

на правах рукописи

Епифанов Виктор Павлович

**АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
ПРЕСНОВОДНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ЛЬДА**

01.02.04 механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва —2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Официальные оппоненты: **Брагов Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, Научно-исследовательский институт механики ННГУ, заведующий лабораторией

Назарова Лариса Алексеевна, доктор физико-математических наук, профессор, Институт горного дела СО РАН, главный научный сотрудник

Радченко Владимир Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет, заведующий кафедрой Прикладной математики и информатики.

Ведущая организация: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет.

Защита диссертации состоится 17 мая 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.240.01 при ИПМех РАН по адресу: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН и на сайте <http://ipmnet.ru>

Автореферат разослан 27 марта 2018 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д002.240.01
Кандидат физико-математических наук

Е.Я. Сысоева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе непосредственно в процессе механических испытаний количественно исследованы акустическими методами деформационные изменения структуры пресноводного льда. Работа содержит экспериментальный материал как в плане развития акустических методов исследований, так и фактических результатов исследования микромеханики льда в широком интервале термодинамического состояния. Для этого разработан комплексный подход и создан акустико-механический измерительный комплекс. В результате систематических исследований установлены закономерности накопления микроповреждений. Установлены новые и малоизученные эффекты в механике деформирования и разрушения льда: увеличение пластичности под действием импульсов напряжений, формирование пластической макрзоны вблизи вершины трещины, смещение акустического спектра разрушения типа stick-slip. Исследованы процессы формирования промежуточного слоя при истечении и ударе. Предложены модели для количественного определения деформационных изменений структуры льда при нелинейных деформациях, причём параметры моделей определяются экспериментально с помощью акустико-механического метода.

Актуальность темы диссертации связана с исследованием деформационных изменений микроструктуры пресноводного поликристаллического льда в процессе его нагружения внешним силовым полем. Именно процессы изменения структуры материала на микроуровнях определяют его макроскопические характеристики. Применение акустических методов для исследований этих процессов вполне оправдано, так как акустические методы обладают особой чувствительностью к структурным особенностям материала. Исследование механизмов деформационных процессов даёт основу для обоснованного выбора реологического соотношения и, соответственно, для решения практических задач. Процессы накопления дефектов как в линейной стадии нагружения, так и в области трещинообразования являются преобладающими во многих геофизических системах, например в ледяном покрове. Эти процессы играют немаловажную роль, но недостаточно исследованы. Поэтому тема диссертации, акустические методы в механике деформирования и

разрушения пресноводного поликристаллического льда, является актуальной.

Объектом исследования в диссертации является пресноводный лед структурной модификации Ih (модификация гексагональной сингонии). Исследуются акустические, деформационные и прочностные свойства льда при различных видах механического нагружения, в которых эти свойства интерпретируются в терминах деформаций, напряжений, кристаллической структуры.

Целью работы является развитие направления механики деформирования и разрушения пресноводного льда при наличии деформационных изменений его структуры и текстуры.

Для достижения намеченной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка методологического подхода к лабораторным экспериментам по исследованию накопления деформационных дефектов и разрушения пресноводного льда в испытаниях на сжатие, растяжение, изгиб, удар и истечение через канал.
2. Разработка акустико-механического метода, основанного на измерении акустических характеристик льда непосредственно в процессе механических испытаний во всем диапазоне нагрузок, включая предельные нагрузки.
3. Исследование влияния на акустические свойства льда деформационных дефектов, включая искусственно созданных во льду.
4. Установление количественной связи параметров зондирующего акустического импульса с эффективным размером искусственно созданных и деформационных дефектов во льду.
5. Изучение формирования и свойств промежуточного слоя при сдвиге в условиях высокого гидростатического давления.

Методы исследования, используемые для решения поставленных задач:

1. Акустические методы (импульсно-фазовый ультразвуковой с рабочим диапазоном частот от 0,1 МГц до 100 МГц, метод акустической эмиссии от 100 Гц до 20 кГц).
2. Методы структурной микроскопии и фрактометрии.

3. Методы механических испытаний на сжатие, растяжение, изгиб, удар и метод интенсивной пластической деформации.

Для построения теоретических моделей использованы основные уравнения механики сплошной среды, разрушения и теории распространения упругих волн в твёрдом теле.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. В экспериментальной механике деформируемого твёрдого тела впервые синхронно применены методы зондирующих акустических импульсов и деформационной акустической эмиссии непосредственно в процессе механического нагружения. Причём изменение микроструктуры льда по акустическим параметрам контролировалось во всей области напряженного состояния. Предложена и на большом фактическом материале проверена реологическая модель, учитывающая накопление деформационной поврежденности и исходные особенности структуры льда.

2. Получена качественно новая информация о процессах трещинообразования, в частности оценены размеры образующихся трещин, их ориентация, процессы залечивания трещин и количественно выявлены закономерности их накопления.

3. Впервые изучен механизм деформирования и разрушения поликристаллического пресноводного льда непосредственно в процессе ударного нагружения и сдвига в условиях гидростатического сжатия.

4. Разработаны реологические модели пресноводного льда, учитывающие деформационные изменения структуры, причём указан способ определения констант. Установлена количественная связь между микроскопическими и макроскопическими характеристиками льда. Принципиально новым является не столько факт применения реологической модели, учитывающей изменение микроструктуры в процессе деформирования, но, прежде всего, определение с помощью акустических методов *количественных* характеристик этих изменений и, кроме того, обоснованное применение принципа температурно-временной суперпозиции для прогнозирования механического поведения льда данной структуры в широком диапазоне граничных условий. В то время как использование модели типа Глена ограничено интервалом фактических экспериментальных наблюдений.

5. Обнаружена и исследована пластическая макрообласть предразрушения, предваряющая рост трещины в пресноводном льде.

6. Исследовано влияние структуры льда на режим скольжения. Установлены эффекты излучения повторяющихся акустических импульсов (типа stick-slip) и периодического смещения частоты генерируемых акустических импульсов на пластическом фрикционном контакте.

Достоверность и обоснованность результатов. Результаты получены с использованием известных методов механики деформируемого твёрдого тела, физической акустики и спектрального анализа. Некоторые решения получены аналитически, их достоверность обеспечивается корректной постановкой задачи и аккуратным использованием аналитических методов. Достоверность результатов измерений подтверждается сравнением полученных данных с численными результатами, а также сопоставлением получаемых результатов с данными, опубликованными другими исследователями.

Практическая значимость работы.

1. Разработан акустико-механический метод количественного определения деформационных изменений структуры без разгрузки исследуемых образцов, который может применяться в различных областях инженерной практики, например, для прогнозирования локальных снежных обвалов.

2. Разработанное для экспресс оценки твердости льда и снега портативное измерительное устройство «пенетрометр» применимо для других материалов, например, бетона, асфальтобетонов, пластмасс.

3. Разработанный способ калибровки пьезоэлектрических акселерометров не требует применения дорогостоящих стендов и позволяет калибровать всю измерительную линию, а не только датчик, в полевых условиях.

5. Предложена методика идентификации образцов перед испытаниями, которая существенно снижает разброс и повышает достоверность результатов измерений. Разработки защищены пятью авторскими свидетельствами и внедрены в практику научных исследований. Так, пенетрометр утвержден Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в качестве штатного прибора для определения динамической твердости слоев снежного покрова ("Руководство по снеголавинным работам" РД

52.37.613-2000). Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования механических свойств льда и снега, для моделирования процессов разрушения глубинных горных пород, для целей ледовой навигации, оперативного контроля ледяных взлетно-посадочных полос, нагруженной ледяным полем опоры или ледостойкой платформы, повышения эффективности противолавинных предупредительных спусков, оптимизации и управления процессами разрушения льда. А также в исследованиях, ведущихся в Крыловском государственном научном центре, Институте физики Земли РАН, Высокогорном геофизическом институте, Институте географии РАН, ААНИИ и других научно-исследовательских институтах.

Апробация работы. Результаты по теме диссертации получены в ходе выполнения работ в рамках грантов РФФИ №03-05-64341_a; №07-05-01063_a; № 11-05-00863_a; № 15-05-07767_a, а также в работах, проводившихся в ИПМех РАН по программе «Арктика». Ниже представлен список публичных научных мероприятий, на которых были доложены и обсуждены положения диссертационного исследования и материалы диссертации: Семинар по механике сплошной среды имени Л.А. Галина ИПМех РАН под руководством профессора А.В. Манжирова (Москва, 2017); XI (Казань, 2015 г.), X (Нижний Новгород, 2011 г.), IX (Нижний Новгород, 2006), VIII (Пермь, 2001), VII (Москва 1991), VI (Ташкент 1986), V (Алма-Ата, 1981) съездах по теоретической и прикладной механике, а также на Международном симпозиуме "Interpraevent 1996" (Germany, Garmisch-Partenkirchen), Международном симпозиуме "Snowsymp'94" (India, Manali, HP), 1-ом советско-американском симпозиуме по механике льда и ее приложениям (Москва, 1991), 1-ой, 2-ой и 3-ей Всесоюзных конференциях по механике и физике льда (Москва, 1981, 1983, 1988), 2-ом и 3-ем Всесоюзных совещаниях по лавинам (Кировск, 1986, Нальчик, 1990), "Ледотермические проблемы в северном гидротехническом строительстве и вопросы продления навигации" ("Лед-87") (Архангельск, 1987), Восьмой Всесоюзной Акустической конференции (Москва, 1973), 4-ой Всесоюзной конференции "Методика и техника ультразвуковой спектроскопии" (Каунас, 1980), 4-ой Всесоюзной конференции "Смешанные задачи механики деформируемого тела" (Одесса, 1989), Выездном заседании научного совета по трению и смазкам "Современные проблемы теории контактных взаимодействий" (Луцк, 1987), 8-ой Всесоюзной

конференции по прочности и пластичности (Пермь, 1983), Семинар по механике деформируемого твердого тела. Руководитель: академик РАН И.Г. Горячева (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова (2015)).

Личный вклад автора. Работы [1-26 и 30] выполнены автором самостоятельно. В работах [27, 28] автором выполнена постановка задачи, разработка методики измерений, подготовка аппаратуры, анализ и интерпретация полученных результатов и подготовка публикации, совместно с Р.В. Юрьевым выполнялись полевые измерения, совместно с инженером И.Ю. Ворониной выполнялись лабораторные измерения и оформление публикации. В работе [29] автором выполнены разработка методики измерений, подготовка аппаратуры, проведение измерений и оформление публикации, совместно с Р.В. Гольдштейном выполнена постановка задачи и анализ результатов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Количество страниц в диссертации — 211, в том числе иллюстраций — 130, таблиц — 23.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко описана история развития исследований физико-механических свойств пресноводного льда, излагается общий взгляд автора на необходимость установления связи между макро свойствами льда и его микроскопическим строением. Формулируется цель работы, перечисляются задачи и экспериментальные методы, с помощью которых достигается их решение.

Первая глава содержит обзор литературы по применению акустических методов в механике деформирования и разрушения пресноводного льда для исследования деформационных процессов, включая работы, опубликованные по этой теме автором диссертации. Показана необходимость комплексного подхода к решению поставленной цели. Дано описание созданного автором в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН для этих целей измерительного акустического комплекса «ТРЕК» (рис. 1, 2).

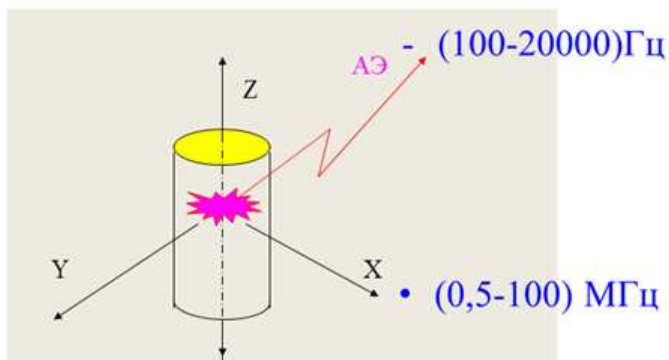


Рис. 1. Схема определения акустических характеристик льда импульсным методом прозвучивания вдоль осей X, Y, Z и методом акустической эмиссии



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Вторая глава посвящена исследованию микромеханики упругого деформирования пресноводного поликристаллического льда при линейных и нелинейных деформациях в широком интервале термодинамических параметров.

Сначала в *ненагруженном состоянии* определены необходимые и достаточные условия применения ультразвука к исследованию упругости льда. Рассчитаны длины дислокаций и их концентрации. Исследовано упругое поведение льда вблизи точки плавления. Установлено, что в пресноводном льде Ih при напряжениях $5 \cdot 10^4$ Па, создаваемых ультразвуковой волной в диапазоне частот от 500 кГц до 80 МГц, в интервале температур от -40°C до $-0,15^\circ \text{C}$ реализуется амплитудно-независимый механизм деформирования.

Далее в *напряженном состоянии* с помощью импульсно-фазового метода определены физические пределы упругости и

механизм упругого гистерезиса. Репером для нахождения физического предела упругости является точка резкого увеличения избыточного поглощения. Так, в трансверсально-изотропном льде с размером кристаллитов 10 мм при $-5,4^{\circ}\text{C}$ и скорости деформации $0,05\text{ 1/с}$ упругая деформация льда составляет менее 1% ($0,56\%$), а истинный предел упругости $(0,34\pm 0,01)\text{МПа}$. Концентрация дислокаций вблизи предела упругости возрастает более чем в 2000 раз. Отклонения от упругого поведения для льда проявляются в явлении запаздывающей или задержанной упругости (рис. 3, 4).

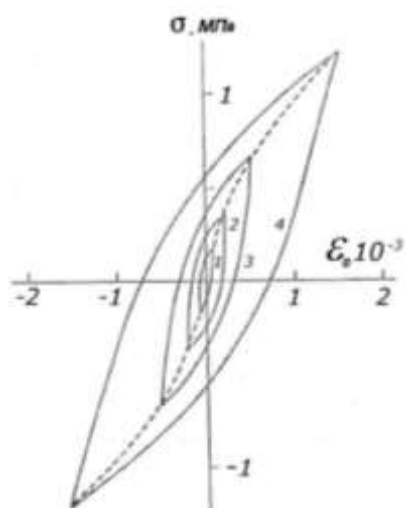


Рис. 3. Петли упругого гистерезиса в поликристаллическом льде для разных напряжений (изгиб консольной балки).

Упругое возмущение распространяется со скоростью звука, однако равновесное состояние при квазистатическом нагружении достигается за время порядка ста минут и зависит от условий нагружения.

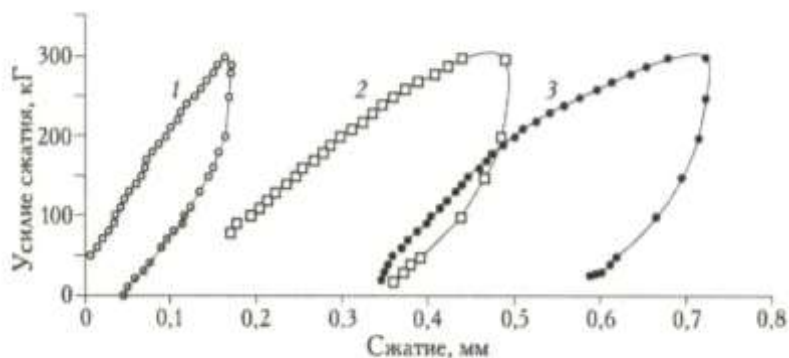


Рис. 4. Циклическое сжатие образцов столбчатого льда вдоль (1) и ортогонально (2, 3) оптической оси кристаллитов.

Об одинаковой природе механизмов упругого деформирования льда при квазистатическом и динамическом деформировании свидетельствует значение параметра $r = 3,64$ (отношение декремента затухания к дефекту модуля), обусловленного обратимым гистерезисным смещением дислокаций и внутренним трением.

Роль упругих напряжений в механике деформирования и разрушения льда проиллюстрирована зависимостями пороговых напряжений образования трещин и временного сопротивления от приведённой скорости деформации (рис. 5). Эти зависимости определяют условия, при которых реализуется преимущественный механизм деформирования: пластическое течение, трещинная дилатансия и хрупкое разрушение

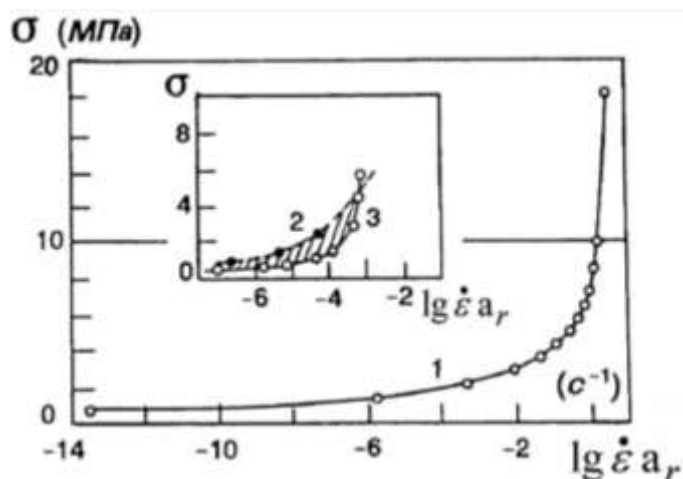


Рис. 5. Зависимости пороговых напряжений образования трещин (1) и временного сопротивления (2) от приведённой скорости деформации.

Упругие деформации лед демонстрирует на всех стадиях нагружения (рис. 5).

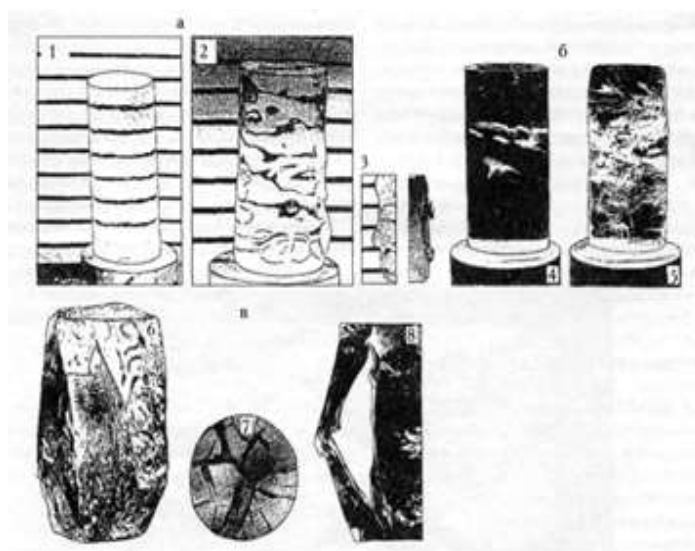


Рис. 5. Деформационные мезоструктуры: 1 - исходный образец, 2 - образец с остаточной деформацией около 6%, 3 - пластические брекчи трения, 4 - первые трещины, 5 - образец, подвергнутый сжатию, 6 - дилатансное разрушение (вид сбоку), 7 - вид снизу, 8 - пластический шарнир.

Механизм упругой деформации поликристаллического льда заключается не только в обратимом изменении равновесных расстояний между ионами кислорода в кристаллической решетке, но и в обратимом смещении дислокаций, которые сопровождаются изменением потенциальной энергии системы и диссипативными потерями.

В третьей главе представлены результаты экспериментов по исследованию кинетики накопления деформационных дефектов и механизмов разрушения пресноводного льда в процессе механических испытаний на сжатие, растяжение и удар. Теория распространения акустических волн в принципиально неоднородных средах не позволяет устанавливать зависимости между параметрами волн и сечением рассеяния дефектов. Поэтому выполнены систематические исследования и экспериментальным путём намечен способ выявления таких корреляций, и для некоторого диапазона частот обосновано применение математического аппарата механики сплошной среды для обнаружения дефектов типа трещин.

Предложены параметры и соотношения, всесторонне характеризующие лёд как твёрдое деформируемое тело. Исследовано трещинообразование льда и получены характеристики отдельных трещин, зависимости времени релаксации от температуры, напряжений и скорости деформации, а также обобщённая реологическая зависимость в форме известного соотношения Глена. При этом в явном виде определена зависимость коэффициентов определяющего реологического уравнения от структуры льда и условий нагружения. Выявлены предвестники лавинообразного разрушения. Таким образом, применение акустических методов дало возможность полного исследования физико-механических характеристик льда в процессе его деформирования. В этом смысле глава является ключевой в структуре диссертации.

Испытания на растяжение. Для описания деформационных изменений структуры льда вводится параметр Ω , который учитывает деформационные изменения структуры

$$\Omega = \Lambda L^2, \quad (1)$$

где Λ — плотность дефектов и L — их размер, и эффективный модуль $E_{эфф}$, который отражает экспериментальный факт уменьшения

упругих свойств льда при накоплении деформационных дефектов в процессе механических испытаний

$$E_{эфф} = E_0 \exp\left[-\frac{\pi}{4}\Omega\right], \quad (2)$$

где E_0 - модуль Юнга. С учётом уравнений (1 и 2) зависимость деформаций ε от напряжений σ и структуры представлена уравнением

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{эфф}}, \quad (3)$$

причём параметр Ω определяется экспериментально из акустических измерений (рис. 6).

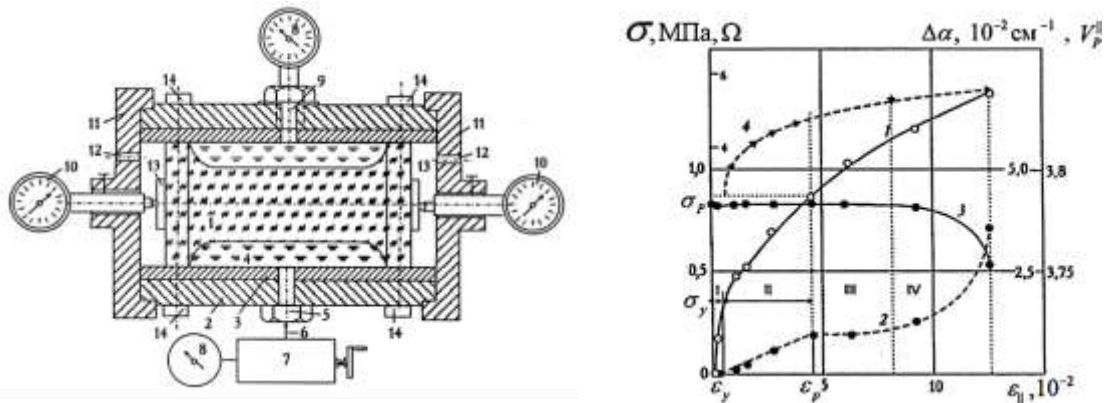


Рис. 6. Схема измерительной камеры для испытания льда на растяжение и зависимости напряжения (1), избыточного поглощения (2), скорости (3) продольных волн и параметра дефектности (4) от деформации

Уравнение (3) может быть записано также в виде

$$\varepsilon = k \sigma e^{-B\sigma}, \quad (4)$$

где $k = e^{-A}$, или применена другая аппроксимация для текущего модуля, но неизменным остаётся то, что оно отражает микромеханику

деформирования льда, причём коэффициенты находятся из эксперимента.

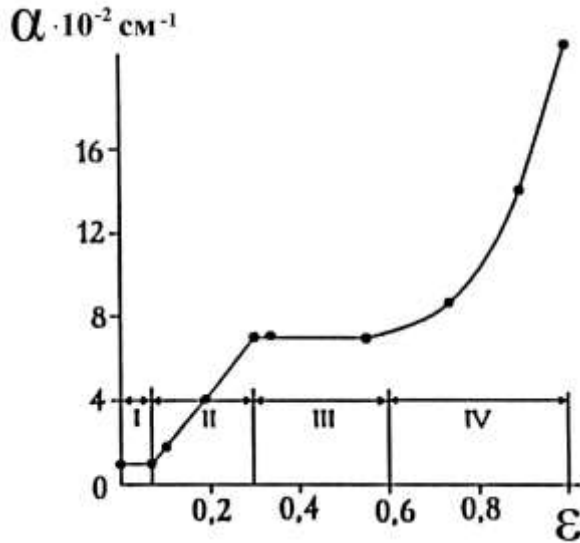


Рис. 7. Зависимость поглощения ультразвуковых волн от осевой деформации для речного льда (в безразмерном виде, $\epsilon = \epsilon / \epsilon_{\text{макс}}$); I-IV – стадии деформации

Количественная оценка накопления деформационных повреждений во льду в процессе пропорционального растяжения использована для построения акустико-реологического уравнения (5).

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left[\exp \left[-\frac{\pi}{4} \Lambda L^2 \right] \right]^{-1}. \quad (5)$$

На рис. 8 показаны фазы роста магистральной трещины в реальном масштабе времени при растяжении гантели (рис. 6). Оптическая ось кинокамеры направлена по оси растяжения ледяного образца. Съёмка выполнена в поляризованном свете.

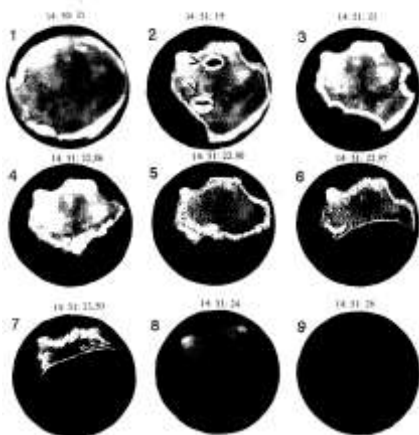


Рис. 8. Фазы роста магистральной трещины при растяжении ледяной гантели.

Распространение фронта магистральной трещины сначала вдоль кольцевого выреза позволяет рассматривать концевую область как особую структуру: после её формирования вектор фронта трещины меняет направление на ортогональное. Процесс формирования ослабленной зоны включает два механизма и две характерные скорости диссипации энергии: скорость движения трещины и скорость её залечивания.

Визуализация микроразрушений при внецентренном растяжении.

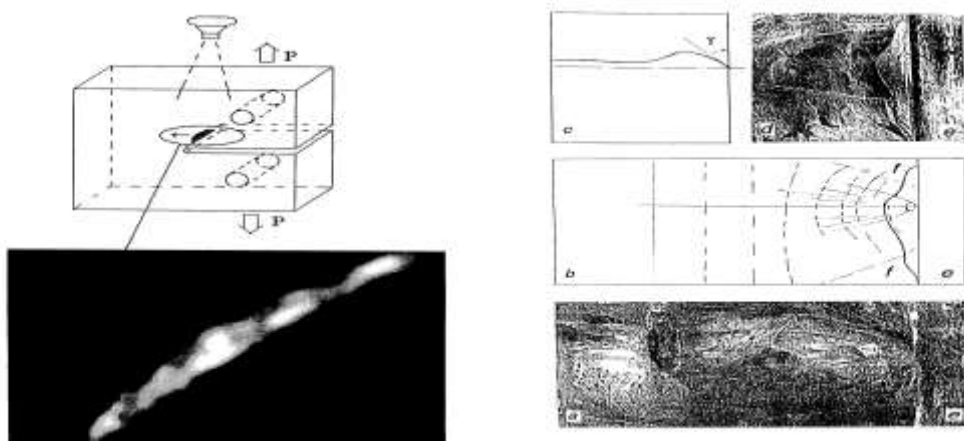


Рис. 9. Зона предразрушения и ее положение в образце льда; фрактограммы плоского (а) и объемного (с) отрыва и соответствующая плоскому отрыву схема распространения фронта трещины в плоскости надреза (b) и в ортогональной плоскости (с), е — зона пропила

Микродефекты образуются задолго до достижения предельных напряжений, причем каждому масштабу структуры соответствует свой механизм разрушения: сдвиговый механизм является определяющим на малых уровнях, а на высоких — механизм скола или отрыва. Так, при внецентренном растяжении трещина зарождается в результате пластического сдвига под углом 45° , но симметричные нормальные напряжения "загоняют" фронт трещины в плоскость надреза и ускоряют его, что обуславливает переход от пластического к хрупкому разрушению.

Испытания на сжатие. Каждой точке на деформационных кривых (относительной продольной (2) и поперечной (4) деформации) соответствуют определённые значения коэффициента ослабления

(кривая 1), дефицита скорости продольной волны (кривая 3) и сигналов акустической эмиссии (рис. 10).

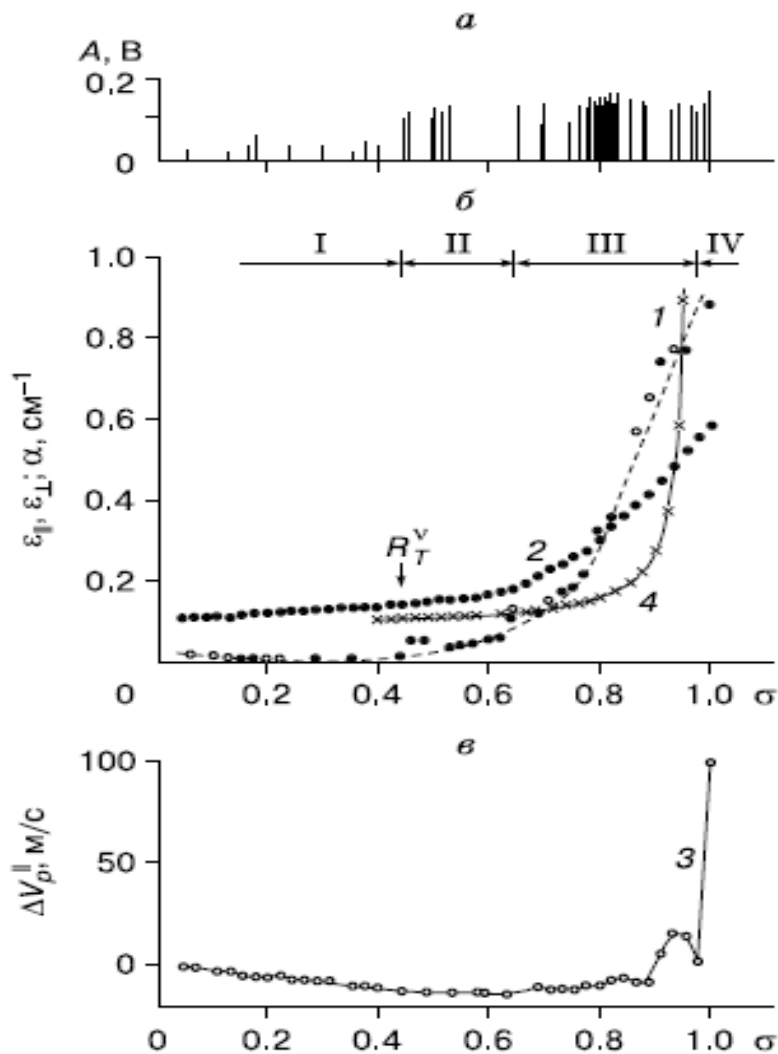


Рис. 10. Зависимости от нормированных напряжений (σ) при осевом сжатии (температура льда $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) следующих величин: а – амплитуды сигналов акустической эмиссии A, B ; б – коэффициента ослабления продольной волны α (кривая 1), относительных продольной деформации $\varepsilon_{||}$ (кривая 2) и поперечной деформации ε_{\perp} (кривая 4); в – дефицита скорости продольной волны $\Delta V_{L||}$ (кривая 3). Области: I – упругого, II–IV – пластического деформирования. R_m^V — момент образования первой видимой трещины.

Так, уменьшение амплитуды сканирующего импульса и увеличение времени его прохождения связаны с формированием видимых трещин, наоборот – их смыканием (рис. 11). Особый интерес

представляет упрочнение льда перед ростом магистральной трещины (предвестник разрушения на кривой 2 при $P > 4$ кН).

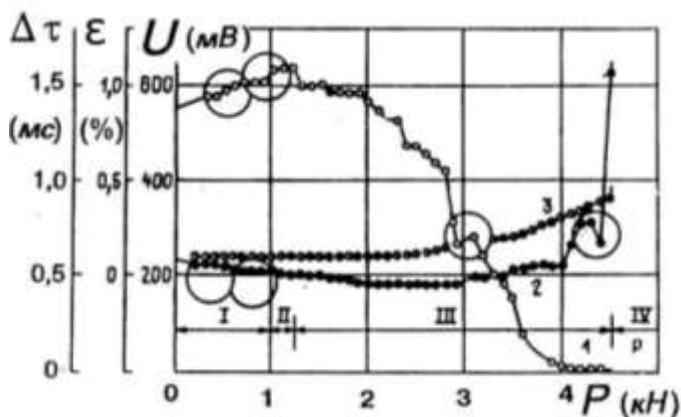


Рис. 11. Зависимости амплитуды (1) и времени прохождения (2) ультразвукового импульса, а также продольной деформации (3) от осевой силы. Скорость нагружения, температура -40°C . Кружками выделены моменты "залечивания" микротрещин.

Влияние дефектов на акустические свойства льда Связь между размером трещины и коэффициентом избыточного ослабления ($\overline{\alpha_{изб}} = \alpha_1 - \alpha_0$, где индекс 0 соответствует образцу без видимых трещин) устанавливали опытным путем по его зависимости от сечения рассеяния дефекта в диапазоне 0,5-80 МГц (рис. 12).

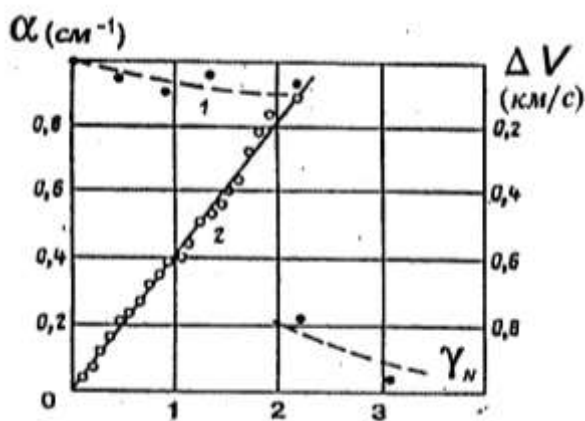


Рис. 12. Тарировочные зависимости: (1) – дефицита скорости ультразвука и (2) – избыточного поглощения от нормированного сечения дефектов.

Нормированное сечение рассеяния находили как отношение суммарной площади проекций всех трещин к миделеву сечению акустического луча

$$\gamma_N = \frac{\Xi(S_J)}{\pi R_0^2}, \quad (6)$$

где R_0 - радиус излучателя ультразвуковых колебаний. Аналогично определяли зависимость дефицита скорости (рис. 3.20 кривая 1) от нормированного сечения рассеяния трещин. Коэффициент пропорциональности K_1

$$K_1 = \gamma_N / \alpha. \quad (7)$$

в общем случае зависит от соотношения длины акустической волны и размера трещин, но для интервала частот $0,7 \div 1,5$ МГц его можно считать постоянным $K_1 = 2,5$ см. Методика нахождения коэффициента K_1 проверена на разных материалах и разных способах создания трещин.

На рис. 13 показаны спектрограммы сигналов АЭ в определённые моменты времени нагружения (0,65-0,99) и на стадиях роста магистральной трещины (1-5).

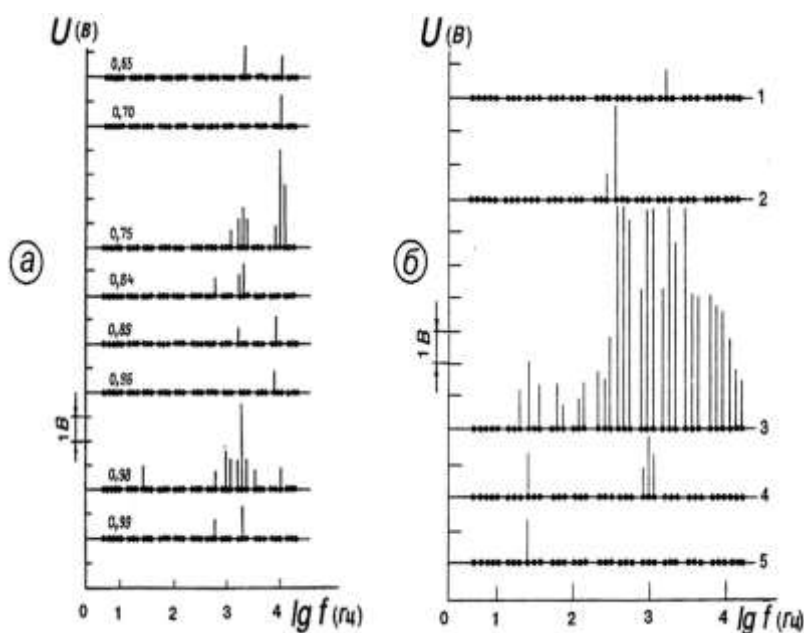


Рис. 13. Спектрограммы сигналов акустической эмиссии: а — в моменты нормированного времени нагружения $0,65 \div 0,99$, U — амплитуда, f — частота; б — спектрограммы сигналов акустической эмиссии на стадиях (1-5) роста магистральной трещины

Поскольку каждая трещина генерирует импульс акустической эмиссии, то число N деформационных трещин равно числу генерируемых импульсов. Приращение коэффициента ослабления, вызванное образованием трещины, равно $\Delta\alpha$. Согласно (7), сечение рассеяния одной трещины определяется уравнением

$$\gamma^* = \frac{\Delta \alpha K_1}{N}. \quad (8)$$

Зависимости суммарного сечения рассеяния трещин γ (1), суммарного числа сигналов N (2) и сечения рассеяния трещины (3) от времени показаны на рис. 14. Размер трещин в процессе сжатия изменяется на порядок величины. Изменяется также их наклон. Например, для безразмерного времени 0,56, 0,62, 0,69 и 0,73 углы наклона трещины к оси образца равны соответственно 7°, 30°, 31° и 90°.

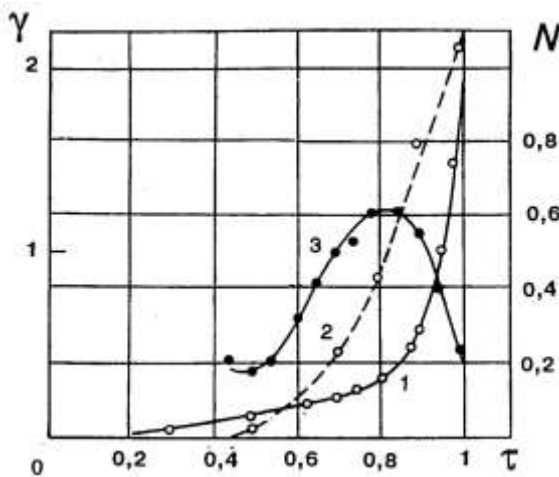


Рис. 14. Зависимости суммарного сечения трещин (1), числа сигналов АЭ (2) и эффективного сечения трещины (3) от времени нагружения

Разрушению образца предшествует некоторая предельная дефектность, обуславливающая его макропрочность. На рис. 15 показаны типичные зависимости коэффициентов ослабления для акустических лучей, направленных вдоль осей Z (кривая 1), Y (2) и X (3), и «объемного» коэффициента поглощения (4) от безразмерного напряжения. Суммарный коэффициент поглощения рассчитан по уравнению

$$\alpha = \sqrt{\alpha_X^2 + \alpha_Y^2 + \alpha_Z^2} \quad (9)$$

Из рис. 15 следует, что суммарный коэффициент поглощения ультразвука увеличивается пропорционально напряжениям сжатия. С учётом результатов тестовых опытов (рис. 12) зависимость суммарной поверхности трещин от напряжений сжатия может быть представлена линейным соотношением

$$\gamma = K_2(\sigma - \sigma_0), \quad (10)$$

где σ_0 - пороговые напряжения трещинообразования ($K_2 = 0,93$).

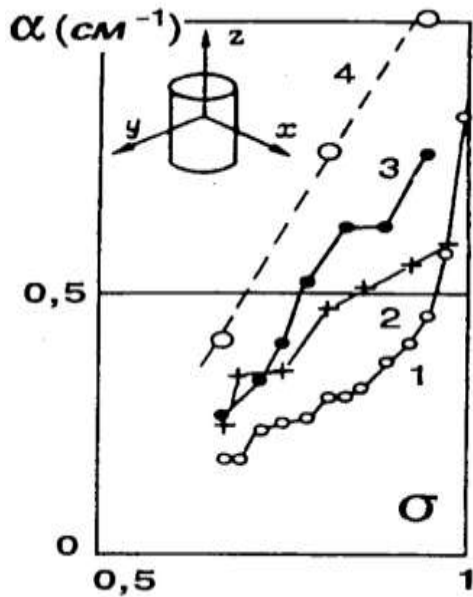


Рис. 15. Зависимости от напряжений: (1-3) — коэффициента ослабления ультразвука в направлении осей Z, Y, X и (4) - суммарного коэффициента ослабления

Таким образом, нелинейные процессы трещинообразования во льду при малых значениях (до 2%) дилатансии представлены линейными экспериментальными зависимостями, то есть найдена система координат, в которой нелинейный процесс описывается линейной функцией (7 и 10).

Реология трещиноватого льда. Деформационные изменения структуры обычно оценивают по углу наклона деформационной кривой или модулем упрочнения H

$$H = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (11)$$

причем увеличение модуля связывают с упрочнением, уменьшение - с разупрочнением, а отрицательные значения — с образованием трещин. Так, на рис. 16 для льда А4 при скорости деформации $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ приведены температурные зависимости напряжений от деформаций и зависимость модуля H от времени.

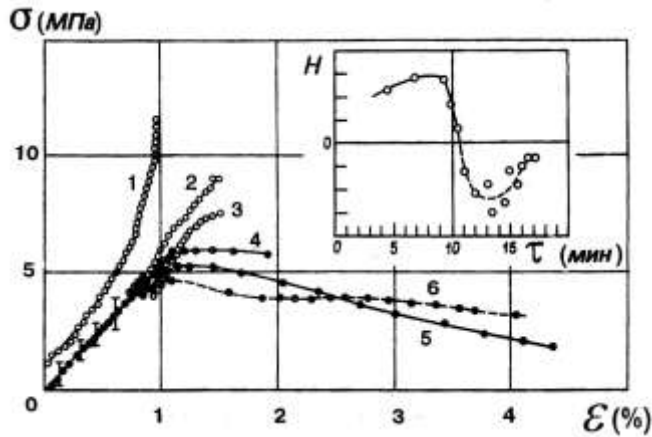


Рис. 16. Зависимости напряжений от деформации при температурах: -60°C (1), -50°C (2), -40°C (3), -30°C (4), -20°C (5), -9°C (6). На врезке зависимость модуля H от времени; линия 1 смещена вверх на 1 МПа.

Завершённость деформационных изменений структуры льда оценивается временем релаксации

$$\tau_0 = \frac{\eta}{G}, \quad (12)$$

где η - сдвиговая вязкость, G - модуля сдвига. Время релаксации вязких процессов во льду меняется от десятка минут до двух часов.

Для построения определяющего реологического уравнения, учитывающего деформационные изменения структуры, использованы представления о льде как упруго-вязком теле и фундаментальный принцип температурно-временной аналогии (рис. 17).

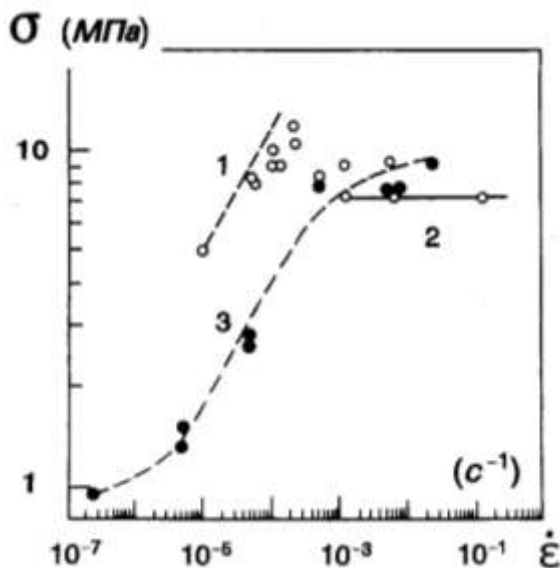


Рис. 17. Зависимости максимальных напряжений от скорости деформации.

Кривые 1,2 - заимствованы из работы [Steineman (1954)], 3 - результат измерений автора.

Для аппроксимации кривой 3 воспользуемся моделью линейного тела

$$\sigma + \tau_1 \frac{d\sigma}{dt} = G_R \left(\varepsilon + \tau_2 \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (13)$$

Времена запаздывания находим из эксперимента (рис.17)

$$\tau_1 = \frac{\eta}{G_U - G_R}, \quad \tau_2 = \frac{\tau_1 G_U}{G_R}. \quad (14)$$

На рис. 18 показаны частотные зависимости параметров линейной модели для льда типа А4 при температуре -20°C .

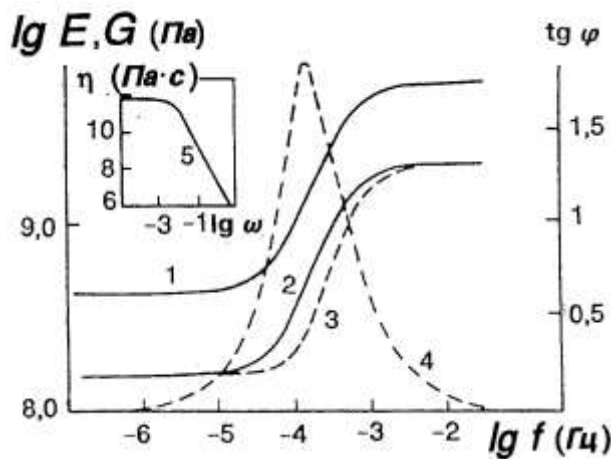


Рис. 18. Зависимости модуля Юнга (1), комплексного модуля (2), упругой компоненты комплексного модуля (3), тангенса угла потерь (4) и вязкости льда от частоты (5).

Кривые на фиг. 18 отражают переход льда из вязкотекучего в стеклообразное состояние. Уменьшение механической добротности льда до 0,5 к моменту достижения максимальных напряжений при среднем значении добротности 50 для недеформированного льда явно указывает на накопление дефектов.

Влияние дефектов на механические свойства льда для квазистатического и динамического нагружения показаны на рис. 19. Кривая 1 построена по данным измерений силы и смещений, а кривая 2 рассчитана по соотношению

$$\varepsilon_2 = \frac{P/S}{\rho V_L^2}, \quad (15)$$

где P —сила, S — несущее сечение образца, ρ — плотность льда, V_L — скорость продольных волн частотой 1 МГц в образце при заданной силе. В интервале напряжений от 0 до $0,6 \sigma$ кривые 1 и 2 в пределах точности эксперимента совпадают. Расхождение между ними проявляется с момента образования трещин.

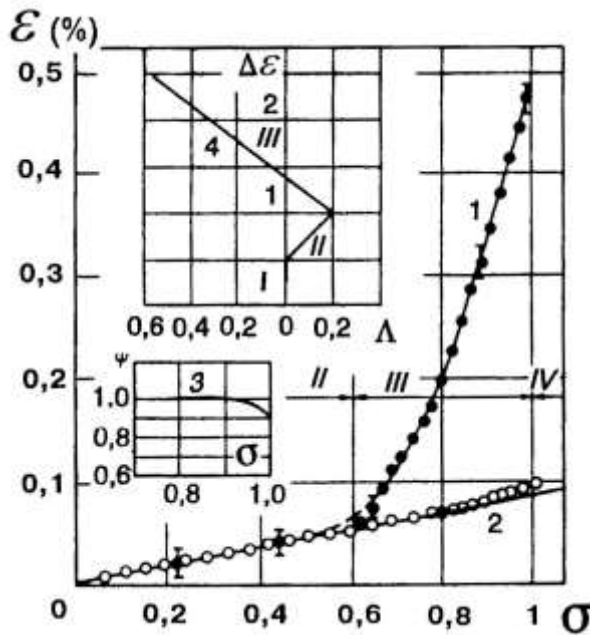


Рис. 19. Зависимости деформаций, рассчитанных по изменению скорости звука (2) и измеренных при осевом сжатии (1), от напряжения при скорости деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Поскольку кривая 2 рассчитана для высоких скоростей деформаций, то её можно рассматривать как асимптоту для кривых, полученных в квазистатическом режиме нагружения. Обусловленное трещинообразованием уменьшение несущего сечения (кривая 3) не превышает 10 %, даже для области запредельных напряжений, а дилатансия (кривая 4) — 2%.

На рис. 20 для поликристаллического льда А4 приведена обобщённая зависимость максимальных напряжений от приведённой скорости деформации при температуре приведения -20°C (сплошная кривая). Максимальные напряжения $\sigma_p = \frac{\sigma T_0 \rho_0}{T \rho}$ представлены как

функция частоты ωa_T , $a_T = \frac{[\tau_0]_T}{[\tau_0]_{T_0}}$ и T_0 - температура приведения.

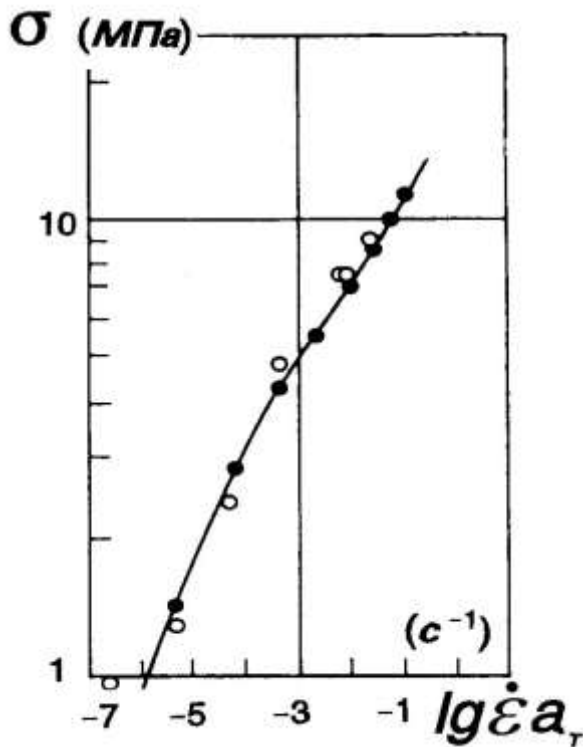


Рис. 20. Зависимость максимальных напряжений от приведённой скорости деформаций

Экспериментальные точки ложатся на расчётную кривую вплоть до $0,1 \text{ 1/с}$, что подтверждает возможность применения ко льду метода приведённых переменных.

На рис. 21 показаны типичные зависимости приведённого напряжения (1) и скорости деформации (2) от приведённого времени для льда типа А9. Кривые 1 и 2 пересекаются в точках максимальных и пороговых напряжений.

Точку с координатами

$$\left(\tau = 1, \quad \frac{\sigma}{\sigma_*} = 1, \quad \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*} = 1 \right) \quad (16)$$

выберем за точку физического подобия.

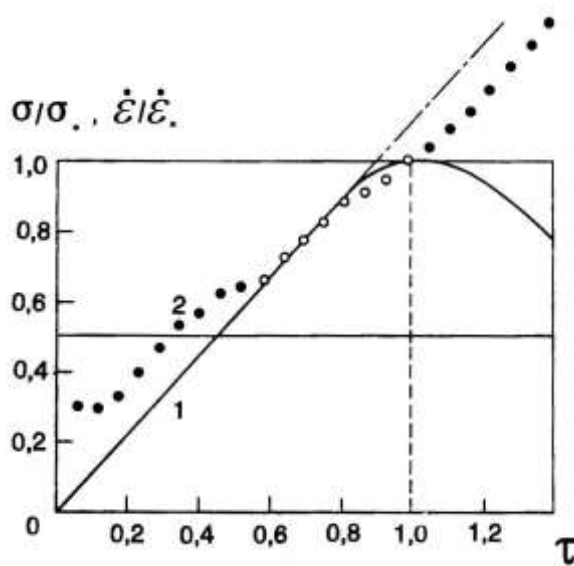


Рис. 21. Зависимости приведённого напряжения (1) и приведённой скорости деформации (2) от приведённого времени.

Для аппроксимации использовано соотношение

$$\frac{\sigma}{\sigma_*} = \exp\left(-\frac{1}{B_{SU}}\right) f\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*}\right), \quad (17)$$

где

$$f\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*}\right) = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*} - \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*} - 1. \quad (18)$$

Если представить соотношение (17) в виде

$$\frac{\sigma}{\sigma_*} = \exp \left[\frac{1}{B_{SU}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*} - 1 \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right) \right], \quad (19)$$

и ввести обозначение

$$k = \exp \left[\frac{1}{B_{SU}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*} - 1 \right) \right], \quad (20)$$

то соотношение (19) примет вид

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*} = k \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^{B_{SU}}, \quad B_{SU} = 0 \div 1, \quad (21)$$

что аналогично известной модели Глена

$$\dot{\varepsilon}_j = k \sigma_j^m, \quad (22)$$

при условии

$$\dot{\varepsilon}_j \equiv \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_*}, \quad \sigma_j \equiv \frac{\sigma}{\sigma_*}, \quad m = B_{SU}. \quad (23)$$

Соотношение (19) является эмпирическим, как и соотношение Глена (22), однако для входящих в соотношение (19) коэффициентов в явном виде определена зависимость от структуры льда и условий деформирования.

Заменим в соотношении (19) максимальные напряжения и соответствующие им скорости деформации на приведённые значения

$$\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{*P}} \right) = \exp \left[-\frac{1}{B_{SU}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{*P}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_{*P}} \right)^{B_{SU}} \right], \quad (24)$$

где

$$\sigma_{*P} = \frac{\sigma_* T \rho}{T_0 \rho_0}, \quad (25)$$

$$\dot{\varepsilon}_{*P} = \dot{\varepsilon}_* a_T = \dot{\varepsilon}_* \frac{[\tau_0]_{T_j}}{[\tau_0]_{T_0}} \quad (26)$$

Тогда для льда имеем зависимость напряжений не только от деформаций, но и от температуры (рис. 22). Так, для температуры приведения $-20,3^\circ\text{C}$ вместо шкалы температур наносится шкала скоростей деформаций с интервалом от 10^{-14} 1/с до 10^{-1} 1/с.

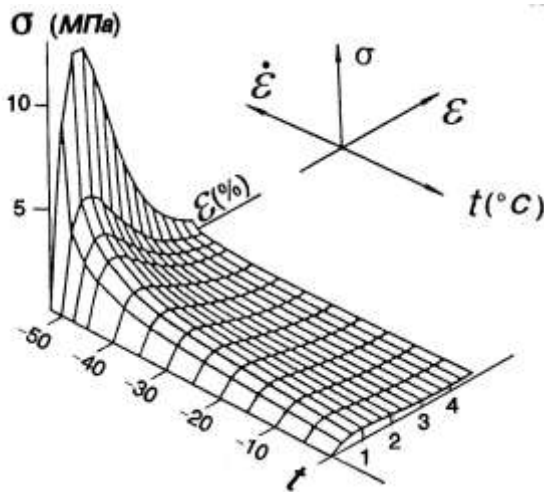


Рис. 22. Зависимость напряжений от деформации и температуры для льда типа А9.

Задача Герца в пластической постановке (теория, эксперимент). Исследованию процесса внедрения жёсткого сферического индентора в пластину, расположенную на массивном основании, предшествовал расчёт изополей касательных и нормальных напряжений (рис. 23).

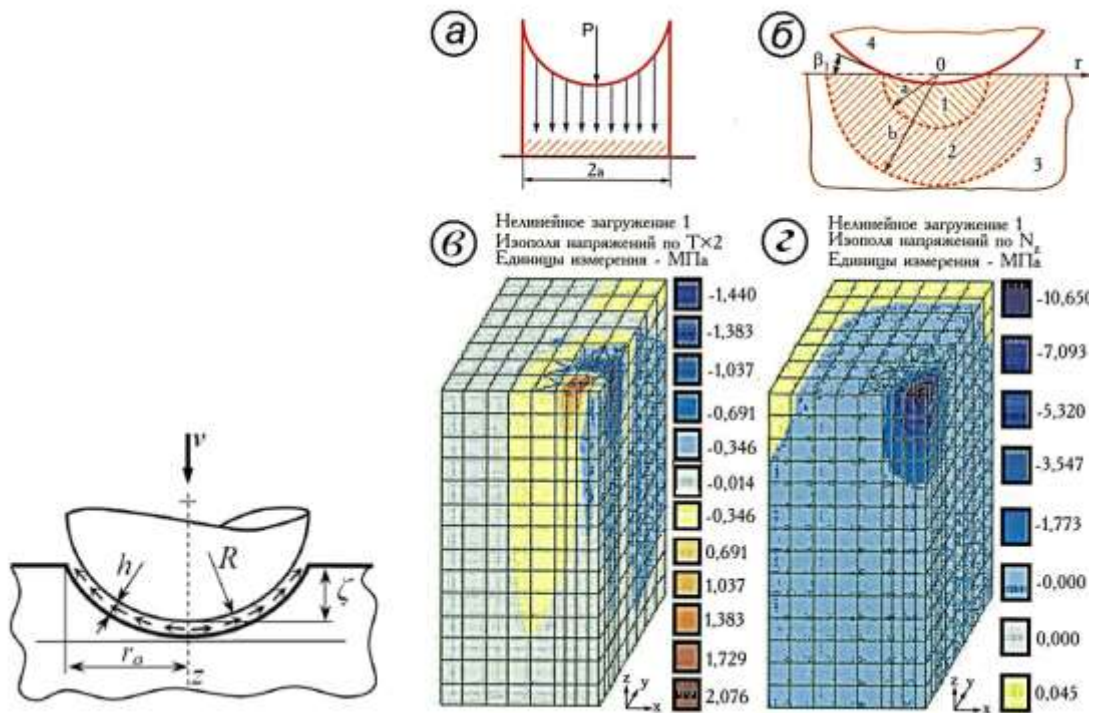


Рис. 23. Схема пластического удара. Обозначения: R – радиус индентора, ζ – глубина осадки, h – толщина промежуточного слоя; а – распределение контактного давления для плоского кругового штампа; б – модель упругопластического внедрения шарового индентора: 1 – гидростатическое ядро, 2 – пластическая зона, 3 – упругая зона, 4 – индентор; в – изополя касательных напряжений T_{xz} ; г – изополя нормальных напряжений N_z .

С помощью пьезоэлектрического акселерометра и линейной измерительной линии записывается осциллограмма ударного импульса в реальном масштабе времени, на основании которой, с учётом характеристик индентора, находится зависимость среднего контактного давления от мгновенной скорости или глубины внедрения.

Электрический заряд, который акселерометр вырабатывает при ударе, пропорционален силе, действующей на пьезоэлемент, а, значит, и ускорению индентора

$$\ddot{X}_{(\tau)} = n_3 C_3 \left[U_{(\tau)} - \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} d\tau U_{(\tau)} \right], \quad (27)$$

где n_3 — коэффициент преобразования измерительной системы, C_3 , R_3 — емкость и электрическое сопротивление измерительной линии, U — электрическое напряжение. Для жесткого сферического индентора в (27) единственной переменной является осадка $X_{(\tau)}$, т.е. глубина внедрения полюса шара в исследуемый материал. Для ее расчета использовано мгновенное ускорение $\ddot{X}_{(\tau)}$, которое непрерывно регистрируют с помощью пьезоакселерометра и измерительной линии.

Поскольку движение свободно падающего тела массой m при торможении описывается уравнением

$$\ddot{X}_{(\tau)} = g - \frac{1}{m} P_{\tau}, \quad (28)$$

где $P_{(\tau)}$ - сила сопротивления (реакция опоры), действующая на индентор со стороны исследуемого материала; $\ddot{X}_{(\tau)}$ - мгновенное ускорение, g - ускорение свободного падения, τ - время, то, последовательно интегрируя уравнение (28), получают мгновенную скорость и мгновенную осадку

$$\dot{X}_{(\tau)} = V_0 + g\tau - \frac{1}{m} \int_0^{\tau} d\tau \cdot P_{(\tau)}, \quad (29)$$

$$X_{(\tau)} = V_0\tau + \frac{g\tau^2}{2} - \frac{1}{m} \int_0^{\tau} d\tau' \int_0^{\tau'} d\tau'' \cdot P_{(\tau'')}. \quad (30)$$

Уравнения (28)-(30) являются следствием общих законов механики, по ним можно построить зависимости $P(\dot{X})$ и $P(X)$, т.е. исследовать динамические свойства соударяющихся тел (рис. 24).

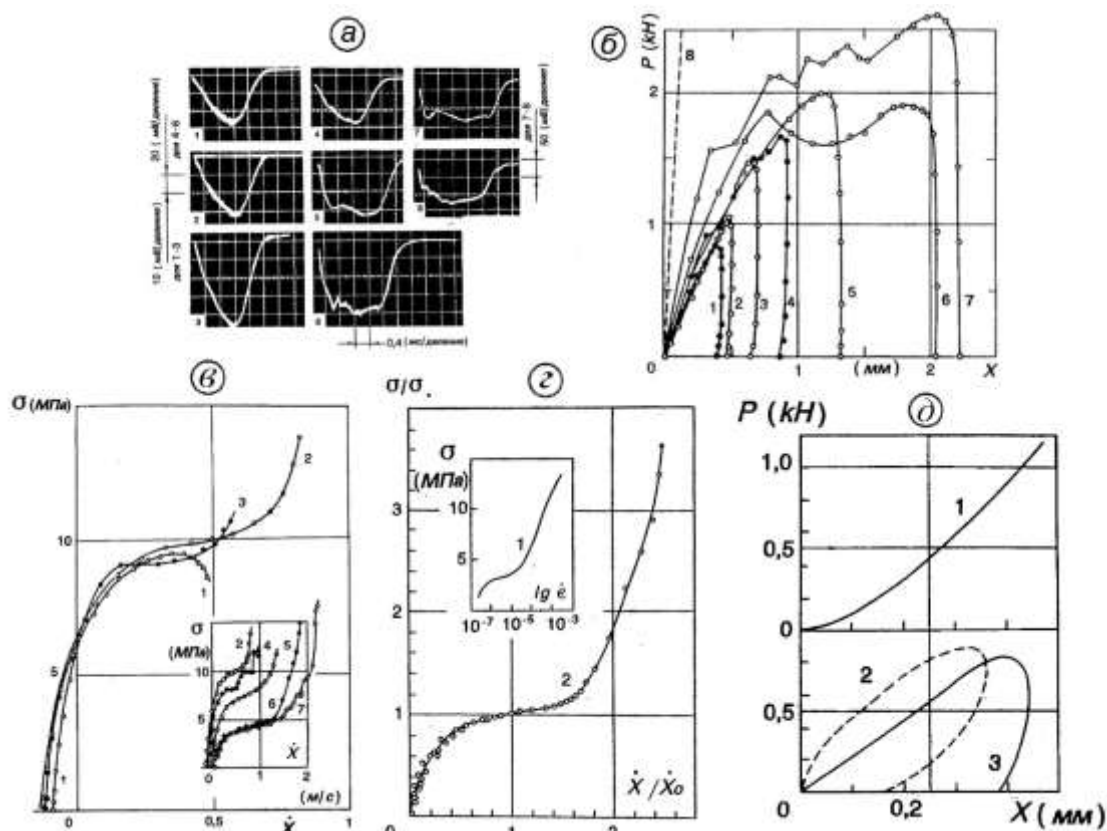


Рис. 24. Результаты измерений: а — осциллограммы ударного взаимодействия шарового индентора с ледяной пластиной в зависимости от энергии удара; б — зависимости мгновенной силы (линии 1-7) от глубины осадки, при начальных скоростях соударения 0,484 (1), 0,594 (2), 0,831 (3), 0,99 (4), 1,4 (5), 1,87 (6) и 2,23 м/с (7); 8 — теоретическая кривая; в — зависимости среднего давления от мгновенной скорости для тех же начальных скоростей удара V_0 ; г — обобщенная зависимость приведенного напряжения от приведенной мгновенной скорости удара для льда А9 (кривая 2). Кривая 1 — зависимость максимальных напряжений от скорости деформации при одноосном сжатии; д — зависимости мгновенного усилия от осадки шарового индентора, согласно Герцу (1), Кильчевскому (2), (3) — экспериментальная кривая.

На рис. 24,г обобщенная зависимость приведенного напряжения от приведенной мгновенной скорости удара представлена полукубической параболой (сплошная кривая 2). Точками показаны результаты измерений для энергий удара от 0,21 до 4,38 Дж. Расхождение рассчитанных значений с экспериментальными не превышает $\pm 2,5\%$. Сходная форма кривых 1 и 2 на рис. 24,г, по-видимому, обусловлена одинаковыми механизмами при ударе и квазистатическом деформировании льда.

Определяющее реологическое уравнение. На обобщённой зависимости (рис. 24,з) выделены участки, в пределах которых наблюдается одноподобный процесс. Так, на пассивном участке нагружения ($\dot{X}/\dot{X}_0 < 1$) для аппроксимации использовалось уравнение

$$\frac{\sigma}{\sigma_*} = \exp \left[-\frac{1}{m_e} f \left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} \right) \right] \quad \text{где} \quad f \left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} \right) = \frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - \ln \frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - 1, \quad m_e = 1,25 \quad (31)$$

Аналогичное уравнение получено при испытании на сжатие. На активном этапе соударения ($\dot{X}/\dot{X}_0 > 1$) для аппроксимации применяли уравнение

$$\frac{\sigma}{\sigma_*} = \left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - 1 \right)^{n_e \left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} \right)} + 1$$

причем для $\dot{X}/\dot{X}_0 = 1 \dots 2 \quad n_e = 2 \quad (32)$

$$\dot{X}/\dot{X}_0 > 2 \quad n_e = 0,85$$

Определяющее реологическое уравнение (31) является следствием общих законов механики и электродинамики и может быть представлено в форме записи, характерной для модели Глена, но с коэффициентами, изначально имеющими определенный физический смысл.

На основании полученных в настоящем исследовании результатов разработано измерительное устройство «пенетрометр» (рис. 25).



Рис. 25. Пенетромтр; Обозначения: 1-индентор, 2 – опорная шайба, 3 – ствол, 4 – корпус, 5 – ограничитель, 6 – спуск, 7 – фиксатор, 8 – рукоятка, 9 – выключатель

Внутри индентора (радиус 40 мм) размещен пьезоакселерометр, сигнал с которого поступает на процессор измерительного блока. Точность измерения среднего контактного давления составляет 5%, воспроизводимость на однородном материале 1%. Измеряемые величины отображаются на жидкокристаллическом индикаторе, вмонтированном в корпус пенетромтра.

Четвертая глава посвящена исследованию малоизученного в экспериментальной механике льда промежуточного слоя и установлению количественной связи между структурой льда и его макро свойствами. Для этого решались задачи физического моделирования промежуточного слоя, включая режимы обтекания льдом препятствий, исследовалась структура и кинетика её деформационных изменений, исследовалось влияние импульсов напряжений на пластичность льда. Разрабатывалась теоретическая модель, устанавливающая связь между структурой льда и его макро характеристиками. Для формирования объемных образцов льда со структурой, аналогичной структуре промежуточного слоя, был применен метод интенсивной пластической деформации.

Моделирование промежуточного слоя. Объемные образцы льда со структурой промежуточного слоя изготавливали в матрице с профилем, аналогичным соплу Лавая. Разборная матрица состояла из трёх секций (рис. 2б): загрузочной длиной L_1 диаметром $D = 57$ мм, конфузора и патрубке с диаметром канала $d = 10$ мм. Такая конструкция позволяет исследовать структуру льда в сходящихся фронтах волн конечной амплитуды.

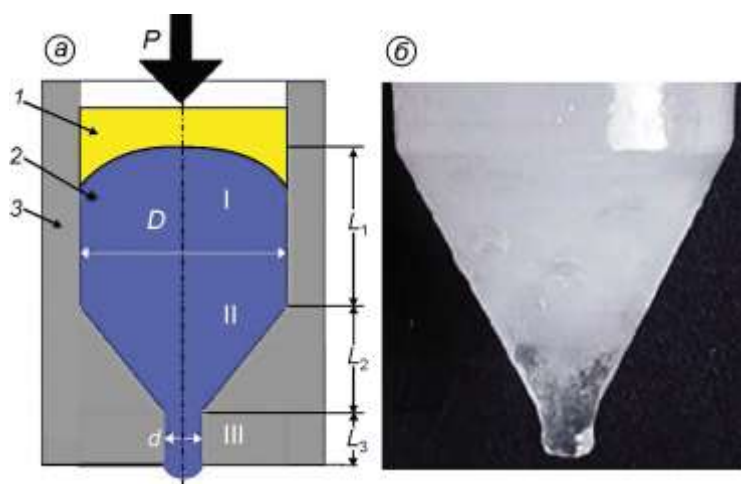
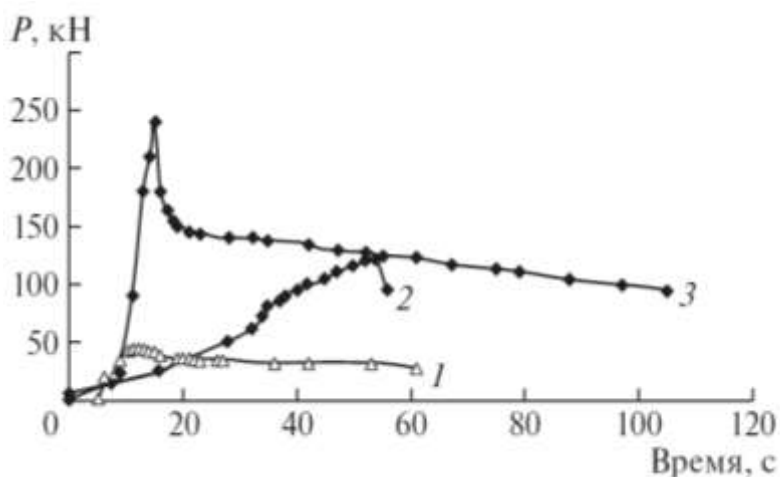


Рис. 26. Схема матрицы фрагмент образца (а) и льда, (б): 1 – пресс-штемпель; 2 – лёд; 3 – матрица; I – цилиндрическая секция; II – конфузор; III – формирующий патрубкок; L_1 , L_2 , L_3 – длины секций матрицы

Структуру льда последовательно исследовали при скольжении льда по гладкой цилиндрической поверхности, при движении в конфузоре (сдвиг в условиях гидростатического сжатия) и истечении льда.

В цилиндрической секции матрицы лёд проталкивался пресс-штемпелем как упругое тело. Пластическая деформация была локализована в тонком слое у стенок матрицы. Формирование тонкого промежуточного слоя подтверждается уменьшением эффективного упругого модуля от 3,5 ГПа до 1 МПа (восходящая и нисходящая ветвь кривой 1 на рис. 27). Коэффициент динамического трения не превышал 0,18.



Фиг. 27. Зависимости осевой силы P от времени при сдвиге льда: 1 – примороженного к стенам грузочной части матрицы, 2 – в грузочной и конической частях матрицы, 3 – в полной сборке матрицы (грузочная, коническая и патрубкок).

Увеличение диссипативных потерь в конфузоре (кривая 2 рис. 27) по сравнению с кривой 1 в основном обусловлено увеличением затрат энергии на формирование мелкокристаллической структуры льда. По максимуму на кривой 3 определены адгезионная прочность 2,26 МПа и коэффициент трения сцепления 0,5.

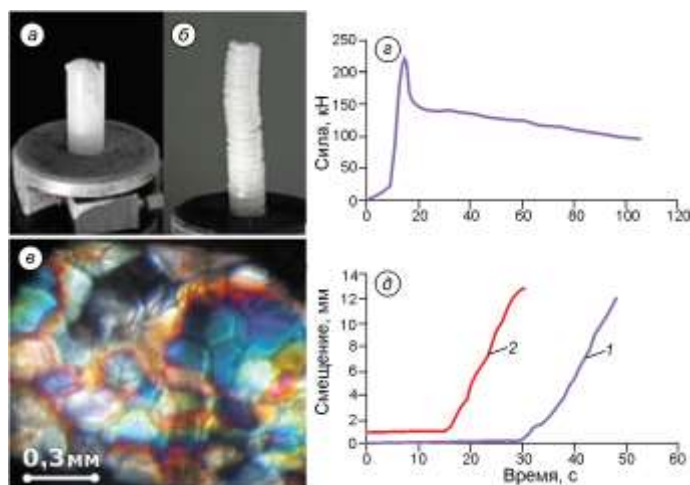


Рис. 28. Форма струи льда для разных режимов течения: *а* – гладкая и *б* – геликоидальная; *в* – субмикроструктура льда в струе; *г* – зависимость силы от времени; *д* – зависимости смещения от времени: 1 – при повторной нагрузке; 2 – при первичной нагрузке

По данным экспериментов коэффициент упрочнения равен 2,7 МПа, коэффициент трения в патрубке 0,4 при скоростях скольжения 10^{-5} - 10^{-6} м/с. Режим скольжения льда зависит от температуры и скорости истечения (рис. 28 а,б).

Цепочечная модель. Для установления связи между упругими и инерционными свойствами льда, использована модель гармонического осциллятора в виде дифференциального уравнения

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (33)$$

где x – смещение, \ddot{x} – вторая производная по времени (ускорение), ω – круговая частота. Для собственной частоты $\omega_0 = 2\pi f_0$ использовано точное решение дифференциального уравнения для осцилляторов (рис. 29), состоящих из n (двух и более) идентичных материальных точек, обладающих одинаковой массой m и соединённых упругими связями, имеющими одинаковую жёсткость k (таблица).

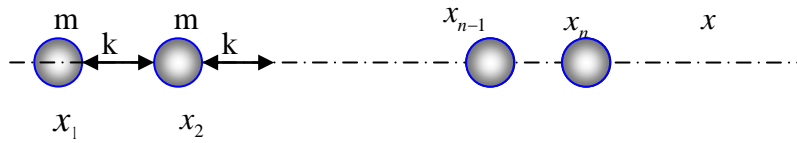


Рис. 29. Цепочечная модель

Таблица. Точные формулы для собственных частот ω_n осцилляторов, состоящих из n идентичных материальных точек, обладающих одинаковой массой m и связанных упругими связями, имеющими одинаковую жесткость k

n/ω	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
2	0	$\sqrt{\frac{2k}{m}}$			
3	0	$\sqrt{\frac{k}{m}}$	$\sqrt{\frac{2k}{m}}$		
4	0	$\sqrt{\left(2-\sqrt{2}\right)\frac{k}{m}}$	$\sqrt{\frac{2k}{m}}$	$\sqrt{\left(2+\sqrt{2}\right)\frac{k}{m}}$	
5	0	$\sqrt{\left(3-\sqrt{5}\right)\frac{k}{2m}}$	$\sqrt{\frac{k}{m}}$	$\sqrt{\left(3+\sqrt{5}\right)\frac{k}{2m}}$	$2\sqrt{\frac{k}{m}}$

Верификация модели. О разрушении элементов структуры льда свидетельствуют максимумы акустической эмиссии в диапазоне частот 5 Гц ÷ 20 кГц. Количество частиц n , участвующих в формировании акустического импульса, определено по известным значениям k и экспериментально наблюдаемым частотам спектров (рис. 30).

Так, для радиуса частиц $2 \cdot 10^{-4}$ м и плотности льда 883 кг/м^3 получаем для частоты 3,6507 кГц (рис. 31, кривая 1) и 6,950 кГц (кривая 2) значения жесткости k как функции числа подвижных частиц в осциляторе (рис. 31). Отметим, что для $n=3$ значения k резонансных частот 3,65 кГц и 6,95 кГц равны соответственно 15,55 Н/м и $k=56,36$ Н/м.

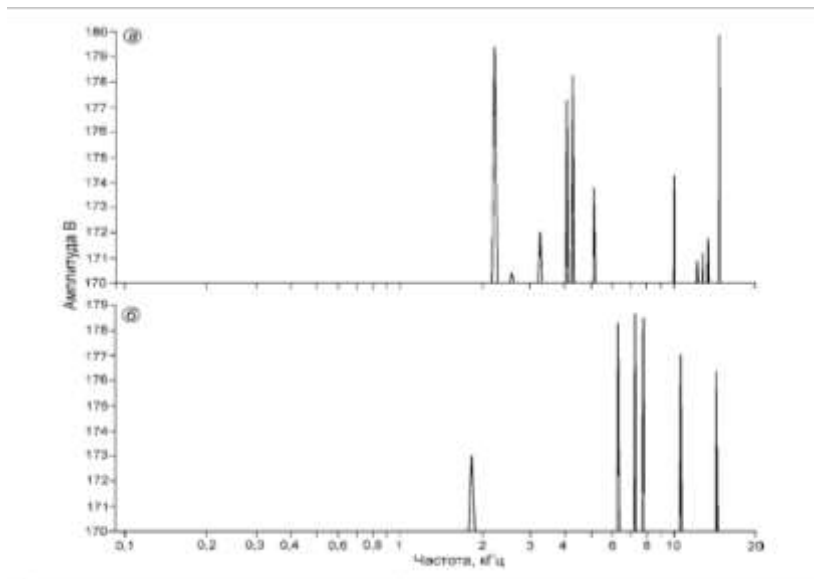


Рис. 30. Акустические спектры сигналов акустической эмиссии при выдавливании льда из конфузора для разных моментов времени (а, б) наблюдения

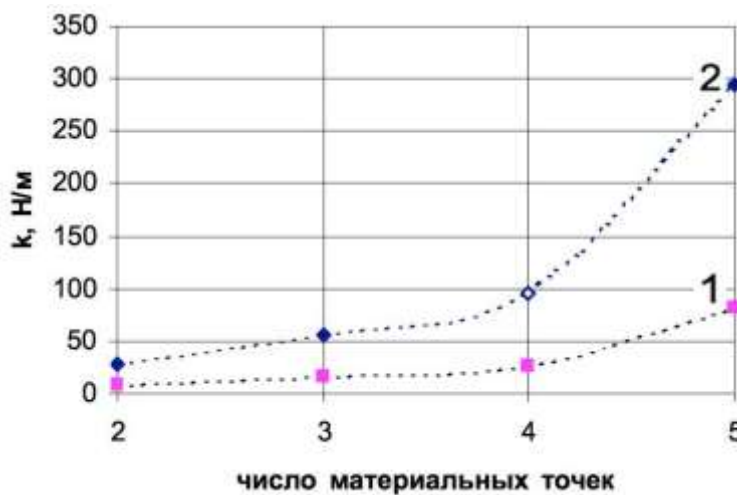


Рис. 31. Зависимость расчетной упругости в теоретической модели, которая содержит две и более материальных точек для частот 3,65 кГц (1) и 6,95 кГц (2).

Определённые таким образом силовые константы соответствуют силовым константам, характеризующим растяжение и изгиб связей О-Н-О и Н-О-Н при 273 К, которые получены методом ядерного магнитного резонанса и равны соответственно 15,5 и 56 Н/м.

Кинетика изменений структуры. С помощью цепочечной модели по определённым в эксперименте резонансным частотам и известной жесткости связей рассчитан эффективный размер источников излучения. Для расчета использована связь между радиусом R подвижных элементов структуры, их резонансной частотой f_0 , плотностью льда ρ и жесткостью связей k

$$R = \sqrt[3]{\frac{k}{16\pi^3 f^2 \rho}} \quad (34)$$

Подставляя в уравнение (34) значения соответствующих величин ρ , k , и f_0 получаем зависимости собственной частоты осцилляторов от их размера R как функцию частоты излучения сигналов акустической эмиссии (рис. 32).

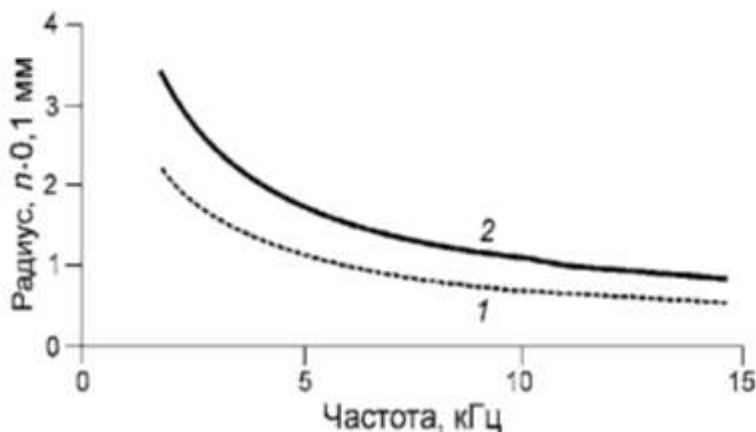


Рис. 32. Зависимость радиуса осцилляторов от частоты излучения сигналов акустической эмиссии для жесткости связи $k=15,5$ Н/м (кривая 1) и $k=56$ Н/м (кривая 2) в процессе изменения структуры льда

Достаточная определенность в оценке деформационных изменений структуры льда по его акустическим характеристикам достигается изначально известным строением кристаллической решётки льда и фактическим уменьшением размеров зёрен в процессе интенсивной пластической деформации.

Эволюция структуры льда. Тенденция к достижению «равновесного» размера зерна на зависимости $R(f)$ (рис. 32) подтверждается фактически наблюдаемым уменьшением диаметра ледяных кристаллов от 3 мм до 0,3 мм (рис. 33).

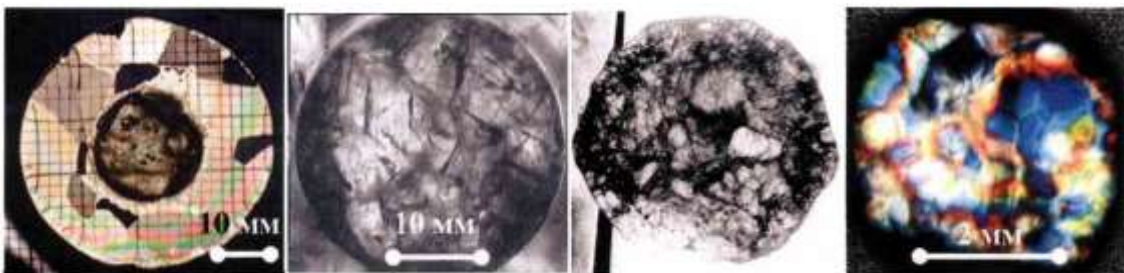


Рис. 33. Эволюция структуры льда при интенсивной пластической деформации

Влияние волн конечной амплитуды на пластичность льда.

Поступательное движение пресс-штемпеля вызывает во льду не только сдвиговые напряжения и гидростатическое сжатие, но и создаёт волну сжатия со сходящимися фронтами (как у кумулятивного заряда). Поэтому структура льда формируется не только в результате гидростатического сжатия и сдвига, но и под действием высокоскоростной пластической деформации.

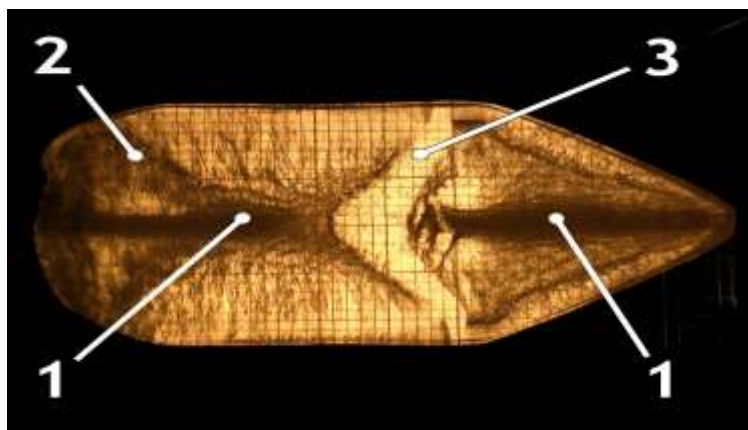


Рис. 34. Текстура льда в матрице в результате высокоскоростной пластической деформации: 1 – струя, 2 – конус, 3 – ядро сжатия; масштаб сетки – 2 мм

Высокоскоростная пластическая деформация происходит при схлопывании фронтов импульсов сжатия, создающих локальный градиент давления (кумулятивный эффект). В результате формируется ледяная струя (1) и конус сжатия (2). Кроме того, в матрице происходит наложение прямой и обратной волны. Результатом является формирование обратного конуса 3 в виде седла. Прямое наблюдение показывает, что лёд в струе 1 и конусе 2 находится в аморфном (стеклообразном состоянии). Тогда как лёд в седле 3 имеет структуру композита: округлые зерна (мелкая кристаллическая структура) разделены аморфной (стеклоподобной) средой.

По-видимому, формирование текстур под действием импульсов напряжений в механике льда имеет общий характер. Так, например, при индентировании во льду формируются медианные и кольцевые трещины, прямые и обратные конусы (рис. 35). Именно волновой характер импульсов напряжений позволяет «передавать» внешние воздействия через промежуточный слой вглубь льда.

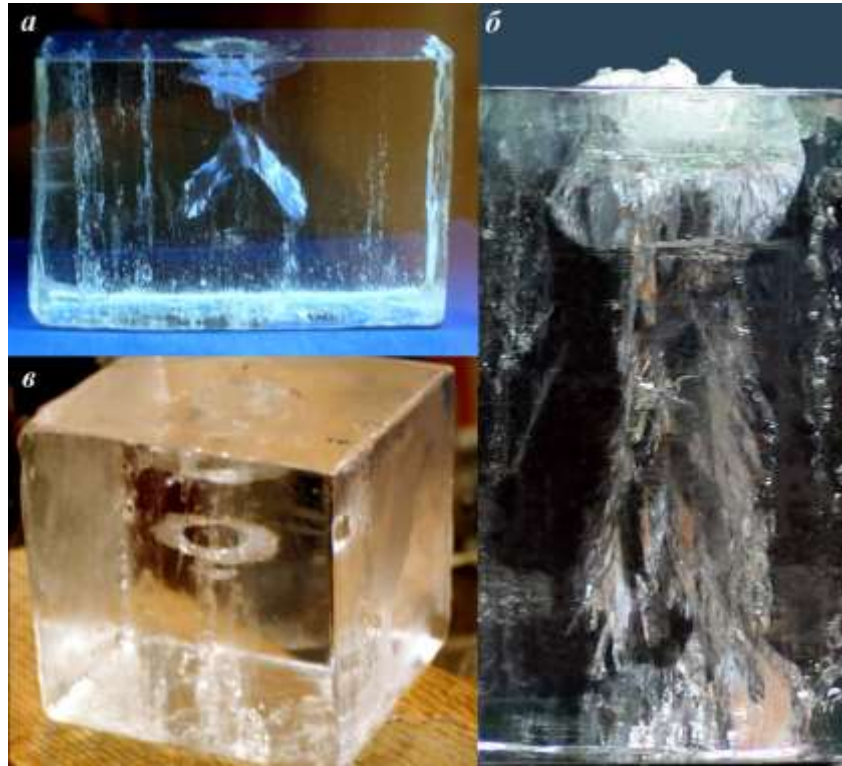


Рис. 35. Различные виды трещин для заданных условий на фрикционном контакте: а – медианная трещина, б - оперяющие трещины, в – кольцевая трещина

Особенности деформационных изменений структуры льда при прохождении волны сжатия состоят в том, что, во-первых, под действием «конечной» амплитуды создается градиент давления и только малая часть образца одновременно находится в напряжённом состоянии. Во-вторых, при интерференции отражённых волн могут возникать большие напряжения, способные произвести деформационные разрушения структуры, даже когда амплитуда волны мала для этого.

В результате полигонизации, дробления и режеляционной перекристаллизации формируется мелкокристаллическая структура льда, динамическая вязкость которой на несколько порядков меньше, чем у структуры исходного льда.

Поскольку свойства льда в промежуточном слое существенно отличаются от свойств в объёме, то усреднение реологических характеристик льда при расчётах скорости течения льда в ледниках, равно как и использование параметров реологической модели Глена могут оказаться недостаточно оправданными.

Визуализация текстуры ледяного потока. Картина распределения скоростей деформаций по сечению струи отражает явно нестационарный процесс (рис. 36) и нелинейную связь между напряжениями и скоростями деформации. Условно в струе льда можно выделить три слоя. В центре струи лед движется подобно твердому телу с максимальной скоростью. Прерывистость течения (stick-slip) тонкого приграничного слоя (отслеживалась по сигналам акустической эмиссии) указывает на прилипание льда к стенкам канала. Частота пульсаций 0,005 1/с. Вязкопластическое течение происходит в промежуточном слое. Толщина слоя, даже в случае гладкой подложки, на порядки превосходит значения, характерные для конструкционных материалов.

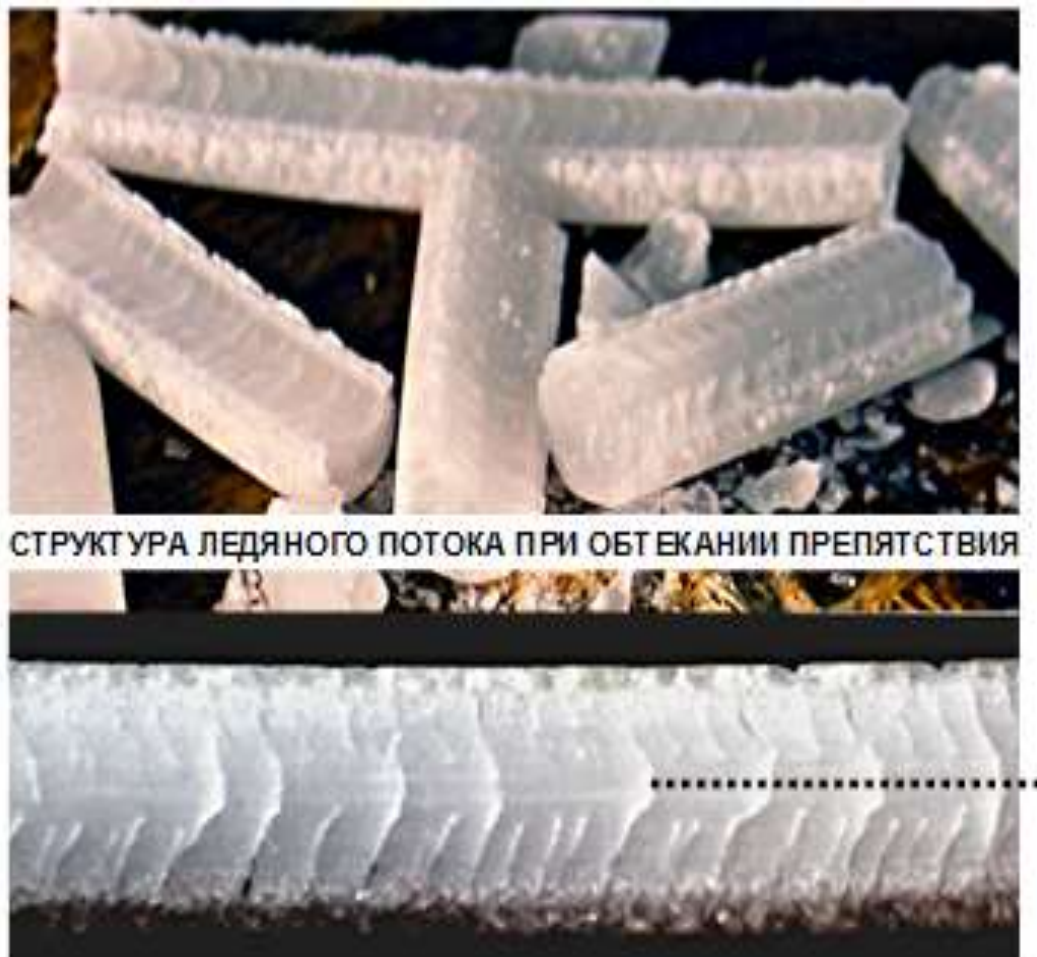


Рис. 36. Структура ледяного потока в цилиндрическом канале

Фактически воспроизведены два предельных режима движения льда на фрикционном контакте: блоковое скольжение и течение. По акустическим спектрам разрушения определены два характерных времени инкубационного периода для адгезионного и когезионного разрушения льда.

Полученные результаты имеют принципиальное значение в механике контактного разрушения льда, поскольку позволяют объяснить, например, превышение поверхностной скорости активных ледников над значениями, рассчитанными без учёта свойств льда в промежуточном слое.

Влияние препятствий. В зависимости от условий (температуры, давления и скорости) получали разные режимы обтекания льдом препятствия. На рис. 37 показаны фрагменты струи для предельных случаев: а - штифт прорезает струю льда (температура ниже -10°C) и б - лед вытекает из патрубка в виде отдельных фрагментов (температура выше -10°C).



Рис. 37. Фрагменты струи: а — штифт прорезает лёд, б — лед обтекает штифт

Смена механизмов при скорости деформации 10^{-3} с^{-1} наблюдается «в точке» (1,2 МПа и -13°C) (рис. 38). При гидростатическом сжатии (≥ 10 МПа) и сдвиговых напряжениях ~ 50 кПа механизм перемерзания (как в экспериментах Боттомли), а также абразивные и режеляционные эффекты «не успевают» реализоваться полностью и за штифтом образуется канал.

Режимы движения льда могут быть представлены уравнением

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = G \frac{d\varepsilon}{d\tau} - G \frac{\sigma}{\eta} = G \left(\frac{d\varepsilon}{d\tau} - \frac{\sigma}{\eta} \right) \quad (35)$$

где $d\varepsilon/d\tau$ – скорость деформации, η – вязкость, σ/η – скорость ползучести льда, G – модуль сдвига. Из уравнения (35) следует, что механизм деформации определяется соотношением скоростей деформации и ползучести льда. Так, если $d\varepsilon/d\tau < \sigma/\eta$, то во льду реализуется механизм ползучести. Наоборот, если $d\varepsilon/d\tau > \sigma/\eta$, то напряжения накапливаются, нарушается сплошность льда, формируются кинематические связи, приводящие к блоковому скольжению льда. Модель отражает конкуренцию между двумя процессами: интенсификацией и релаксацией локальных напряжений. Упругая деформация происходит со скоростью звука и практически не зависит от температуры. Время релаксации необратимых/вязких деформаций зависит от температуры и изменяется в широком интервале значений.

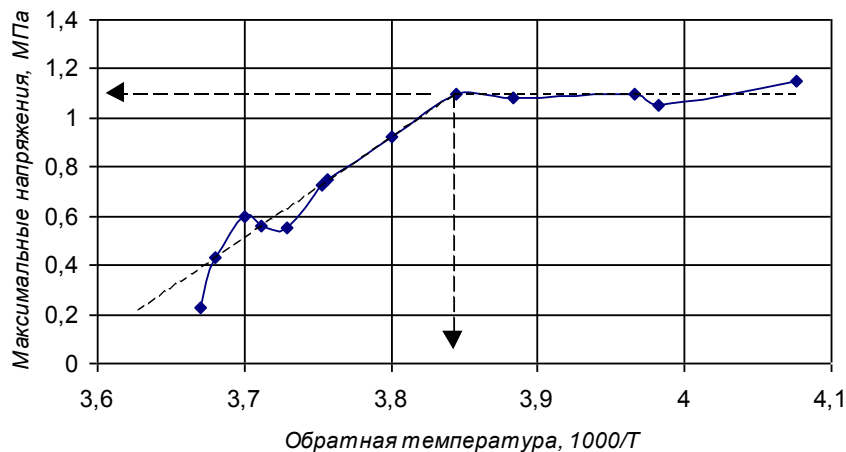


Рис. 38. Зависимость адгезионной прочности соединения льда с серпентинитом от обратной температуры

С помощью акустико-механического метода исследована кинетика накопления дефектов при контактном разрушении льда на препятствиях различной формы. Показано, что препятствия на порядок увеличивают осевую силу сдвига по сравнению с гладкой подложкой и изменяют условия граничного трения. Это увеличение объяснено зависимостью сопротивления от миделева сечения и формы препятствия, которые определяют механизм контактного

разрушения, включая переход от адгезионного к когезионному разрушению льда. К адгезионному разрушению добавляются пластические деформации, которые сопровождаются образованием трещин в контактном слое. Определены два характерных времени инкубационного периода для адгезионного (около 0,08 с) и когезионного (1-1,5 с) разрушения льда.

Спектры сигналов акустической эмиссии, генерируемые при контактном разрушении соединения льда с подложкой при пластическом сдвиге, сопоставлены со спектрами сигналов от удалённых источников в ледниках. Показано, что увеличение масштаба разрушения отражается в спектрах акустической эмиссии как сдвиг частоты в низкочастотную часть спектра и увеличение амплитуды сигнала. Установлено, что акустические эффекты, которые наблюдаются в экспериментах по взаимодействию льда с подложкой и обнаруженные в спектрах от удалённых источников в ледниках, имеют общие закономерности. Например, время инкубационного периода, повторяемость сигналов (типа stick-slip) и смещение частоты заполнения сигналов акустической эмиссии.

Таким образом, идея связи микроскопических характеристик деформируемого материала с их макроскопическими параметрами подтверждена обширным экспериментальным материалом, позволяющим обоснованно строить достаточно простые, приемлемые математические модели, в которых учитывается изменение структуры материала в процессе механических деформаций, и прогнозировать его поведение в широком интервале граничных условий. Эти экспериментальные и теоретические исследования показали важность учёта изменений структуры деформируемого материала при оценках их прочностных характеристик и построении прогностических закономерностей разрушения.

Основные выводы и результаты работы

1. Качественно и количественно описано влияние деформационных дефектов на реологические и прочностные свойства пресноводного льда в контексте современных представлений физической мезомеханики. Впервые на основе комплексных экспериментальных наблюдений получены количественные данные о деформационных изменениях структуры пресноводного льда непосредственно в процессе механических испытаний в широком диапазоне термодинамического состояния и различных видах напряженного состояния.

2. Разработан комплексный подход к исследованию деформационных изменений структуры и разрушения твёрдых тел с помощью акустических методов. Создан измерительный комплекс на основные виды механических испытаний: растяжение, сжатие, изгиб, удар и сдвиг в условиях высокого гидростатического сжатия, в рабочем интервале температур от $-0,15^{\circ}\text{C}$ до -60°C , скоростей деформации от 10^{-6}c^{-1} до 10^{-1}c^{-1} , максимальными значениями силы 500 кН и с рабочим диапазоном частот от 20 Гц до 106 МГц. Учтены специфические особенности пресноводного льда.

2. Впервые получены результаты многопланового *исследования упругости* пресноводного поликристаллического льда при линейных и нелинейных деформациях в широком интервале термодинамических параметров. Установлено, что в пресноводном льде Ih при напряжениях $5 \cdot 10^4$ Па, создаваемых ультразвуковой волной в диапазоне частот от 500 кГц до 80 МГц, в интервале температур от -40°C до $-0,15^{\circ}\text{C}$ реализуется амплитудно-независимый механизм деформаций. Рассчитаны параметры дислокационной сетки. Предложен акустико-механический способ определения физического предела упругости. Определены размеры и концентрации кинетических элементов структуры льда вблизи пределов упругости и текучести.

3. Предложены модели для количественного определения деформационных изменений структуры льда при *нелинейных деформациях в испытаниях на растяжение, сжатие, удар и экструзию*, причём параметры моделей определяются экспериментально с помощью акустико-механического метода. Исследованы механизмы роста магистральной трещины и кинетика трещинообразования. Установлено, что росту магистральной трещины предшествует формирование пластической зоны предразрушения, размеры которой на порядки превышают размеры пластической зоны вблизи кончика трещины, вычисленной по модели Хеллана-Ирвина. Установлены фазы роста магистральной трещины, установлено влияние импульсов напряжений на движение фронта трещины. Установлена количественная связь избыточного коэффициента ослабления с размером искусственно созданных и деформационных дефектов во льду. Установлено, что деформационные изменения структуры характеризуются спектром времён релаксации (10^{-3} - 10^4 с).

4. Предложен физический метод моделирования промежуточного слоя и исследованы макроскопические образцы со структурой этого слоя. Установлено, что его свойства определяют физическое подобие в семействе кривых *мгновенная сила — мгновенная скорость* при ударе. Установлено, что динамическая вязкость структуры льда в промежуточном слое (20 МПа·с при -17° С) на несколько порядков ниже, чем динамическая вязкость исходной структуры льда, а пластический коэффициент трения много выше (0,18-0,4) при прочности соединения с подложкой $2,3 \pm 0,1$ МПа. Эволюция структуры и формирование текстуры пресноводного льда обусловлены накоплением деформационных повреждений. Установлен эффект усиления пластичности льда при наложении фронтов упругих волн. Установлен одинаковый триггерный механизм зарождения трещины при отрыве от плоской подложки и при сдвиге в условиях стеснения. Установлено распределение скоростей в цилиндрическом канале и исследовано влияние структуры льда на режим скольжения. Установлена количественная связь между

микроскопическими и макроскопическими характеристиками льда, позволяющая использовать акустико-механический метод для дистанционного определения кинетики накопления деформационных повреждений в пресноводном льде.

Результаты опубликованы в следующих работах:

1. **Епифанов В.П.** Влияние промежуточного слоя на прочность соединения льда с подложкой // Доклады РАН. Техническая физика. 2017. Т. 472. № 1. С. 27-32.
2. **Епифанов В.П.** Физическое моделирование режимов движения ледников // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С 333-344.
3. **Епифанов В.П.** Моделирование процессов рекристаллизации в придонных слоях ледников // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 3. С. 20-31.
4. **Епифанов В.П.** Применение акустических методов в исследованиях снежного покрова // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 3. С. 101–113.
5. **Епифанов В.П.** Движение льда в Антарктическом ледниковом покрове // Материалы гляциологических исследований. 2008. Вып. 105. С. 166 - 172.
6. **Епифанов В.П.** Физические механизмы контактного разрушения льда // Доклады РАН. Техническая физика. 2007. Т. 412. № 1. С. 39-43.
7. **Епифанов В.П.** Реологические особенности антарктического льда // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 103. С. 96-106.
8. **Епифанов В.П.** Механика и прочность пресного льда // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 56-64.
9. **Епифанов В.П.** Разрыв и динамическая твердость льда // Доклады РАН. 2004. Т. 394. № 6. С. 763-766.
10. **Епифанов В.П.** Упругость поликристаллического льда // Материалы гляциологических исследований. 2004. Вып. 93. С.101-111.

11. **Епифанов В.П.** Мезомеханика упругого деформирования льда // Материалы гляциологических исследований. 2003. Вып. 95. С. 9-21.
12. **Епифанов В.П.** Определение удельной энергии разрушения льда в условиях естественного залегания // Материалы гляциологических исследований. 1997. Вып. 83. С.177-184.
13. **Епифанов В.П.** Микромеханика деформирования и разрушения льда // Известия АН. Механика твёрдого тела. 1996. № 4. С. 111-128.
14. **Епифанов В.П.** Механика деформируемого льда // Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Гляциология. 1991. Том 8. 200 с.
15. **Епифанов В.П.** Применение принципа температурно-временной аналогии к проблемам разрушения льда и снега // Лёд и Снег. 1990. № 8. С. 9-12.
16. **Епифанов В.П.** Воздействие движущейся снежной массы на сооружение // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1990. № 3. С. 176-182.
17. **Епифанов В.П.** Определяющее реологическое соотношение для льда // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1989. № 3. С. 118-125.
18. **Епифанов В.П.** Трещинообразование во льду при сжатии // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1988. № 4. С. 181-188.
19. **Епифанов В.П.** Разрушение льда при контактных взаимодействиях // Известия. АН СССР. Механика твёрдого тела. 1986. № 6. С. 177-185.
20. **Епифанов В.П.** Разрушение льда при ударных взаимодействиях // Доклады АН СССР. 1985. Т. 284. N 3. С. 599 - 603.
21. **Епифанов В.П.** Некоторые результаты экспериментальных исследований механических свойств ледяного покрова // Известия АН СССР, Механика твёрдого тела. 1985. № 2. С. 182-191.
22. **Епифанов В.П.** Механика разрушения льда в зависимости от температуры и скорости нагружения // Известия. РАН. Механика твёрдого тела. 1984. №2. С. 188-196.
23. **Епифанов В.П.** Механика разрушения льда в зависимости от температуры и скорости нагружения // Известия РАН Механика твёрдого тела. 1984. № 2. С.188-196.

24. **Епифанов В.П.** Разрушение поликристаллического льда // Доклады. АН СССР. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364 -1367.
25. **Епифанов В.П.** К вопросу о механических свойствах льда // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1982. № 1. С. 187-192.
26. **Ерифанов V.P.** Snow fracture micromechanics // Extended Abstracts (International Symposium on Snow & Related Manifestations): SASE Manali (HP), INDIA. 1994. P. 102-105.
27. **Епифанов В.П., Юрьев Р.В.** Вязкость разрушения пресного льда // Доклады. РАН. 2006. Т. 406. N 2. С. 187-191.
28. **Воронина И.Ю., Епифанов В.П.** Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии // Акустический журнал. 1980. Т. 26. С. 371-376.
29. **Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П.** Адгезионная прочность гололёдных отложений на элементах металлических конструкций // Вестник нижегородского государственного университета // Серия: Математика, механика, информатика. 2012. Т.12. Вып. 4. С. 21- 40.
30. **Епифанов В.П.** Влияние импульсов напряжений на структуру льда в промежуточном слое // Доклады. РАН. 2018. Т. 479. № 6. С.

ЕПИФАНОВ ВИКТОР ПАВЛОВИЧ

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И
РАЗРУШЕНИЯ ПРЕСНОВОДНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ЛЬДА

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Подписано к печати 15 февраля 2018 г. Заказ № 2-2018. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института проблем механики

им. А.Ю. Ишлинского РАН

119526, Москва, просп. Вернадского, д. 101, к. 1