

**Особенности контактного разрушения льда**

© 2020 г. В.П. Епифанов

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
evp@ipmnet.ru**Contact fracture behavior of ice**

V.P. Epifanov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
evp@ipmnet.ru

Received March 28, 2019 / Revised July 19, 2019 / Accepted December 13, 2019

**Keywords:** *acoustic-mechanical method, cumulative effect, intermediate layer, plasticity, structure.***Summary**

Деформация и образование промежуточного слоя при гидростатическом сжатии льда под действием сходящихся и расходящихся фронтов импульсов напряжений рассматривается. Рассмотрены особенности контактного разрушения льда при действии сходящихся и расходящихся фронтов импульсов напряжений. В качестве примера рассмотрено медленное воздействие шарового индентора на ледовую пластину, имитирующую полупространство. Записаны осциллограммы сигнала пьезоэлектрического акселерометра, регистрирующего деформацию льда. Получены зависимости скорости распространения фронта от времени воздействия (парабола). Установлено, что при указанных условиях эксперимента (гладкая поверхность индентора и ледовая полупространство) образуется тонкий промежуточный слой, свойства которого определяют физическую подобие семейства кривых «мгновенная сила – мгновенная скорость». Предложено реологическое описание изменения микроструктуры льда при ударе. Количественно определены деформационные изменения структуры льда при интенсивной пластической деформации в матрице с профилем, подобным соплу Лавала. Деформации, вызванные вынужденными колебаниями в льду. Рабочая поверхность поршня имеет форму эллипсоида вместе с гладкими стенками матрицы и обратный конус создает условия для параметрического резонанса и образования фронтов высокочастотных импульсов напряжений. Под влиянием этих импульсов в льду образуются зоны с суперпластической мелкокристаллической структурой (кумулятивный эффект). В выходном цилиндрическом канале, обтекание льдом препятствия, распределение скоростей в цилиндрическом канале, формирование промежуточного слоя вблизи поверхности шарового индентора при медленном ударе. Количественно определены деформационные изменения структуры льда непосредственно в процессе контактного разрушения.

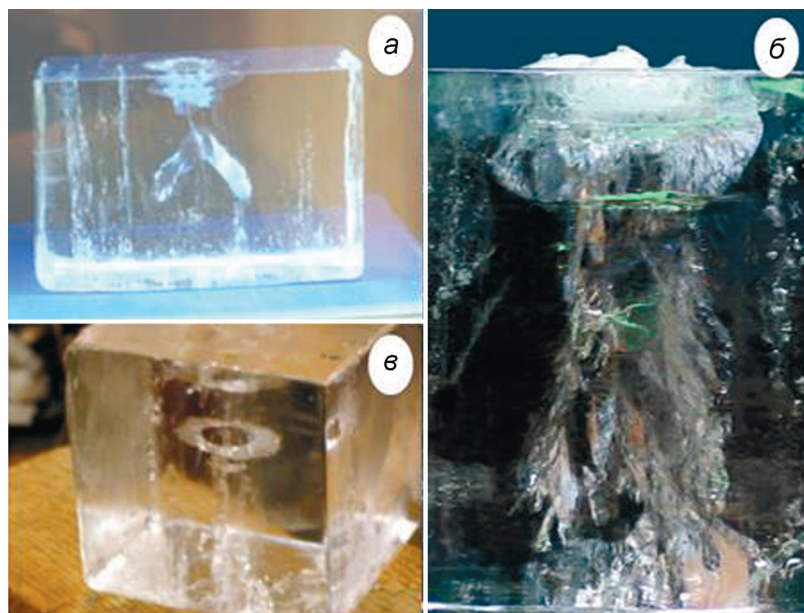
**Citation:** Epifanov V.P. Contact fracture behavior of ice. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020. 60 (2): 274–284. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420020040.*Поступила 28 марта 2019 г. / После доработки 19 июля 2019 г. / Принята к печати 13 декабря 2019 г.***Ключевые слова:** *акустико-механический метод, кумулятивный эффект, пластичность, промежуточный слой, структура.*

Проанализированы закономерности эволюции структуры пресноводного льда в условиях гидростатического сжатия при сдвиге под действием сходящихся и расходящихся фронтов импульсов напряжений. Исследовано обтекание льдом препятствия, распределение скоростей в цилиндрическом канале, формирование промежуточного слоя вблизи поверхности шарового индентора при медленном ударе. Количественно определены деформационные изменения структуры льда непосредственно в процессе контактного разрушения.

**Введение**

Лёд как материал имеет ряд специфических свойств, обусловленных строением его кристаллической решётки и высокой гомологической температурой [1]. Это отличает его реологические и прочностные характеристики от других конструкционных материалов. Так, если толщина промежуточного слоя для конструкционных материалов не превышает  $1000 \text{ \AA}$ , то при контактом взаимодействии льда, например с гладкой

поверхностью стального шара, толщина промежуточного слоя достигает нескольких миллиметров [2]. Эта особенность обусловлена механизмом передачи контактных напряжений в глубь льда и низким модулем упругости (в 20 раз меньше, чем у стали) льда. Изучение структуры льда в кернах из скважин глубокого бурения показали, что в придонном льде есть промежуточный слой, деформации которого, по аналогии с конструкционными материалами, могут почти полностью (85–98%) определять поверхностную ско-



**Рис. 1.** Внутренние трещины при индентировании льда плоским круговым штампом:

*а* – формирование медианной (крылатой) трещины; *б* – семейство внутренних трещин, обрамляющих ледяной столб; *в* – внутренняя кольцевая трещина

**Fig. 1.** Internal cracks during ice indentation with a flat circular stamp:

*a* – formation of a median (winged crack); *b* – a family of internal cracks framing, an ice pillar; *c* – internal annular crack

рость ледника [3]. Это даёт основания полагать, что лёд в промежуточном слое имеет существенно иные свойства и структуру, чем в вышележащих слоях [4]. Актуальность дальнейшего изучения свойств льда в промежуточном слое связана с решением прикладных задач (взаимодействие льда с ледостойкими сооружениями) и с прогнозом предельных режимов движения ледников.

Во льду реализуются три механизма деформаций: смещение дислокаций по плоскостям скольжения кристаллической решётки; зернограничное скольжение; механизм перекристаллизации. При этом физическими носителями необратимых деформаций служат дислокации. Исследована главным образом стадия упругого деформирования льда, менее изучены его нелинейные свойства, включая трещинообразование и сверхпластичность – свойство многократно деформироваться за короткие ( $\tau \rightarrow 0$ ) интервалы времени без нарушений сплошности под действием относительно небольших сдвиговых напряжений в условиях гидростатического сжатия.

Механические и прочностные свойства пресноводного льда связывают с его строением [5]. Структуру льда обычно оценивают методом поляризационной микроскопии. Описание включает в себя размер и форму кристаллов, их ориентацию, форму межкристаллитной поверхности, реже – другие характеристики структуры и текстуры льда. Применение метода акустической эмиссии позволило качественно охарактеризовать кинетику

накопления повреждений при кратковременной ползучести льда [6]. Однако исследования реологических свойств льда долгое время оставались нацеленными на отыскание лучшего эмпирического соотношения [7] и физического смысла входящих в него коэффициентов [8, 9]. Впервые количественный контроль деформационных изменений микроструктуры зёрен льда был осуществлён с помощью метода нейтронной дифракции для тонких плёнок льда [10]. Возможность непрерывного количественного мониторинга деформационных изменений в объёмных образцах для разных уровней иерархической структуры льда с помощью акустико-механического метода рассмотрена в работах [11, 12]. Акустико-механический метод позволяет количественно исследовать деформационные изменения структуры льда непосредственно в процессе механических испытаний [13]. Применение этого метода в сочетании с методом интенсивной пластической деформации [14] даёт возможность получать и исследовать объёмные образцы льда с мелкокристаллической структурой, имеющей повышенную текучесть (как в промежуточном слое).

Однако ряд вопросов, связанных с передачей напряжений в глубь льда, например при индентировании, включая формирование столба сжатия с «обрамляющими» трещинами и образование «крылатых» трещин (рис. 1), остаются недостаточно исследованными. Ответы на эти фундаментальные вопросы, связанные с нелинейными свойствами льда, могут быть получены при поста-

новке новых экспериментов. Настоящая работа – продолжение исследований, предусматривающих комплексное изучение деформационных изменений структуры льда при контактном разрушении.

### Постановка задачи исследований

Ключевые вопросы механики контактного деформирования и разрушения льда – это формирование промежуточного слоя, определение структуры, прочностных и реологических характеристик льда в этом слое, а также математическое и физическое моделирование процессов на фрикционном контакте. Основой для выполнения исследований, которые позволят ответить на подобные вопросы, послужили известные результаты, полученные в работе [15] при изучении процессов деформирования тел со сложной реологией, в модельных экспериментах по определению ледового сопротивления судна [16], а также по физике сверхпластичных материалов [14]. Анализ опубликованных данных по исследованиям движения ледников и контактному разрушению льда [17] даёт возможность сформулировать базовую концепцию дальнейших исследований в виде решения задачи о влиянии микроструктуры промежуточного слоя льда на режимы движения льда по подложке.

Цель настоящей работы – изучить влияние импульсов напряжений на формирование промежуточного слоя в пресноводном льде при ударе и сдвиге в условиях гидростатического сжатия. Принципиально новое в данной работе – количественное определение деформационных изменений структуры льда под действием сходящихся и расходящихся фронтов импульсов напряжений: 1) вблизи поверхности шарового индентора непосредственно в процессе медленного пластического удара; 2) усиление пластичности льда в матрице высокого давления с конфузоров (аналог сопла Лаваля), включая визуализацию обтекания льдом препятствий, распределение скоростей движения льда в круглом канале и кумулятивный эффект. Количественные исследования реологических характеристик вторичной структуры пресноводного льда, формирующейся при интенсивной пластической деформации (при ударе и сдвиге в условиях гидростатического сжатия), выполняют с помощью акустико-механического метода. Используется теоретическая модель,

устанавливающая связь между структурой льда и его макроскопическими характеристиками [18].

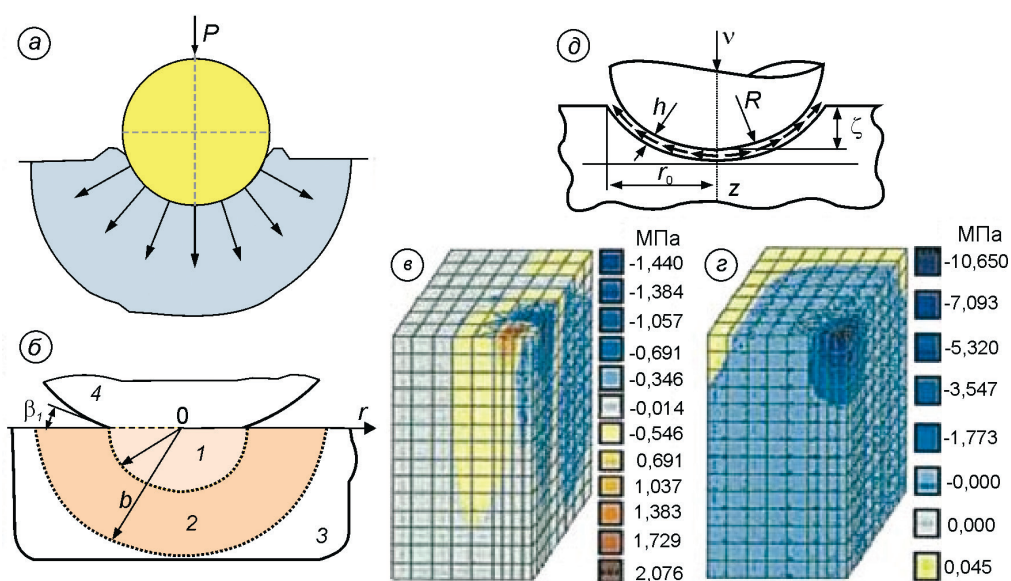
### Предмет исследования, методики и аппаратура

Для исследований выбран пресноводный лёд со структурой А4 и А9 [19] (классификация Н.В. Черепанова). Прозрачные образцы льда получены замораживанием дистиллированной воды. Исходная структура льда определялась по шлифам с помощью микроскопа. Количественное исследование деформационных изменений микроструктуры льда непосредственно в процессе механических воздействий выполняли с помощью акустических методов: акустической эмиссии и импульсно-фазового. Полученные результаты о том, как микроструктура влияет на тот или иной акустический параметр, дают основания связать микроструктуру льда и акустические методы с макромеханикой льда. Акустические параметры отражают изменения структуры льда в интегральном виде, поэтому их связь с микроструктурой можно представить в виде простых уравнений без потери достоверности. Описание методик измерений и аппаратуры даны в работах [18, 20–22].

### Результаты исследований

*Действие расходящихся фронтов импульсов напряжений* на формирование промежуточного слоя исследовали при медленном ( $< 2,5$  м/с) ударе шарового индентора по ледяной плите (рис. 2). В этой серии экспериментов гладкий шар, находящийся в свободном падении, ударяет о массивную ледяную плиту. Удар – нормальный, стальной шар твёрдостью HRC 60–62, ледяная плита большой массы покоится на жёстком массивном основании. Энергия удара – от 0,21 до 4,38 Дж. Масса шара – 1,76 кг. Условия проведения эксперимента (способ крепления плиты к фундаменту и её толщина) позволяют рассматривать ледяную плиту как полупространство. Шар жёстко скреплён с пьезоэлектрическим акселерометром, сигнал с которого подаётся на вход измерительной акустической линии [22].

Давления  $p$ , создаваемые расходящимися от поверхности шара импульсами напряжений, пропорциональны средней энергии  $W$  единицы объёма



**Рис. 2.** Эффекты расходящегося фронта ударной волны в ледяной пластине:

*a* – расходящийся фронт ударной волны,  $P$  – сила; *б* – модель упругопластического удара: 1 – гидростатическое ядро, 2 – пластическая зона, 3 – пластина, 4 – индентор; *в* – изополя касательных напряжений; *г* – изополя нормальных напряжений; *д* – схема пластического удара.  $R$  – радиус индентора;  $\zeta$  – глубина осадки;  $h$  – толщина промежуточного слоя;  $r_0$  – радиус лунки;  $z$  – ось удара;  $v$  – скорость индентора

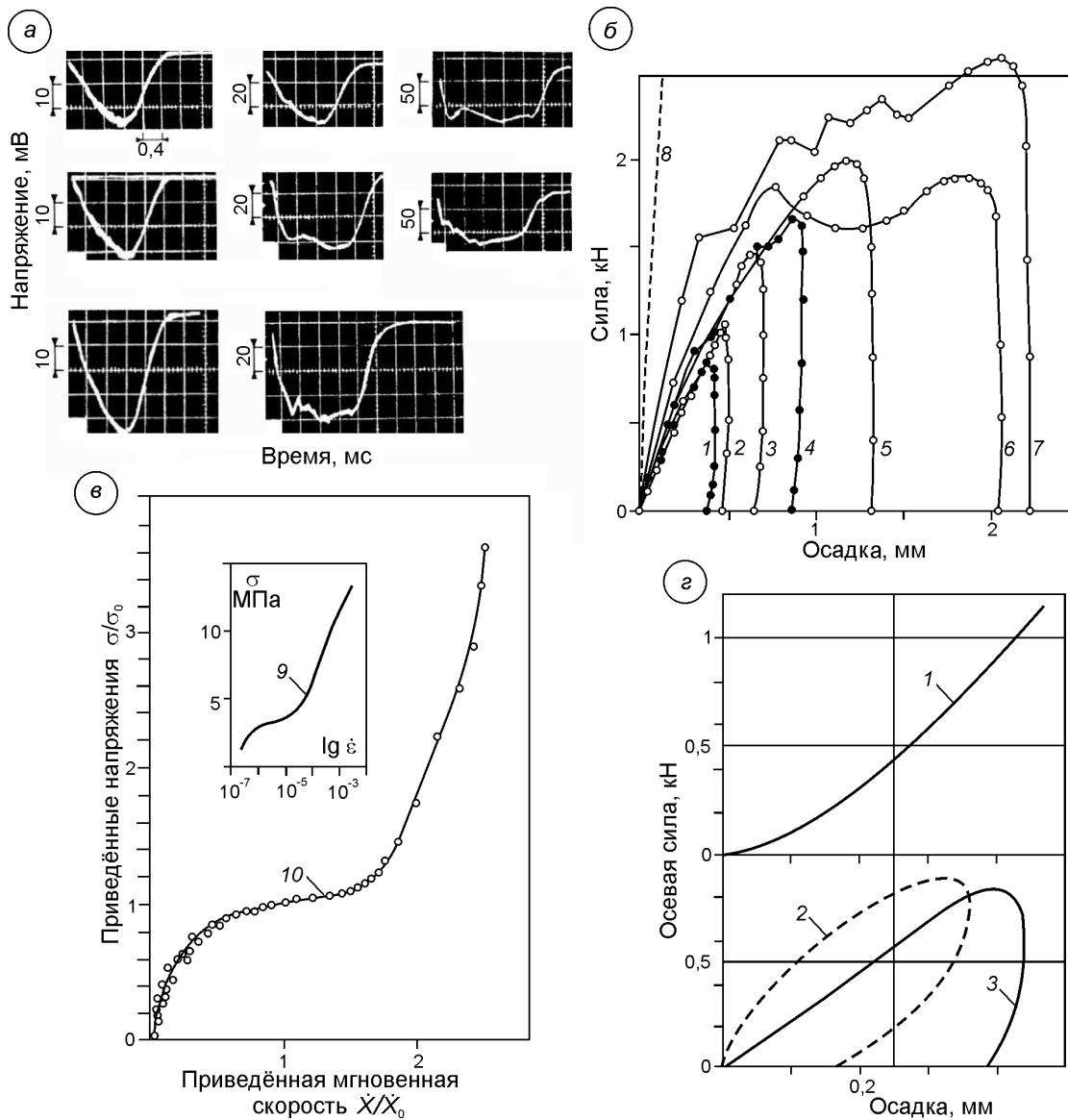
**Fig. 2.** Effects of a diverging shock wave front in an ice plate (half space):

*a* – diverging front of a shock wave,  $P$  – force; *б* – model of elastoplastic impact: 1 – hydrostatic core; 2 – plastic zone; 3 – plate; 4 – indenter; *в* – isopole shear stresses; *г* – isopole of normal stress; *д* – plastic impact scheme.  $R$  – the indenter radius;  $\zeta$  – the precipitation depth;  $h$  – the thickness of the intermediate layer;  $r_0$  – the well radius;  $z$  – the axis of impact;  $v$  – the indenter velocity

и снижаются пропорционально кубу расстояния ( $p \sim W/R^3$ ), поэтому при соударении шарового индентора с ледяной плитой (см. рис. 2, *a*) пластическая деформация локализована в тонком слое между поверхностью шарового индентора и упругодеформированной остальной массой льда. Энергия удара расходуется на образование промежуточного слоя (матовое пятно) вблизи контакта шарового индентора со льдом, его измельчение и выдавливание измельчённой ледяной массы (брекчии трения) (см. рис. 2, *д*) [17]. В рамках существующих моделей [23] традиционно выделяют области гидростатического ядра 1 и пластической зоны 2 (см. рис. 2, *б*), при этом влияние импульсов напряжений на формирование изополей касательных и нормальных напряжений (см. рис. 2, *в*, *г*) отдельно не рассматривается. Отметим, что модели не содержат никаких предположений о свойствах льда и выражают общие законы сохранения энергии.

В следующих экспериментах рассматривается процесс формирования промежуточного слоя в условиях ударного взаимодействия шарового индентора с ледяной пластиной. Начальная скорость соударения задаётся высотой поднятия шара над

поверхностью ледяной пластины. Результаты измерений представлены на рис. 3, *a*. Осциллограммы удара (см. рис. 3, *a*) характеризуют реакцию сопротивления льда внедрению шарового индентора в систему координат напряжение–время. Максимальная продолжительность удара – около 2,4 мс. После соответствующей обработки получены количественные зависимости (см. рис. 3, *б*) мгновенной силы, кН, от глубины осадки, мм, для различных начальных скоростей соударения (для разных энергий). Кривая  $\delta$  (см. рис. 3, *б*) и кривая  $I$  (см. рис. 3, *г*) рассчитаны по Герцу и имеют форму параболы, но в выбранной системе координат и условиях эксперимента кривая  $\delta$  соответствует только начальному её участку. Смещение кривых 1–7 относительно теоретической кривой  $\delta$  (см. рис. 3, *б*) указывает на пластические деформации, которые модель Герца не учитывает. Семейство экспериментальных кривых в виде зависимости среднего давления от мгновенной скорости для тех же скоростей удара (см. рис. 3, *в*) имеет S-образную форму с характерной «ступенькой», обусловленной формированием промежуточного слоя. Этот экспериментальный факт позволил построить обобщённую зависимость на-



**Рис. 3.** Результаты измерений:

*a* – 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 0,48 (1), 0,59 (2), 0,83 (3), 0,99 (4), 1,4 (5), 1,87 (6) и 2,23 (7) м/с; (*δ*) – теоретическая кривая, рассчитанная по Герцу; *в* – зависимость максимальных напряжений от скорости деформаций при одноосном сжатии (9); обобщённая зависимость напряжения от скорости удара (10); *г* – зависимости мгновенного усилия от осадки (пояснения см. в тексте)

**Fig. 3.** Measurement results:

*a* – oscillograms of shock interaction of a spherical indenter with an ice plate, depending on the impact energy; *б* – dependences of the instantaneous force (lines 1–7) on the depth of precipitation at initial impact velocities of 0.48 (1), 0.59 (2), 0.83 (3), 0.99 (4), 1.4 (5), 1.87 (6) and 2.23 (7) m/s; (*δ*) – theoretical curve calculated by Hertz; *в* – dependence of maximum stresses on the strain rate under uniaxial compression (9); generalized dependence of stress on the impact speed (10); *г* – dependences of instantaneous effort on precipitation (explained see in the text)

пряжения от скорости удара (кривая 3 на рис. 3, г). За точку «приведения» выбрана точка перегиба кривых (середина площадки «текучести»).

**Упругопластический удар** исследован недостаточно как в теоретическом, так и в эксперимен-

тальном аспектах [24]. Решение задачи Герца о вдавливании жёсткого индентора в упругое полупространство до сих пор остаётся эталоном для оценки напряжений при ударе [25–27]. На рис. 3, г приведены зависимости мгновенного

усилия от осадки. Кривая 1 рассчитана по Герцу, кривая 2 – по Тимошенко, кривая 3 построена по данным эксперимента. Из рис. 3 следует, что при ударе в зоне контакта формируется промежуточный слой льда, структура которого отличается повышенной текучестью. Формирование этого слоя и его свойства определяют физическое подобие в семействе кривых *мгновенная сила – мгновенная скорость*. Несмотря на существенные отличия экспериментальной кривой 3 от теоретической кривой 1, на начальном участке кривая 1 показывает лучшее соответствие эксперименту, чем кривая 2 (отрицательный радиус кривизны). Сопоставление кривых 2 и 3 показывает необходимость учёта сложных процессов деформационных изменений структуры льда при ударе. Экспериментальная кривая 3 показывает, что при описании деформационной кривой для каждого однотипного участка должны подбираться свои параметры, отражающие механизмы деформирования и разрушения исходной структуры льда.

Достоверность выполненных измерений подтверждается совпадением диаметра лунки и максимальной осадки с их расчётными значениями при разных скоростях удара, а также совпадением времени регистрации сигналов акустической эмиссии с появлением пульсаций на осциллограммах и визуальными наблюдениями трещин. Косвенное подтверждение получено и по другим фактам, например, увеличение угла наклона начальных участков деформационных кривых с ростом начальной скорости соударения индентора с ледяной пластиной. Отметим, что точка перегиба на деформационных кривых позволяет условно разделить удар на активную и пассивную фазы, что по физическому смыслу соответствует формированию динамически устойчивой толщины переходного слоя. В области контакта с шаром лёд находится в условиях неравномерного всестороннего сжатия (вблизи полюса шара – при равномерном всестороннем сжатии). Именно в таких условиях высокого гидростатического сжатия при малых сдвиговых напряжениях формируется структура промежуточного слоя. Лёд в этих условиях характеризуется повышенной текучестью. Аналогично за точку подобия в семействе кривых *напряжение – мгновенная скорость* выбрана точка перегиба (или центр наклонного участка) с координатами  $\sigma_0$  и  $\dot{x}_0$ .

На обобщённой зависимости (см. рис. 3, в) выделены участки, в пределах которых наблю-

дается однотипный процесс. Так, на пассивном участке удара ( $\dot{X}/\dot{X}_0 < 1$ ) для аппроксимации применяли уравнение

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

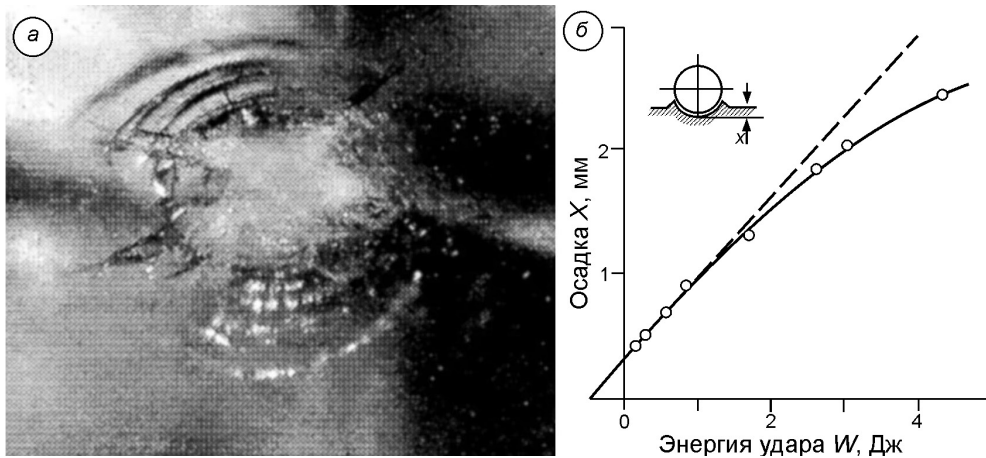
$$f \left( \frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} \right) = \frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - \ln \frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - 1, m_e = 1,25.$$

На активном этапе соударения ( $\dot{X}/\dot{X}_0 > 1$ ) для аппроксимации применяли уравнение

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

$$n_e = \begin{cases} 2, & \text{при } \dot{X}/\dot{X}_0 \in [1,2] \\ 0,85, & \text{при } \dot{X}/\dot{X}_0 > 2. \end{cases}$$

Полученные уравнения – следствие общих законов механики и электродинамики (использован прямой пьезоэлектрический эффект) и могут быть представлены в форме записи, характерной для модели Глена, но с коэффициентами, изначально имеющими определённый физический смысл. Поскольку площадь фигуры, ограниченная кривой  $P(X)$  и осью абсцисс (см. рис. 3, б), численно равна работе, затраченной на деформирование и разрушение льда, определение затрат энергии сводится к выделению на кривой участков, в пределах которых реализуется упругий или пластический механизм деформирования и расчёта энергозатрат на эти процессы. Из рис. 3, б следует, что удельная энергия разрушения льда, определённая как отношение затраченной энергии удара к массе льда в объёме образовавшейся при ударе лунки, равна  $6,7 \pm 0,6$  кДж/кг и «попадает» в интервал 3–12 кДж, указанный в работах [24, 28, 29]. Например, для энергии удара в интервале 0,5–4,4 Дж при температуре  $-9^\circ\text{C}$  затраты на упругое деформирование уменьшаются с 45 до 19%, а на пластическое деформирование – возрастают от 55 до 81%. Отметим, что для условий эксперимента затраты на пластическое деформирование достигают своего максимума (80–84%) уже при энергии удара



**Рис. 4.** Качественные и количественные изменения структуры льда при пластическом ударе в расходящемся фронте ударного импульса:

*a* – внутренняя коническая трещина и матовое пятно (промежуточный слой); *b* – зависимость осадки шарового индентора от энергии удара

**Fig. 4.** Qualitative and quantitative changes in the structure of ice during plastic impact in a diverging front of a shock pulse: *a* – an internal conical crack and a dull spot (intermediate layer); *b* – the dependence of the deposition of the spherical indenter on the impact energy

1,7 Дж, причём потери энергии на тепловыделение составляют 0,1% от удельной энергии разрушения.

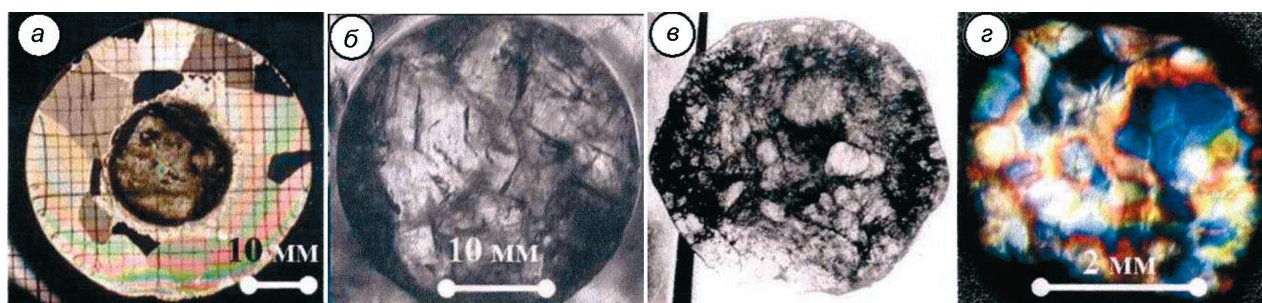
Образование трещин в расходящихся фронтах ударного импульса исследовали в пластинах трансверсально-изотропного прозрачного льда со структурой А4 при температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис. 4 показан фотоснимок (вид сверху) контакта шарового индентора (диаметр 7,6 см) с ледяной пластиной для энергии взаимодействия 0,52 Дж и ориентации оси удара ортогонально базисным плоскостям трансверсально-изотропного льда. Внутренняя трещина имеет вид усечённого конуса высотой 6,2 мм с углом при вершине  $25^{\circ}$ , а ядро смятия («поверхностная трещина») – форму цилиндра диаметром 8 мм и высотой 2,8 мм. Момент локального нарушения сплошности льда на зависимости осадки от энергии удара (см. рис. 2 и 4) проявляется как точка отклонения от прямолинейной зависимости. В условиях эксперимента это отклонение наблюдается при напряжениях около 2 МПа, что превышает пороговое напряжение образования трещин при квазистатическом сжатии.

На основании полученных в настоящем исследовании результатов разработано измерительное устройство «пенетрометр» [2], с помощью которого измеряется твёрдость (значение среднего контактного напряжения при медленном ударе шарового индентора). Внутри индентора (радиус 40 мм) размещён пьезоакселерометр, сигнал с

которого поступает на процессор измерительного блока, вмонтированного в корпус пенетрометра. Точность измерения среднего контактного давления – 5%, воспроизводимость результатов измерений на однородном материале – 1%. Измеряемые величины отображаются на индикаторе, вмонтированном в корпус пенетрометра.

**Эволюция структуры льда.** Использован метод интенсивной пластической деформации [14]. В разборной матрице с профилем, аналогичным соплу Лавалля, создавались условия гидростатического сжатия со сдвигом [13]. Разборная матрица состояла из трёх секций: загрузочной секции длиной  $L_1$  и диаметром  $D = 57$  мм; конфузора и патрубка с диаметром канала  $d = 10$  мм. Такая конструкция позволяет исследовать влияние сходящихся фронтов волн конечной амплитуды на структуру льда и получать объёмные образцы льда со структурой промежуточного слоя. На рис. 5 показана эволюция структуры пресноводного льда на различных стадиях нагружения. Средний диаметр ледяных кристаллов уменьшается с 10 до 0,3 мм.

Непрерывный контроль деформационных изменений структуры льда выполнялся методом акустической эмиссии. Для установления связи между упругими и инерционными свойствами льда использованы модель гармонического осциллятора и цепочечная модель [21]. Совместное решение уравнений позволило рассчитать по определённым



**Рис. 5.** Эволюция структуры льда при интенсивной пластической деформации:

*a* – исходная структура льда; *b* – вторая стадия; *v* – третья стадия; *z* – стадия интенсивной пластической деформации

**Fig. 5.** Evolution of the ice structure during severe plastic deformation:

*a* – is the initial structure of ice; *b* – is the second stage; *v* – is the third stage; *z* – is the stage of intense plastic deformation

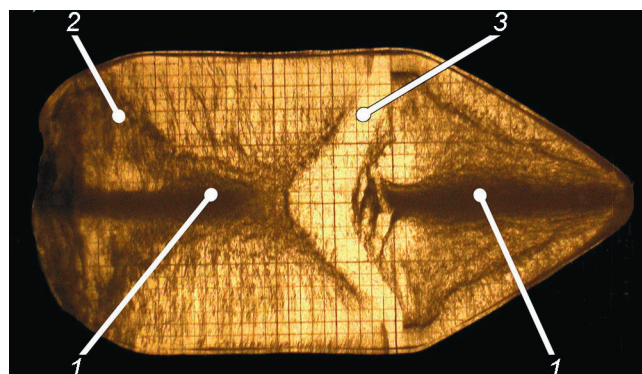
в эксперименте резонансным частотам и известной жёсткости связей кристаллической решётки льда эффективный размер источников упругого излучения. Получена зависимость радиуса осцилляторов от частоты излучения акустической эмиссии в процессе изменения структуры льда, которая подтверждена фактически наблюдаемым уменьшением диаметра ледяных кристаллов [18].

**Влияние сходящихся волн конечной амплитуды на пластичность льда.** Детальные исследования микрошлифов льда в поляризованном свете показали, что структура льда формируется не только в результате гидростатического сжатия и сдвига, но и под действием высокоскоростной пластической деформации. На рис. 6 показана текстура льда, образованная импульсом сжатия со сходящимися фронтами (как у кумулятивного заряда). 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. В результате формируется обратный конус *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 зёрна (мелкая кристаллическая структура) разделены аморфной (стеклоподобной) средой.

Отметим, что сходящиеся фронты волн конечной амплитуды при схлопывании вызывают более глубокое изменение структуры льда, чем те изменения, которые удаётся достичь при квазистатическом сжатии. Поскольку именно волновой характер высокочастотных импульсов напряже-

ний позволяет «передавать» внешние воздействия через промежуточный слой в глубь льда (см. рис. 1), их воздействие на структуру льда должно в той или иной мере влиять на результаты механических испытаний образцов. Рассмотрим, например, воздействие импульсов напряжений на текстуру ледяной струи в цилиндрическом канале.

**Визуализация текстуры ледяного потока.** Особенности контактного разрушения льда при его течении в цилиндрическом канале проявляются в распределении скоростей деформаций по сечению струи и в прерывистости скольжения (рис. 7). Условно в струе льда можно выделить три слоя. В центре струи лёд движется подобно твёрдому телу с максимальной скоростью. На периферийной части струи тонкий слой льда прилипает к стенкам канала. В промежуточном слое происходит вязкопластическое течение. Толщина проме-



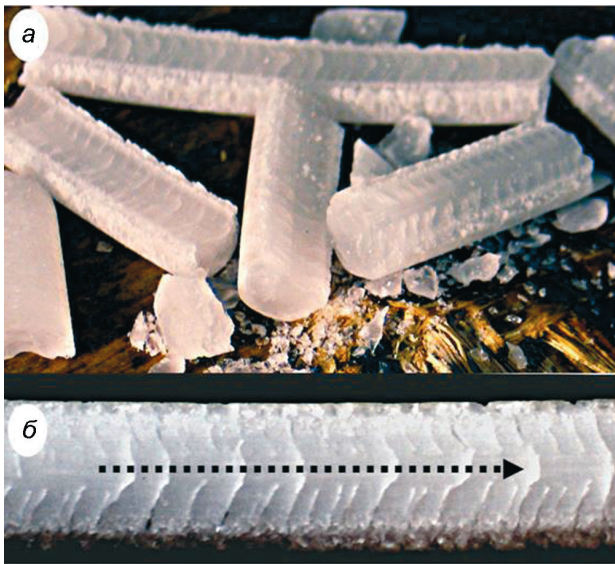
**Рис. 6.** Текстура льда в матрице в результате высокоскоростной пластической деформации:

*1* – струя; *2* – конус; *3* – ядро сжатия; масштаб сетки – 2 мм

**Fig. 6.** The texture of ice in the matrix as a result of high-speed plastic deformations:

*1* – stream; *2* – cone; *3* – compression core; grid scale – 2 mm





**Рис. 7.** Текстура льда после обтекания препятствия в цилиндрическом канале:

*a* – куски ледяной струи; *б* – текстура струи; стрелкой обозначено направление движения льда

**Fig. 7.** The texture of ice after the flow around an obstacle in a cylindrical channel:

*a* – pieces of ice jet; *b* – jet texture, the arrow indicates the direction of ice movement

жуточного слоя, даже в случае гладкой подложки, на порядки превосходит значения, характерные для конструкционных материалов. Динамическая вязкость мелкокристаллической структуры такого льда составляет 20 МПа·при температуре  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Скачкообразный режим движения льда в канале обусловлен прерывистым изменением свойств локального контакта льда с подложкой. Нарушенный в процессе динамического сдвига контакт упрочняется на стадии прилипания (квазипокой). Дальнейшее накопление энергии упругой деформации сопровождается увеличением скорости скольжения, которое снова завершается быстрым разрывом контакта. На снижение жёсткости контакта влияют импульсы напряжений, генерируемые разрывами. Прерывистость течения (*stick-slip*) тонкого приграничного слоя отслеживалась по сигналам акустической эмиссии. Частота пульсаций равна 0,005 1/с.

Локализация разрывов в периферической части струи может служить основанием для качественного воспроизведения природных явлений, например, движения ледника по ложу или его взаимодействий с бортами, а также для исследования режимов движения ледников. При изменении ус-

ловий скольжения (температуры и скорости деформации) были качественно воспроизведены два предельных режима движения льда на фрикционном контакте: блоковое скольжение и течение. По спектрограммам контактного разрушения льда определены два характерных времени инкубационного периода для адгезионного (0,08 с) и когезионного (1–1,5 с) разрушения льда. Этот результат не противоречит модельным представлениям о соответствии большего времени релаксации напряжений большему масштабу разрушения. Кроме того, отмечено повторяющееся «смещение» частоты заполнения сигналов акустической эмиссии (от 2,6 до 1,2 кГц), согласующееся с увеличением размера дефекта, а следовательно, с уменьшением его резонансной частоты. Полученные результаты позволяют объяснить, например, превышение поверхностной скорости активных ледников над значениями, рассчитанными без учёта реологических характеристик льда в придонных слоях ледников.

### Заключение

Для исследования неупругого удара разработаны акустомеханический метод и измерительная аппаратура, позволяющие определять мгновенные характеристики удара: мгновенное ускорение, мгновенную скорость и мгновенную осадку жёсткого шарового индентора, а также амплитудно-частотные характеристики сигналов акустической эмиссии, возникающей при образовании микротрещин во льду. Установлено, что при ударе в зоне контакта образуется промежуточный слой, структура которого имеет повышенную текучесть. Формирование этого слоя и его свойства определяют физическое подобие в семействе кривых в координатах *мгновенная сила – мгновенная скорость*. Построена обобщённая зависимость приведённого напряжения от приведённой мгновенной скорости, которая сопоставлена с моделями Герца и Тимошенко. Определена удельная энергия разрушения льда и части этой энергии, которые затрачиваются на пластическое и упругое деформирование, а также на тепловыделение. Предложено определяющее реологическое уравнение, которое учитывает деформационные изменения структуры льда при пластическом ударе. Экспериментальная зависимость мгновенных напряжений от мгновенной скорости при различ-

ных энергиях медленного удара шара о ледяную плиту представлена в виде полукубической параболы. Принципиально новое в работе — количественное определение деформационных изменений структуры льда непосредственно в процессе кратковременного пластического удара.

Для получения объёмных образцов со структурой промежуточного слоя применена матрица высокого сжатия с конфузуром (аналог сопла Лавалы) и поршнем с эллипсоидной формой рабочей поверхности. Определены реологические свойства льда, полученного методом интенсивной пластической деформации. Исследовано усиление пластичности пресноводного льда при наложении упругих волн конечной амплитуды, включая кумулятивный эффект, а также обтекание пластически деформированным льдом препятствия и распределение скоростей при течении в цилиндрическом канале. Спектры сигналов акустической эмис-

сии, генерируемые при контактном разрушении соединения льда с подложкой при пластическом сдвиге, сопоставлены со спектрами сигналов от удалённых источников на ледниках Альдегонда и Туюксу. Полученные результаты могут быть использованы при изучении факторов, влияющих на формирование и структуру промежуточных слоёв, кинетику контактного разрушения ледяных полей и процессов в придонных слоях ледников.

**Благодарности.** Работа была поддержана грантом РФФИ № 20-01-00649 «Численно-экспериментальное исследование нелинейных волновых явлений при контактном разрушении льда».

**Acknowledgments.** This work was supported by RFBR (grant № 20-01-00649 «Numerical and experimental study of nonlinear wave phenomena in contact ice destruction»).

## Литература

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
2. Епифанов В.П. Тектоническая структура и распределение скоростей в придонных слоях ледников // Вестн. Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 141–146.
3. Pettit E.C., Whorton E.N., Waddington E.D., Sletten R.S. Influence of debris-rich basal ice on flow of a polar glacier // Journ. of Glaciology. 2014. V. 60. № 223. P. 909–1006. doi: 10.3189/2014JoG13J161.
4. Iverson N.R. A theory of glacial quarrying for landscape evolution models // Geology. 2012. V. 40. № 8. P. 679–682.
5. Makkonen L., Tikanmaki M. Modelling the friction of ice // Cold Regions Science and Technology. 2014. P. 84–93. doi: 10.1016/j.coldregions.2014.03.002.
6. Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д. Кратковременная ползучесть льда. Новосибирск: Наука, 1982. 120 с.
7. Durham W.B., Prieto-Ballestros O., Goldsby D.L., Kargel J.S. Rheological and thermal properties of ice materials // Space Science Reviews. 2010. V. 153. № 1. P. 273–298. doi: 10.1007/s11214-009-9619-1.
8. Gillet-Chaulet F., Gagliardini O., Meyssonier J., Zwinger T., Ruokolainen J. Flow-induced anisotropy in polar ice and related ice-sheet flow modeling // Journ. Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2006. V. 134. P. 33–43.
9. Gödert G., Hutter K. Material update procedure for planar transient flow of ice with evolving anisotropy // Annals of Glaciology. 2000. V. 30. P. 107–114.
10. Piazzolo S., Wilson C.J.L., Luzin V., Brouzet C., Peterzell M. Dynamics of ice mass deformation: Linking processes to rheology, texture, and microstructure // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. V. 14. № 10. P. 4185–41194.

## References

1. Bogorodskiy V.V., Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskiye svoystva. Sovremennyye metody glyatsiologii.* Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
2. Epifanov V. P. Tectonic structure and velocity distribution in the bottom layers of glaciers. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2018, 3 (10): 141–147. doi: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.141-146. [In Russian].
3. Pettit E.C., Whorton E.N., Waddington E.D., Sletten R.S. Influence of debris-rich basal ice on flow of a polar glacier. *Journ. of Glaciology.* 2014, 60 (223): 909–1006. doi: 10.3189/2014JoG13J161.
4. Iverson N.R. A theory of glacial quarrying for landscape evolution models. *Geology.* 2012, 40 (8): 679–682.
5. Makkonen L., Tikanmaki M. Modelling the friction of ice. *Cold Regions Science and Technology.* 2014: 84–93. doi: 10.1016/j.coldregions.2014.03.002.
6. Zaretsky Yu.K., Chumichev B.D. *Kratkovremennaya polzuchest' l'da.* Short-term creep of ice. Novosibirsk: Nauka, 1982: 120 p. [In Russian].
7. Durham W.B., Prieto-Ballestros O., Goldsby D.L., Kargel J.S. Rheological and thermal properties of ice materials. *Space Science Reviews.* 2010, 153 (1): 273–298. doi: 10.1007/s11214-009-9619-1.
8. Gillet-Chaulet F., Gagliardini O., Meyssonier J., Zwinger T., Ruokolainen J. Flow-induced anisotropy in polar ice and related ice-sheet flow modeling. *Journ. Non-Newtonian Fluid Mechanics.* 2006, 134: 33–43.
9. Gödert G., Hutter K. Material update procedure for planar transient flow of ice with evolving anisotropy // *Annals of Glaciology.* 2000, 30: 107–114.
10. Piazzolo S., Wilson C.J.L., Luzin V., Brouzet C., Peterzell M. Dynamics of ice mass deformation: Linking processes to rheology, texture, and microstructure. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2013, 14 (10): 4185–41194.
11. Epifanov V.P. Destruction of polycrystalline ice. *Doklady Akademii Nauk.* Proc. of the Academy of Sciences. 1982, 267 (6): 1364–1367. [In Russian].

11. Епифанов В.П. Разрушение поликристаллического льда // ДАН. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.
12. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 4. С. 42–55.
13. Епифанов В.П. Физическое моделирование режимов движения ледников // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 333–344.
14. Валиев Р.З., Еникеев Н.А., Мурашкин М.Ю., Утяшев Ф.З. Использование интенсивных пластических деформаций для получения объёмных наноструктурных металлических материалов // Изв. РАН. Механика твёрдого тела. 2012. № 4. С. 109–122.
15. Георгиевский Д.В., Шабайкин Р.Р. Квазистатическое и динамическое сдавливание плоского круглого идеально-пластического слоя жёсткими плитами // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твёрдого тела. Тверь: Тверской гос. технич. ун-т, 2017. С. 56–63.
16. Сазонов К.Е. Определение методов коррекции результатов модельных экспериментов по определению ледового сопротивления судна // Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2016. Вып. 92 (376). С. 93–108.
17. Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П., Осипенко Н.М. Масштабный эффект при разрушении речного льда в условиях индентирования // Актуальные проблемы механики: Механика деформируемого твёрдого тела / Отв. ред. Р.В. Гольдштейн. М.: Наука, 2009. С. 35–55.
18. Епифанов В.П. Влияние промежуточного слоя на прочность соединения льда с подложкой // ДАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 27–32.
19. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоёмов // Науч. тр. Института Арктики и Антарктики. 1976. Т. 331. С. 77–99.
20. Епифанов В.П. Влияние импульсов напряжений на структуру льда в промежуточном слое // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 629–633.
21. Епифанов В.П. Моделирование процессов рекристаллизации в придонных слоях ледников // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 3. С. 20–31.
22. Епифанов В.П. Разрушение льда при ударных взаимодействиях // ДАН. 1985. Т. 284. № 3. С. 599–603.
23. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 224 с.
24. Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А. Экспериментальное определение удельной энергии механического дробления льда при ударе // Проблемы Арктики и Антарктики. 1973. № 41. С. 55–61.
25. Herz H. Über die Berührung fester elastischen Körper // Journ. für die reine und angewandte Mathematik. 1882. В. 92. С. 156–171.
26. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твёрдых тел. Удар. Киев: Наукова думка, 1976. 320 с.
27. Тимошенко С.Л., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
28. Богородский В.В., Гаврило В.П., Недошивин С.А. Разрушение льда. Методы, технические средства. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 232 с.
29. Савельев Б.А. Гляциология. М.: Изд-во МГУ, 1991. 288 с.
30. Epifanov V.P., Glazovsky A.F. Acoustic characteristics as an indicator of the features of ice movement in glaciers. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2010, 14 (4): 42–55. [In Russian].
31. Epifanov V.P. Physical modeling of the motion regimes of glaciers. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 333–344. [In Russian].
32. Valiev R.Z., Enikeev N.A., Murashkin M.Yu., Utyashev F.Z. Use of intense plastic deformations to obtain bulk nanostructured metallic materials. *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika tverdogo tela*. Proc. of the Academy of Sciences. Mechanics of solid body. 2012. 4: 109–122. [In Russian].
33. Georgievsky D.V., Shabaykin R.R. Quasistatic and dynamic compression of a flat round ideally plastic layer by rigid plates. *Matematicheskoe modelirovanie i eksperimentalnaya mehanika deformiruemogo tverdogo tela*. Mathematical modeling and experimental mechanics of a deformable solid body. Tver: Tver State Technical University, 2017: 56–63. [In Russian].
34. Sazonov K.E. Determination of methods for correcting the results of model experiments to determine the ship's ice resistance. *Trudy TSNII imeni akad. A.N. Krylova*. Proc. of the Krylov Central Research Institute. 2016, 92 (376): 93–108. [In Russian].
35. Goldstein R.V., Epifanov V.P., Osipenko N.M. Large-scale effect in the destruction of river ice under indentation conditions. *Aktual'nyye problemy mekhaniki: Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela*. Actual problems of mechanics: the mechanics of a deformable solid. Ed. R.V. Goldstein. Moscow: Nauka, 2009: 35–55. [In Russian].
36. Epifanov V.P. Effect of an intermediate layer on the strength of an ice – substrate interface. *Doklady Akademii nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2017, 62 (1): 14–19.
37. Cherepanov N.V. Classification of ices of natural reservoirs. *Nauchnyye trudy Instituta Arktiki i Antarktiki*. Scientific works of the Institute of the Arctic and Antarctic. 1976, 331: 77–99. [In Russian].
38. Epifanov V.P. The effect of stress pulses on the structure of ice in an intermediate layer. *Doklady Akademii nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2018, 63 (4): 151–155.
39. Epifanov V.P. Simulation of recrystallization processes in the bottom layers of glaciers. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2015, 19 (3): 20–31. [In Russian].
40. Epifanov V.P. Ice destruction during shock interactions. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 1985, 284 (3): 599–603. [In Russian].
41. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktnogo razrusheniya*. Contact damage mechanics. Moscow: Science, 1989: 224 p. [In Russian].
42. Heisin D.E., Likhomanov V.A. Experimental determination of the specific energy of the mechanical crushing of ice upon impact. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 1973, 41: 55–61. [In Russian].
43. Herz H. Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journ. für die reine und angewandte Mathematik*. 1881, 92: 156–171.
44. Kilchevsky N.A. *Dinamicheskoye kontaktnoye szhatiye tvordykh tel. Udar*. Dynamic contact compression of solids. Hit. Kiev: Naukova Dumka, 1976: 320 p. [In Russian].
45. Timoshenko S.L., Gudier J. *Teoriya uprugosti*. Theory of elasticity. Moscow: Nauka, 1975: 576 p. [In Russian].
46. Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P., Nedoshivin S.A. *Razrusheniye l'da. Metody, tekhnicheskiye sredstva*. The destruction of the ice. Methods, technical means. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 232 p. [In Russian].
47. Saveliev B.A. *Glyatsiologiya*. Glaciology. Moscow: MSU, 1991: 288 p. [In Russian].