= ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА =

УДК 539.3/5

ВЛИЯНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН НА ЛОКАЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАННОГО ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ В. П. Епифанов^{1,*}, К. Е. Сазонов^{2,**}

Представлено академиком РАН В.Ф. Журавлёвым 05.06.2019 г.

Поступило 05.06.2019 г.

Рассматриваются два сценария влияния стоячих волн на прочностные свойства льда, лежащего на поверхности жидкости: в процессе намораживания ледяного поля и в результате потери устойчивости, которая вызвана обжатием по стенкам бассейна из-за расширения воды при замораживании. Полученные экспериментальные профили твёрдости ледяного поля свидетельствуют о формировании периодических структур, характерных для волнового процесса. Показано, что в обоих случаях возникающие в бассейне стоячие волны изменяют прочностные характеристики ледяного покрова. *Ключевые слова*: лёд, прочность, твёрдость, стоячие волны, моделирование.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-56524896564-569

В настоящее время основным способом получения информации о воздействии льда на различные морские сооружения является проведение физических экспериментов с их моделями в ледовых бассейнах. Эти эксперименты проводятся с соблюдением критериев подобия Фруда и Коши, которые определяют требования к характеристикам, в том числе и прочностным, моделированного льда, используемого в экспериментах. Обеспечение этих требований представляет достаточно сложную задачу из-за нестабильности механических свойств льда, разрушаемого при температуре, которая только на два-три градуса отличается от температуры фазового перехода. Поэтому выявление различных факторов, оказывающих влияние на прочностные свойства моделированного льда, представляется актуальной задачей. Одним из таких факторов является возникновение стоячих волн в ледовом бассейне.

Целью настоящего исследования является экспериментальное определение с помощью метода пенетрации продольного и поперечного профилей твёрдости ледяного поля, которое формируется в частично закрытом ледовом бассейне на поверхности жидкости. Исследования построены таким образом, что по результатам измерений твёрдости можно сделать вывод о возможности возбуждения длинных изгибно-гравитационных стоячих волн в ледяном поле, сформированном в бассейне прямоугольной формы. Экспериментальные зависимости осевой силы сопротивления пенетрации наконечниками разной формы и миделева сечения имеют вид периодических пилообразных функций, характерных для волнового процесса.

Установлена пространственная неоднородность твёрдости моделированного льда, коррелирующая с картиной узлов и пучностей длинных стоячих волн. Полученные результаты свидетельствуют о стационарных периодических волновых структурах в моделированном льде, образовавшихся под действием стоячей волны. Источники возбуждения могут быть связаны как с процессом проведения модельных испытаний в ледовом бассейне, так и с промышленными или сейсмическими вибрациями. Полученные результаты могут быть использованы при изучении факторов, влияющих на кинетику контактного разрушения льда в ледовом бассейне и на определение ледовых нагрузок на плавучие и стационарные морские платформы.

В экспериментальной механике деформирования и разрушения льда для объяснения его механических и прочностных свойств изначально использовали представление о связи макроскопических характеристик с его структурой. В соответствии с этим представлением, подтверждённым многочисленными экспериментами, принималось, что деформационное изменение структуры исследуемого материала реализуется на всех стадиях деформирования (упругого и пластического). Применительно ко льду его достоверность первоначально была проверена при

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

² Крыловский государственный научный центр,

Санкт-Петербург

^{*}E-mail: evp@ipmnet.ru

^{**}E-mail: kirsaz@rambler.ru

решении прямой задачи, в которой с помощью акустико-механического метода по акустическим характеристикам исследуемого льда количественно определялись деформационные изменения его структуры [1, 2]. Полученные результаты были использованы для дистанционного изучения кинетики контактного разрушения льда [3]. Далее в работе [4] поставлена и решена обратная задача: исследовано влияние импульсов напряжений в сходящихся фронтах упругих волн малой амплитуды в условиях гидростатического сжатия на формирование сверхпластичной структуры льда.

Анализ полученных ранее результатов с помощью акустико-механического метода показывает перспективность исследования влияния гравитационных стоячих волн, возникающих в частично закрытом бассейне, на прочностные свойства моделированного льда. Тем более что вопросы возбуждения поверхностных волн в жидкостях [5] и волновые колебания ледяного покрова [6, 7] остаются попрежнему актуальными.

В рассматриваемом случае ледяное поле создаётся путём распыления воды в переохлаждённой атмосфере ледового бассейна [8], при этом на поверхности воды создаётся слой, аналогичный снегу. Воздействие стоячих волн на такой слой должно проявляться сильнее и приводить к формированию вторичных текстур.

В качестве прочностной характеристики моделированного льда в ледовом бассейне исследовалась его твёрдость. Для измерения твёрдости льда использовали портативный твердомер на базе цифрового динамометра типа "Мегеон-03055" [9, 10]. Использовали два типа наконечников (крестообразный и конический). Крестообразный наконечник имеет вид двух обоюдоострых лезвий, имеющих общую продольную ось и повёрнутых один относительно другого на 90°. Площадь его рабочей поверхности около 72,8 см², миделево сечение 2,5 см². Миделево сечение конического наконечника (тупого) около 1 см². Сменные наконечники жёстко крепили к штоку динамометра. Измерения твёрдости льда выполняли через сутки после формирования ледяного поля до проводки модели. Прочность моделированного льда на изгиб 18 кПа, на сжатие 38 кПа, модуль деформации E = 22 МПа, средняя плотность 930 кг/м³ (min 923 кг/м³, max 939 кг/м³). Солёность воды 13,2%, льда 6,7%. Толщина льда 40-41 мм.

На рис. 1 представлены результаты измерений локальной твёрдости моделированного льда как функции силы сопротивления при пенетрации на-конечниками разной формы и миделева сечения.





Рис. 1. Зависимости силы сопротивления моделированного льда от координаты измерений в ледовом бассейне для разных типов наконечников (*1* — крестообразный, *2* — тупой). Мерная база 10 м.

Отметим, что приведённые на рис. 1 данные измерений характеризуют лёд до проводки модели и формирования канала и получены для поперечного профиля. Как следует из рисунка, экспериментальные зависимости осевой силы от точек измерений имеют вид кривых пилообразной формы. В рассматриваемом случае интервал между точками измерений был произвольным (от 45 до 55 см).

Отметим, что значения величины твёрдости как отношения осевой силы к миделевому сечению наконечника в пределах точности эксперимента для использованных типов наконечников остаются практически близкими ($\sigma_{max} \approx 5 \text{ M}\Pi a$, $\sigma_{min} \approx 2,3 \text{ M}\Pi a$).

Относительная ошибка измерений с помощью портативного твердомера для однородного материала не превышает 5–7%. Поэтому наблюдаемые различия осевой силы в разных точках ледяного поля являются репликой неоднородной структуры льда. Анализ условий эксперимента позволяет предположить две версии процессов, которые могут формировать наблюдаемую локальную неоднородность твёрдости в ледяном поле.

Можно предположить, что периодическая структура в моделированном льде возникает под влиянием стоячих волн промышленного или сейсмического происхождения. Согласно этому сценарию, источником волн являются вибрации, постоянно возбуждаемые движущейся технологической тележкой с оборудованием для распыления воды, и движущаяся нагрузка, создаваемая массой осаждающихся ледяных гранул.

Как следует из рис. 1, такие воздействия приводят к изменениям структуры слоя по всей его толщине

и проявляются в профилях макроскопических характеристик прочности льда, оцениваемой по его твёрдости. Эксперименты первой серии измерений (рис. 1) подтверждают явно выраженную периодичность локальной твёрдости в моделированном льде. Такая периодичность отражает факт формирования периодических текстур, возможно, возникающих при замораживании воды под воздействием стоячей волны. Ледяной каркас сохраняет изменения текстуры льда, сформированной в узлах и пучностях. Нелинейные изменения физических свойств моделированного льда, проявляющиеся в периодическом изменении твёрдости, допускают в первом приближении аппроксимацию экспериментальных данных зависимостью пилообразной формы с постоянным периодом.

В рамках такого допущения, принимая расстояния между двумя соседними максимумами на пилообразной кривой (рис. 1) равными длине изгибно-гравитационной волны ($\lambda \approx 1$ м), оценим фазовую скорость распространения изгибно-гравитационной волны. Для случая когда толщина плавающего льда много меньше длины волны $h \ll \lambda$, согласно Хейсину [11] фазовая скорость записывается в виде

$$V = b \begin{cases} \left[\frac{\rho(k_0 h)^3}{3\rho_a} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \\ \frac{1 + \frac{\rho k_0 h}{\rho_a}}{\rho_a} \end{cases}^{0.5}, \quad (1)$$

где h = 0,041 м, a = (22 Мпа/930 кг/м³)^{0,5} = 153 м/с и b = 0,65a = 99,5 м/с — соответственно скорости продольных и сдвиговых волн, р и ρ_a — соответственно плотности льда и воды, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$. Подставляя в формулу значения величин, соответствующие обозначениям, находим V = 0,35 м/с и $f = \frac{V}{\lambda} = 0,35$ Гц. Стоячая волна возникает в результате интерференции падающей и отражённой от вертикальных боковых стенок ледового бассейна волны. Для того чтобы акустическая волна при распространении по льду изменяла его свойства, необходимо, чтобы либо её амплитуда была достаточно большой, либо лёд находился в напряжённом состоянии (например, сжатии).

Согласно первому сценарию, волны постоянно возбуждались движущейся технологической тележкой, а также перемещающейся по снежному покрову нагрузкой, обусловленной выпадением замёрзших капель воды. Такое комбинированное воздействие вызвало появление развитой системы стоячих волн, которая воздействует на слой снега не только в процессе его формирования, но и после прекращения распыления воды в процессе его метаморфизма. Такие воздействия могут приводить к изменению структуры слоя льда по всей его толщине и не могут не отразиться в локальной неоднородности, проявляющейся в профилях макроскопических характеристик прочности льда, оцениваемой по его твёрдости.

Второй сценарий воздействия стоячих волн на прочностные свойства льда связан с процессом проведения модельных испытаний в ледовом бассейне. При технологической подготовке, спуске модели судна или ледостойкого сооружения, а также при разрушении моделированного ледяного покрова возникает мощная система стоячих волн, которая приводит к деформациям ледяного покрова и возникновению в нём соответствующих этим деформациям напряжений, которые локально изменяют прочностные характеристики ледяного покрова.

В этой серии экспериментов рассматривалось формирование периодических структур при спуске модели судна. Отметим, что противоположные торцы ледяного поля (ширина бассейна 10 м, толщина льда 52—53 мм) приморожены к стенкам бассейна. Поэтому сжимающие лёд напряжения, возникшие при замораживании воды, создают условия для формирования периодических структур уже при небольших амплитудах стоячих волн [4]. Результаты этой серии экспериментов представлены на рис. 2 в виде зависимости силы сопротивления льда от координаты точек измерений.

Обобщённая кривая 1 имеет форму полуволны изгиба, что согласуется с представлениями о потере устойчивости ледяной пластины, например, из-за расширения воды при замерзании, вызванного обжатием по торцам. Аппроксимация экспериментальных точек в средней части косинусоидой (кривой 2) не противоречит волновому характеру деформационных изменений локальной неоднородности структуры моделированного льда. В первом приближении экспериментальная зависимость (рис. 2), по-видимому, может рассматриваться как результат наложения этих двух механизмов.

Таким образом, повторяющиеся текстуры в моделированном льде формируются как при замораживании стоячей волны, так и в результате потери устойчивости ледяного поля. Отличие состоит в том, что второй механизм реализуется при большей интенсивности напряжений и ему соответствует большая неоднородность твёрдости моделированного



Рис. 2. Зависимость силы сопротивления моделированного льда внедрению наконечника крестообразной формы от координаты точки измерений поперёк ледового бассейна; аппроксимация: кривая *1* — полуволна изгиба, *2* — косинусоида.

льда, которая поперёк ледового бассейна достигает 360%, при этом стоячая волна воздействует на структуру ледяного поля не только при "засеве" гранул, но и в процессе метаморфизма льда. Можно выделить по крайней мере два характерных масштаба (5 и 10 м).

В третьей серии экспериментов (рис. 3) неоднородность твёрдости моделированного льда была исследована в продольном профиле ледяного поля при тех же условиях, что в предыдущей серии из-



Рис. 3. Зависимость силы сопротивления моделированного льда внедрению наконечника крестообразной формы от координаты точки измерений в продольном профиле ледового бассейна.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 489 № 6 2019

мерений. Из рис. 3 следует, что в целом периодический характер изменения силы сопротивления льда внедрению наконечника (значит, и твёрдости), за исключением начального участка, сохраняется. Как и во второй серии экспериментов, проявляется эффект случайных осцилляций прочности в плоском профиле ледяного поля. На основании полученных экспериментальных данных можно выделить два характерных масштаба: малый (размером 5–6 м) и большой (40 м). Наиболее вероятной причиной наблюдаемого эффекта является воздействие стоячих волн в жидкости на процесс формирования ледяного поля и последующий процесс метаморфизма.

Согласно экспериментальным данным (рис. 3), длина стоячей волны $\lambda \approx 6$ м, а рассчитанные значения её фазовой скорости распространения в моделированном льде вдоль ледяного поля и частоты соответственно равны 0,04 м/с и 0,008 Гц. Изменение амплитуды твёрдости льда в продольном профиле достигает 230%. Сопоставляя величины эффекта влияния стоячих изгибных волн на прочностную характеристику льда, можно отметить, что это влияние оценивается от 40% в первой серии экспериментов до 230–360% в последующих сериях экспериментов.

Эффективные размеры подвижных элементов структуры моделированного льда определялись по данным измерений параметров акустической эмиссии [10]. Первый максимум в акустическом спектре контактного разрушения моделированного льда при пенетрации наблюдается на частоте $f_1 = 2,7$ Гц, второй — на $f_2 = 2830$ Гц.

Для установления связи между упругими и инерционными свойствами льда было использовано точное решение дифференциального уравнения (модель гармонического осциллятора). Связь между микрои макросвойствами льда устанавливалась с помощью линейной модели, состоящей из n (двух или более) идентичных материальных точек, обладающих одинаковой массой m и соединённых упругими связями, имеющими одинаковую жёсткость k [2]. Верификация модели в рабочем диапазоне от 2 Гц до 20 кГц устанавливалась сопоставлением значений рассчитанных эффективных размеров осцилляторов с экспериментально определёнными размерами кристаллов льда.

Эффективные размеры *R* элементов текстуры определялись по формуле [2]

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

Подставляя в уравнение (2) значения величин плотности кристаллической решётки льда $\rho = 916,8 \text{ кг/m}^3$, жёсткости связи k = 56 H/m и частоты для первого $f_1 = 2,7$ Гц и последующего максимума $f_2 = 2616$ Гц, получаем значения радиусов характерных размеров текстуры ледяного поля $R_1 = 26 \text{ мм}$ и $R_2 = 0,25 \text{ мм}$. Рассчитанные таким образом размеры совпадают с толщиной ледяного поля (52 мм) и диаметром (~0,5 мм) ледяных гранул, которые образуются при замерзании распыляемой воды в переохлаждённой атмосфере ледового бассейна.

Таким образом, установлено, что в частично закрытом бассейне прямоугольной в плане формы с вертикальными стенками под действием стоячих и изгибно-гравитационных волн формируется гранулированный лёд с текстурой, прочностные характеристики которой случайно осциллируют в пространстве ледового поля. Оцениваемые по твёрдости льда осцилляции прочности составляют от 40 до 230— 360%. Это влияние необходимо учитывать при проведении и обработке результатов испытаний моделей судов и морских сооружений в ледовых бассейнах.

Можно ожидать, что в условиях естественного залегания наличие волнения может оказывать сильное влияние на формирование текстуры льда, а следовательно, и на его прочностные свойства. Так, потепление климата и обусловленное им таяние льдов в Арктике привели к тому, что в российском секторе Арктики более 90% арктического льда — однолетний лёд. В связи с этим возникает вопрос о прочностных свойствах ледяного поля динамического типа формирования, особенно такого, который образуется при снегопаде при слабых волнениях водной поверхности. В течение всего периода своего формирования и существования лёд подвергается воздействию различных физических и механических факторов, приводящих к изменению его текстуры и прочностных характеристик. Эти факторы и оказываемые ими воздействия на лёд ещё далеко не достаточно изучены. Формирование периодических текстур является ключевым вопросом в проблеме установления теоретической связи текстуры материалов с их макроскопическими характеристиками. Изучение периодических текстур уже сегодня представляет практический интерес для определения ледовых нагрузок, а также для разработки эффективных технологий проектирования корпусов ледоколов и судов ледового плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Епифанов В.П.* Разрушение поликристаллического льда // ДАН. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.
- 2. *Епифанов В.П.* Физическое моделирование режимов движения ледников // Лёд и снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 333–344.
- 3. *Епифанов В.П.* Влияние промежуточного слоя на прочность соединения льда с подложкой // ДАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 27–32.
- 4. *Епифанов В.П.* Влияние импульсов напряжений на структуру льда в промежуточном слое // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 629–633.
- 5. *Калиниченко В.А., Нестеров С.В., Со А.Н.* Стоячие волны в прямоугольном сосуде с локальными нерегулярностями стенок и дна // Известия РАН. МЖГ. 2017. № 2. С. 65–74.
- 6. *Стурова И.В.* Дифракция поверхностных волн на упругой плавающей на мелководье платформе // Прикладная математика и механика. 2001. Т. 65. № 1. С. 114–122.
- Смирнов В.Н. Упругие изгибные волны в ледяном покрове // Труды ААНИИ. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. Т. 331. С. 133–140.
- Козин В.М. и др. Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров распространяющихся в плавающей пластине изгибногравитационных волн от условий возбуждения: Монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 222 с.
- 9. Епифанов В.П., Сазонов К.Е., Лопашов К.А. Спектры акустической эмиссии при испытаниях моделей в ледовом бассейне // Тр. Крыловского гос. научн. центра. Крыловский гос. научн. центр. 2015. № 88 (372). С. 319–330.
- 10. *Епифанов В.П.* Влияние естественных факторов на морфологию снежного покрова // Вестн. Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 155–162.
- Хейсин Д.Е. К задаче упруго-пластического изгиба ледяного покрова // Тр. ААНИИ. М.-Л.: Транспорт, 1964. Т. 267. С. 143–149.

EFFECT OF STANDING WAVES ON THE LOCAL STRENGTH OF MODELED ICE FIELD V. P. Epifanov¹, K. E. Sazonov²

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation ²Krylov State Research Center, Saint-Peterburg, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS V.F. Zhuravlev July 26, 2019

Received July 26, 2019

Two scenarios of the influence of standing waves on the strength properties of ice lying on the surface of the liquid are considered: in the process of freezing the ice field and as a result of instability, which is caused by compression on the pool walls due to the expansion of water during freezing. The obtained experimental hardness profiles of the ice field indicate the formation of periodic structures characteristic of the wave process. It is shown that in both cases the standing waves arising in the basin change the strength characteristics of the ice cover.

Keywords: ice, strength, hardness, standing waves, modeling.