-99, Шубинский пер., 10

Безопасно