

УДК 539.3/5

ВЛИЯНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР НА ЛОКАЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ

© 2020 г. В. П. Елифанов^{1,*}, К. Е. Сазонов²

Представлено академиком РАН В.Ф. Журавлёвым 25.06.2020 г.

Поступило 01.10.2020 г.

После доработки 01.10.2020 г.

Принято к публикации 07.10.2020 г.

Исследуется влияние нелинейных волновых структур на локальную твердость ледяного поля динамического типа формирования. Волновые структуры формируются при интерференции изгибно-гравитационных и продольных волн. Источником колебаний является когерентное излучение в самом льде. Различие локальных твердостей льда в узлах и пучностях стоячих волн (до 60%) объяснено динамическим метаморфизмом льда. Зависимости локальной твердости льда от координат в продольных и поперечных профилях ледяного поля имеют вид периодических кривых. Выделены масштабы текстур и построена фазовая поверхность волновых структур, которая не является монохромной и отражает пространственную неоднородность прочностных свойств ледяного поля. Эффект волнового воздействия зависит от условий на границе контакта льда со стенками бассейна. Количественно определено влияние волновых структур на прочностные свойства ледяного поля как одного из возможных факторов пространственной изменчивости свойств льда в условиях залегания.

Ключевые слова: волновые структуры, динамический метаморфизм, интерференция, ледяное поле, текстура, соленый лед

DOI: 10.31857/S2686740020060085

Известно, что циклические деформации поликристаллических материалов сопровождаются накоплением повреждений в их структуре. Это существенно снижает их сопротивление деформации. Применительно к плавающему ледяному полю наиболее актуальным является воздействие изгибно-гравитационных волн на его локальную прочность. В настоящее время рассмотрены вопросы о распространении изгибно-гравитационных волн в плавающей ледяной плите [1–3], а также зависимости параметров этих волн от условий возбуждения [4], зарегистрированы медленные волны и предпринята попытка связать их с различными гидрометеорологическими условиями [5]. Однако вопросу установления связи между микроскопическим строением льда и его макроскопическими характеристиками, а также исследованию эволюции его структуры под действием стационарных периодических волновых структур уделялось недостаточно внимания.

Настоящая работа является продолжением исследований волнового метаморфизма льда не только на лабораторных образцах, но и в ледяных полях. Так, в лабораторных условиях исследовалось влияние волн конечной амплитуды на динамическую вязкость пресноводного льда и деформационные изменения структуры [6]. Установлено, что в результате таких воздействий динамическая вязкость уменьшилась на несколько порядков по сравнению с исходным значением (до 20 МПа · с). Однако остаются недостаточно исследованными вопросы, связанные с формированием волновых структур и их влиянием на прочность ледяного поля [7].

Цель настоящей работы – количественное исследование механизма увеличения пластичности соленого льда под действием циклических деформаций, создаваемых волновыми периодическими структурами в ледяном поле. Исследуется влияние периодических смещений на локальную твердость соленого льда, обобщаются результаты измерений локальной твердости в продольных и поперечных профилях ледяного поля и находится фазовая поверхность стационарных периодических волновых структур. Вторичные текстуры льда рассматриваются как индикаторы волновых процессов. Ключевым моментом исследований

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук, Москва, Россия

² Крыловский государственный научный центр,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: evp@ipmnet.ru

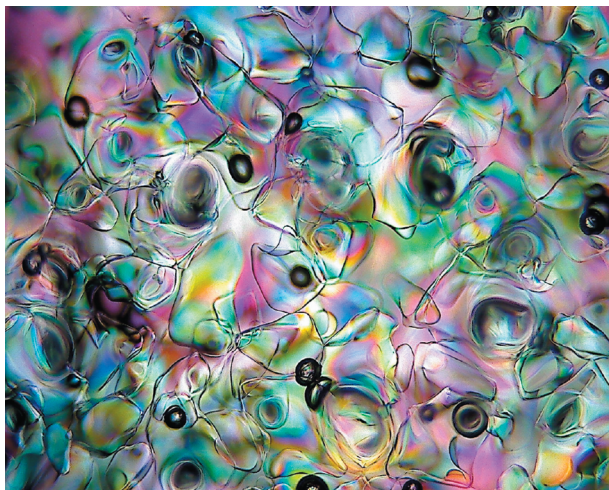


Рис. 1. Текстура моделированного льда в поляризованном свете; эффективный максимальный диаметр кристаллитов льда 0.5 мм.

являются измерения локальной твердости в продольных и поперечных профилях ледяного поля и рассмотрение механизма волнового метаморфизма льда. Концепция исследований состоит в том, что уменьшение локальной твердости и повышение локальной пластичности льда обусловлено, по-видимому, накоплением деформационных дефектов во льду в результате циклических нагружений. Волновые структуры в ледяном поле характеризуются повторяемостью деформаций в узлах и пучностях стоячей волны. Особенности волновых движений и результаты этих движений в ледяном поле подтверждаются закономерностями механического поведения льда при циклических испытаниях, например, ледяных балок на изгиб и ползучестью льда при сжатии.

Для замкнутого объема простой формы, например, ледяного бассейна в виде прямоугольного параллелепипеда, повторяемость волновых смещений будет проявляться в периодичности вторичных текстур, соответствующих чередованию пучностей и узлов стоячих волн в продольных и поперечных профилях ледяного поля.

В качестве представительного объекта исследований было выбрано ледяное поле в ледовом бассейне [7] площадью 800 м² (длина ледяного поля 80 м, ширина 10 м). По периметру с двух сторон оно было приморожено к твердым вертикальным стенкам и к одной торцевой (наклонной) стенке бассейна.

Лед готовили распылением холодной соленой воды (13.2‰) в атмосфере ледяного бассейна при температуре воздуха –20...–25°C [7]. Осевшие на поверхность воды ледяные гранулы со средним диаметром 0.5 мм “спекались” и формировали ледяной каркас, подобный снегу. Соле-

ная вода заполняла пространство между ледяными сферическими гранулами и замораживалась. Получался лед со структурой типа В9 [8], соленостью 6.7‰. Практическая значимость такого льда состоит в возможности переноса данных модельного эксперимента на натурные условия. Описание методик измерений и аппаратуры даны в работах [6, 7, 9].

С методической точки зрения низкая прочность моделированного льда на изгиб 18 кПа, на сжатие – 38 кПа (модуль деформации $E = 22$ МПа) и высокая гомологическая температура льда (0.95), а также остаточные напряжения, возникающие при послойном формировании ледяного поля, соответствовали выполнению поставленной задачи исследования. Средняя плотность моделированного льда 930 кг/м³, толщина от 40 до 53 мм.

Структура льда определялась по шлифам в поляризованном свете. Количественное исследование микроструктуры льда в процессе измерений локальной твердости выполняли с помощью акустических методов.

На рис. 1 показан шлиф льда в поляризованном свете, структура которого соответствует временному интервалу, равному 20 ч после “засева” льда, когда его прочностные свойства, определяемые по локальной твердости, достигли “установившихся” максимальных значений. В масштабе микрошлифа эффект от воздействий стоячих волн в явном виде пока не обнаружен. По-видимому, особенности структуры при волновом метаморфизме моделированного льда могут проявиться в повышенной плотности дефектов кристаллической решетки.

Твердость льда измеряли с помощью портативного динамометра типа “Мегеон-03055”, снабженного крестообразным наконечником [9]. Наконечник такой формы обладает высокой чувствительностью к структуре, поскольку при малом миделевом сечении (2.5 см²) имеет рабочую поверхность 72.8 см² и при измерениях контактирует с большим количеством ледяных кристаллов.

Измерения локальной твердости вдоль и поперек ледяного поля показали, что экспериментальные зависимости имеют вид периодических функций (синусоид), характерных для волнового процесса. Для распознавания вида периодической функции число измерений выбиралось таким, чтобы можно было восстановить вид периодической функции. Так, на мерной базе 80 м (продольный профиль) было выполнено 135 измерений. Это позволило выделить по экстремумам на экспериментальной кривой характерные длины волн (2 и 5 м для поперечного профиля, 2 и 40 м для продольного профиля). Длина волны $\lambda = 2$ м соответствует продольной волне, механизм генерации которой обусловлен, по-видимому, резонансными колебаниями ледяного поля.

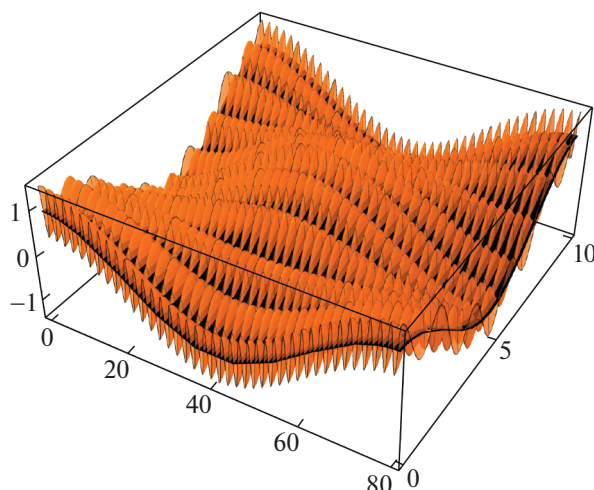


Рис. 2. Стационарные периодические волновые структуры в исследуемом ледяном поле при интерференции волн длиной 2, 5 и 40 м.

Колебания с длинами волн 5 и 40 м обусловлены изгибно-гравитационными волнами, что подтверждается геометрией ледового бассейна.

Амплитуда экспериментальных кривых локальной твердости льда изменяется в интервале от 36 кПа до 100 кПа в продольных профилях и от 26 кПа до 60 кПа в поперечных профилях при погрешности измерений осевой силы 5–7%. Чередование максимумов и минимумов локальной твердости является результатом воздействия на структуру льда стоячей волны. Факт формирования стоячих волн как “замороженных” текстур льда косвенно подтвержден тем, что изменения локальной твердости на экспериментальных зависимостях твердости от координаты точки измерений вдоль и поперек ледового бассейна расположены в плоскостях, параллельных стенкам бассейна.

При сложении падающей и отраженной волн, имеющих одинаковые амплитуды A_0 , частоты и длины волн λ , смещение χ в результирующей (стоячей) волне записывается в виде уравнения

$$\chi = \left(2A_0 \left| \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right| \right) \cos \omega t, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота; x , t – переменные значения соответственно длины и времени.

Твердость вторичных текстур льда является результатом динамического метаморфизма (рекристаллизации) [6], причем минимальные значения твердости соответствуют пучностям стоячей волны. Именно здесь, в пучностях, при максимальном смещении частиц накапливаются дефекты и уменьшаются динамическая вязкость и твердость льда, а следовательно, уменьшается его прочность. Напротив, в узловых точках стоячей волны смеще-

ние и скорость деформации минимальные, а значение твердости максимальное. Соответственно локальная твердость льда (осциллирующая твердость) является зеркальным отражением фазовой поверхности смещения (проекция скорости) в стоячей волне.

Таким образом, каждое значение измеренной твердости является репликой текстуры, которая сформировалась под большим или меньшим воздействием стоячей волны.

Смещение частиц для плоской стоячей волны представлено уравнением [10]

$$\chi = A_0 \cos \frac{\pi m}{a} x \cos \frac{\pi n}{b} y, \quad (2)$$

где χ – смещение (проекция вектора скорости на вертикальную ось z), A_0 – амплитуда, зависящая от условий возбуждения волн; m и n – число колебаний, укладывающееся соответственно по длине ледового поля $a = 80$ м и ширине бассейна $b = 10$ м ($m, n = 1, 2, \dots; m = n \neq 0$). Для рассматриваемого случая уравнение (2) записывается в виде

$$\chi = A_1 \cos \frac{\pi m}{a} x \cos \frac{\pi n}{b} y + A_2 \cos \pi x \cos \pi y, \quad (3)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складывающихся волн, определяются из эксперимента.

На рис. 2 показана зависимость амплитуды фазовых колебаний от координаты точки измерений, рассчитанная для волн длиной $\lambda = 2, 5$ и 40 м (уравнение (3)).

Построенная по экспериментальным данным фазовая поверхность стационарных периодических колебаний отражает локальную твердость моделированного льда. Так, если площадка измерений приходится на пучность стоячей волны, то

наблюдается меньшее значение твердости, поскольку в этой области накопилось большое количество дефектов. В узле стоячей волны смещение и скорость близки к нулю, поэтому первичная структура моделированного льда менее нарушена. Соответственно наблюдается большая его твердость. Отметим, что плоскости узлов и пучностей расположены параллельно друг другу (и боковым стенкам бассейна), что характерно для стоячей волны.

Из рис. 2 следует, что экспериментальная поверхность локальной твердости ледяного поля не является монохромной. Длинные изгибно-гравитационные волны ($\lambda = 5$ и 40 м) являются модулирующими колебаниями для волн с длиной 2 м (квазипродольные). Модель волновых структур (уравнение (3)) является зеркальным отражением экспериментальных зависимостей локальной твердости от координаты точки измерений в продольных и поперечных профилях. Отметим, что смещения фазовых колебаний имеют тонкую структуру, причем эффект волнового воздействия на формирование вторичной текстуры и локальную твердость зависит от условий формирования ледяного поля, особенно на границе его контакта со стенками бассейна.

Сопоставление экспериментальных кривых, полученных на разных длинах продольных и поперечных профилей бассейна, показывает, что осцилляции амплитуд обусловлены интерференцией волн. Так, изгибно-гравитационная волна длиной $\lambda = 5$ м модулирует продольную волну длиной $\lambda = 2$ м с глубиной модуляции около 0.2 . Сформированная в узлах и пучностях текстура льда сохраняет в “замороженном” виде структуру волн, что проявляется в периодической зависимости локальной твердости льда от координаты точек измерений.

Оценим фазовую скорость продольной волны. Согласно Д.Е. Хейсину [1], при толщине плавающего льда $h \ll \lambda$, фазовая скорость записывается в виде

$$V = b \left\{ \frac{\rho(k_0 h)^3}{3(\rho_a + \rho k_0 h)} \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

где $h = 0.041$ м, $a = (22 \text{ МПа}/930 \text{ кг/м}^3)^{1/2} = 153.8$ м/с и $b = 0.65a = 100$ м/с — соответственно скорости продольных и сдвиговых волн, ρ и ρ_a — соответственно плотности льда и воды, $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Подставляя в формулу (4) значения величин, соответствующие обозначениям, находим фазовую скорость распространения $V = 12.8$ м/с и частоту колебаний $f = V/\lambda = 6.4$ Гц. Близкая частота колебаний 5 Гц зарегистрирована в спектре контактного разрушения при пенетрации льда. Рассчитанные значения фазовой скорости не противоречат данным, полученным в работе [11].

По-видимому, эффективность необратимых изменений в структуре льда под действием акустической энергии возрастает в результате комбинированного воздействия колебаний и статических напряжений. Влияние диссипации упругой энергии, способной вызывать локальный нагрев, уменьшить зернограничное трение, снизить предел текучести и увеличить пластичность, для этих частот требует дальнейшего изучения.

Первоначально предполагалось, что основными источниками волн являются технологические вибрации и движущаяся нагрузка, создаваемая массой осаждающихся ледяных гранул [7]. Дополнительные исследования показали, что процесс метаморфизма продолжается при отсутствии внешних вибраций, т.е. источник колебаний должен находиться внутри ледяного поля. Таким источником является когерентное излучение упругих волн при замораживании воды, т.е. само ледовое поле [12].

В процессе метаморфизма льда происходит самосогласованное влияние (остаточных) напряжений и периодических волновых структур на свойства льда. Комплексное воздействие этих факторов изменяет текстуру ледяного каркаса по всей его толщине и отражается в локальной неоднородности, проявляющейся в профилях макроскопических характеристик прочности льда, оцениваемой по его твердости.

Таким образом, в ледовом бассейне прямоугольной формы площадью 800 м^2 создается под воздействием комбинированных причин стационарная периодическая волновая структура. Эта волновая структура формирует вторичную текстуру льда, что изменяет его локальную твердость. Эффект от воздействий стоячих волн усиливается остаточными напряжениями, возникшими в процессе послойного намораживания ледяного поля, а также напряжениями, вызванными кристаллизационными процессами при наличии ограничений со стороны боковых стенок бассейна. Определены характерные масштабы волновых текстур (2 , 5 и 40 м) и значения пространственной неоднородности локальной твердости на этих участках ледяного поля.

Формирование вторичных текстур моделированного льда под влиянием волновых структур определяется его упругостью, геометрией ледяного поля и условиями на границе контакта льда со стенками бассейна. Доминирующее влияние на формирование развитой системы стоячих волн в ледяном поле оказывает внутренний источник — когерентное излучение упругих волн при замораживании воды. Возможность обобщения полученных в бассейне результатов на другие водоемы и возможность их переноса на природный лед были проверены в условиях залегания на природном льде.

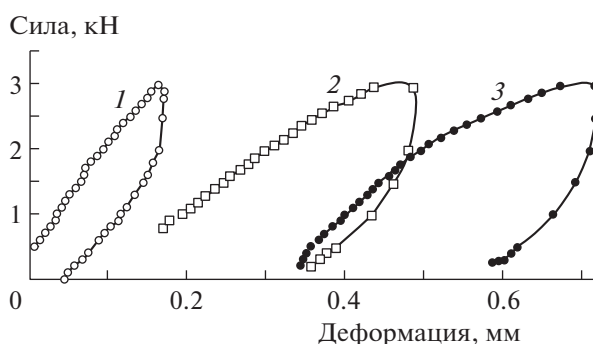


Рис. 3. Зависимости осевой силы сжатия от деформации в режиме сжатие–разгрузка: 1 – вдоль и 2, 3 – ортогонально оптической оси кристаллов трансверсально-изотропного льда.

Для этого был выбран участок реки с почти параллельными берегами, так что речной ледяной покров можно было в первом приближении рассматривать как ледяное поле, примороженное к двум параллельным стенкам. Полевые измерения локальной твердости в поперечном профиле речного ледяного покрова толщиной 0.48 м качественно подтвердили результаты, полученные в ледовом бассейне на моделированном льде.

Полученный результат сопоставлен с данными работы [13], в которой обнаружено чередование зон высокой прочности с зонами низкой прочности ледяного покрова. Авторы не объяснили причину “чередования” максимальной и минимальной прочности ледяного покрова, однако введенный ими коэффициент неоднородности, который определялся как отношение среднего значения к максимальному значению прочности в испытаниях на одноосное сжатие, равный 0.75, совпадает с результатами, полученными на речном льде.

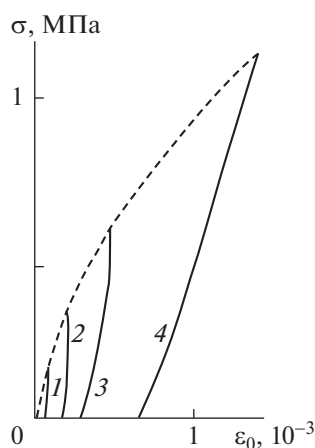


Рис. 4. Зависимости напряжений от деформаций при изгибе–разгрузке консольной ледяной балки для разных напряжений: 1 – 0.18 МПа, 2 – 0.36 МПа, 3 – 0.67 МПа и 4 – 1.27 МПа.

Это дает возможность предположить, что чередование зон разной прочности в морском ледяном покрове и речном льде является результатом воздействия волновых структур.

Полевые измерения локальной твердости в поперечном профиле речного ледяного покрова (природный лед) качественно подтвердили результаты, полученные в ледовом бассейне на моделированном льде. По-видимому, механизм влияния стационарных периодических волновых структур на локальную твердость льда и термодинамические условия, при которых этот механизм реализуется, имеют много общего с процессами, происходящими при циклических деформациях льда в квазистатических режимах нагружения.

Известно, что в ненагруженном пресноводном льде II_n при напряжениях ≤ 50 кПа, создаваемых ультразвуковой волной, реализуется амплитудно-независимый механизм деформирования, причем потери упругой энергии при квазистатическом и динамическом деформировании описываются моделью дислокационного гистерезиса [14]. При напряжениях больше 340 ± 10 кПа концентрация дислокаций возрастает более чем в 2000 раз (деформация 0.56%, температура -5°C , скорость деформации 0.05 c^{-1}) и в трансверсально-изотропном льде происходят необратимые деформации. На рис. 3 проиллюстрировано нелинейное поведение льда при сжатии и последующей разгрузке, которое проявляется в накоплении необратимых деформаций, а также в явлении запаздывающей или задержанной упругости.

Испытывались образцы столбчатого пресноводного льда: с преимущественной ориентацией C-осей кристаллов вдоль (1) и ортогонально (2) оси цилиндрических образцов. Кривая 3 соответствует повторному сжатию образца. Приведены характерные деформационные кривые из двух серий механических испытаний при осевом сжатии.

Из рис. 3 следует, что смещение дислокаций происходит в плоскостях скольжения, запасенная в смежных кристаллитах упругая энергия при разгрузке не возвращает пластически деформированный кристалл в исходное состояние. Отметим, что при повторном нагружении (кривые 2 и 3) пластическая деформация возрастает. Это подтверждает возможность формирования вторичных текстур в стоячей волне в результате накопления деформационных повреждений при циклическом сжатии.

Поскольку понимание происходящих в ледовом бассейне процессов основано на использовании изгибной прочности льда, то более детально рассмотрим, что происходит при этом виде напряженного состояния.

Испытания ледяных балок трансверсально-изотропной структуры с диаметром кристаллов 5 мм на изгиб выполняли при температуре -11.5°C . Прогиб балок измеряли с точностью 5×10^{-7} м при градиенте температуры $\pm 0.5^\circ$ по объему измерительной камеры. На рис. 4 показаны кривые ползучести при разгрузке консольных балок. Штриховая линия является интегральной кривой нагружения семейства деформационных кривых.

Все кривые имеют форму, характерную для петель гистерезиса и обусловленную присутствием в деформируемом льде возвращающей силы, что подтверждается немедленным уменьшением деформации сразу же, как только сняты напряжения.

Поскольку полная деформация складывается из упругой ϵ_0 и дислокационной частей ϵ_{dm} , то прямая, проходящая через начало координат и соединяющая концы гистерезисной петли в координатах “напряжение – полная деформация”, соответствует дефекту секущего модуля (рис. 4)

$$E^* = \Delta E / E. \quad (5)$$

По тангенсу угла наклона этой прямой (5) рассчитан эффективный упругий модуль поликристаллического льда. Полученное значение $E_{\text{эфф}} = 7.9 \times 10^9$ Па близко к модулю Юнга (9.3×10^9 Па). Соответственно дефект секущего модуля, определенный механическим способом, равен 0.85. Отметим, что с увеличением нагрузки угол наклона уменьшается. Это свидетельствует об уменьшении эффективного модуля в результате накопления деформационных повреждений (дислокаций). Форму петель 1–4 на рис. 4 сравнивали с основными моделями гистерезиса [15]. Для идентификации кривых выбран параметр r как отношение декремента затухания δ к дефекту модуля

$$r = \frac{\delta}{\Delta E / E}. \quad (6)$$

С учетом тепловых потерь механический декремент $\delta_{\text{мех}}$, например, для петли 1 (рис. 4) $\delta_{\text{мех}} = 3.07$. Подставляя полученные в эксперименте значения механического декремента затухания и дефекта секущего модуля в уравнение (6), находим значение параметра $r = 3.6$.

Полученное значение параметра $r > 2$ и форма гистерезиса (рис. 4) указывают на то, что механизм амплитудно-зависимых потерь упругого деформирования обусловлен трением, а не отрывом дислокаций от точек слабого зацепления. Это является основанием для применения теории Гранато–Люкке к поликристаллическому льду и вычисления истинного дефекта его модуля упругости по уравнению

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_h = \frac{2\Delta V}{V}, \quad (7)$$

согласно которому относительное изменение модуля, возникающее благодаря дислокационному трению, равно удвоенному дефекту относительной продольной скорости ультразвука V .

Таким образом, декремент затухания может быть вычислен при динамическом деформировании по уравнению

$$\delta = \alpha \lambda, \quad (8)$$

где α – коэффициент поглощения, $\lambda = 0.32$ см – длина волны ультразвука.

Волновой вектор продольной волны частотой 1 МГц был направлен по оси образца. Для поликристаллического льда в упругой области сжатия в интервале деформаций от 0.01 до 0.14 определены при температуре -40°C дефект скорости ($\Delta V = 17$ м/с) и дислокационное поглощение $\alpha = 0.12$ см $^{-1}$. Подставляя экспериментальные данные в уравнения (8) и (7), находим дефект упругого модуля $\Delta E / E = 1.06 \times 10^{-2}$, декремент затухания $\delta = 3.86 \times 10^{-2}$ и отношение последнего к дефекту упругого модуля $r = 3.64$.

Полученные значения r свидетельствуют об одинаковой природе механизмов упругого деформирования льда при квазистатическом и динамическом деформировании. В обоих случаях потери упругой энергии связаны с обратимым гистерезисным смещением дислокаций и внутренним трением, которые описываются моделью дислокационного гистерезиса.

Отметим, что формирование вторичных структур во льду не ограничено действием стоячей волны. Распространение импульса напряжений, возникающего, например, при контактном взаимодействии, также способно вызвать локальные изменения структуры льда, даже при расходящемся фронте волны.

В итоге, исследовано влияние стационарных периодических волновых структур на прочностные свойства ледяного поля динамического типа формирования. Установлено, что под действием стоячих волн в ледовом поле площадью 800 м², лежащем на поверхности жидкости в бассейне прямоугольной формы, в результате интерференции изгибно-гравитационных и продольных волн формируются стационарные периодические волновые структуры. Волновые структуры (“замерзшие волны”) являются результатом интерференции резонансных волн. Совместное действие волновых структур и остаточных напряжений формируют вторичные текстуры льда. Реализации процессов метаморфизма льда способствуют остаточные напряжения, возникающие при последовательном наращивании толщины ледяного слоя и пластических деформациях льда. Доминирующим источником упругих волн в ледяном поле на стадиях замораживания воды и пластической деформации льда является когерентное излучение в самом льде.

На основании выполненных измерений локальной твердости в продольных и поперечных профилях ледяного поля определена картина пространственного распределения прочностных свойств моделированного льда как результата интерференции изгибно-гравитационных и продольных волн, построен фазовый портрет волновых структур, под действием которых формировались вторичные текстуры льда пониженной твердости, и реализовался его динамический метаморфизм.

Количественно определено влияние волновых структур на прочностные свойства ледяного поля как одного из возможных факторов пространственно-временной изменчивости льда в условиях залегания. Закономерности формирования вторичных текстур в моделированном льде и влияние волновых структур на прочностные свойства ледяного поля проверены на речном льде в условиях залегания.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки влияния волновых процессов на формирование структуры промежуточных слоев при контактном разрушении и в придонных слоях ледников. Практический интерес полученных результатов состоит в учете волновых явлений при определении ледовых нагрузок на плавучие и стационарные морские платформы, а также при разработке эффективных технологий проектирования корпусов ледоколов и судов ледового плавания.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20–01–00649).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хейсин Д.Е.* К задаче упруго-пластического изгиба ледяного покрова // Тр. ААНИИ. М.-Л.: Транспорт, 1964. Т. 267. С. 143–149.
2. *Khabakhpasheva T., Shishmarev K., Korobkin A.* Large-time response of ice cover to a load moving along a frozen channel // Applied Ocean Research. 2019. V. 86. P. 154–156.
3. *Стурова И.В.* Дифракция поверхностных волн на упругой плавающей на мелководье платформе // ПММ. 2001. Т. 65. № 1. С. 114–122.
4. *Козин В.М., Погорелова А.В., Земляк В.Л., Верецагин В.Ю., Рогожникова Е.Г., Кипин Д.Ю., Матюшина А.А.* Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров распространяющихся в плавающей пластине изгибно-гравитационных волн от условий возбуждения: Монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 222 с.
5. *Смирнов В.Н.* Упругие изгибные волны в ледяном покрове // Труды ААНИИ. Л.: Гидрометеоздат, 1976. Т. 331. С. 133–140.
6. *Епифанов В.П.* Влияние импульсов напряжений на структуру льда в промежуточном слое // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 629–633.
7. *Епифанов В.П., Сазонов К.Е.* Влияние стоячих волн на локальную прочность ледяного поля // ДАН. 2019. Т. 489. № 6. С. 564–569.
8. *Черепанов Н.В.* Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. Л.: Гидрометеоздат, 1976. Т. 331. С. 77–99.
9. *Епифанов В.П.* Влияние естественных факторов на морфологию снежного покрова // Вестн. Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 155–162.
10. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры изд-ва “Наука”, 1977. 816 с.
11. *Заславский Ю.М., Заславский В.Ю.* Экспериментальный анализ изгибных волн на речном льду // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 4. С. 483–490.
12. *Епифанов В.П., Нестеров С.В.* Электромагнитная эмиссия как метод количественных исследований пластической деформации льда // Процессы в геосредах. 2019. № 4 (22). С. 480–489.
13. *Беккер А.Т., Фарафонов А.Э., Помников Е.Е.* Неоднородность ледяных полей // Вестн. инженерн. школы ДВФУ. 2017. № 3 (32). С. 64–71.
14. *Епифанов В.П.* Мезомеханика упругого деформирования льда // Материалы гляциологических исследований. 2003. Вып. 95. С. 9–21.
15. *Лебедев А.Б.* Амплитудно-зависимый дефект модуля упругости в основных моделях дислокационно-гистерезиса // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. Вып. 7. С. 1214–1221.

INFLUENCE OF STATIONARY PERIODIC WAVE STRUCTURES ON THE LOCAL STRENGTH OF THE ICE FIELD

V. P. Epifanov^a and K. E. Sazonov^b

^a *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Krylov State Research Center, Saint-Peterburg, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.F. Zhuravlev

The effect of nonlinear wave structures on the local hardness of an ice field of a dynamic type of formation is investigated. Wave structures are formed during the interference of flexural-gravitational and longitudinal waves. The source of oscillations is coherent radiation in the ice itself. The difference in local hardnesses of ice in nodes and antinodes of standing waves (up to 60%) is explained by the dynamic metamorphism of ice. The dependences of the local ice hardness on the coordinates in the longitudinal and transverse profiles of the ice field have the form of periodic curves. The scale of the textures was determined and the phase surface of the wave structures was constructed, which is not monochrome and reflects the spatial heterogeneity of the strength properties of the ice field. The effect of wave action depends on the conditions at the interface between the ice and the pool walls. The influence of wave structures on the strength properties of the ice field as one of the possible factors of the spatial variability of ice under conditions of occurrence is quantified.

Keywords: wave structures, dynamic metamorphism, interference, ice field, texture, salty ice