ЛИТЕРАТУРА

1. *М. А. Исакович, И. А. Чабан.* Распространение волн в сильновязких жидкостях. ЖЭТФ, 1966, *50*, *5*, 1343–1362.
2. *И. Г. Михайлов, С. Г. Гуревич.* Поглощение и дисперсия ультразвуковых волн в некоторых очень вязких жидкостях и аморфных твердых телах. ЖЭТФ, 1949, *19*, 3, 193–201.
3. *М. В. Бессонов.* Измерение скорости и поглощения ультразвука в расплавах при высоких температурах. Применение ультраакустики к исследованию вещества, вып. VIII, М., Изд-во МОПИ, 1959, 137–146.
4. *В. Н. Богданов, И. Г. Михайлов.* Исследование расплавов стекол. Матер. II Всес. конф. по вопросам методики и техники ультразвуковой спектроскопии, Каунас, 1973, 325–328.
5. *Б. А. Белинский, Л. М. Лазаренко.* Авт. свид. № 448381, Бюлл. изобр. № 40, 1974.

Московский областной педагогический
институт им. Н. К. Крупской

Поступила
4 июля 1974 г.

УДК 534.286.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ВО ЛЬДАХ БЕРИНГОВА МОРЯ

В. В. Богородский, В. П. Гаврило, А. В. Гусев, В. А. Никитин

Решение ряда практических задач, таких, как разработка акустических методов измерения толщины льдов, поиск рыбы через лед, измерение глубины водоемов, покрытых льдом, расчет несущей способности ледяного покрова и т. д. невозможно без детального изучения механических характеристик льда. На наш взгляд, наиболее приемлемым методом исследования механических параметров ледяного покрова в полевых условиях является импульсный ультразвуковой метод. Его сущность и преимущества перед другими методами подробно изложены в работах [1, 2]. Необходимо лишь отметить, что он, пожалуй, является единственным, с помощью которого можно проследить распределение модулей упругости по толщине ледового покрова, а также исследовать молодые, недавно образовавшиеся льды.

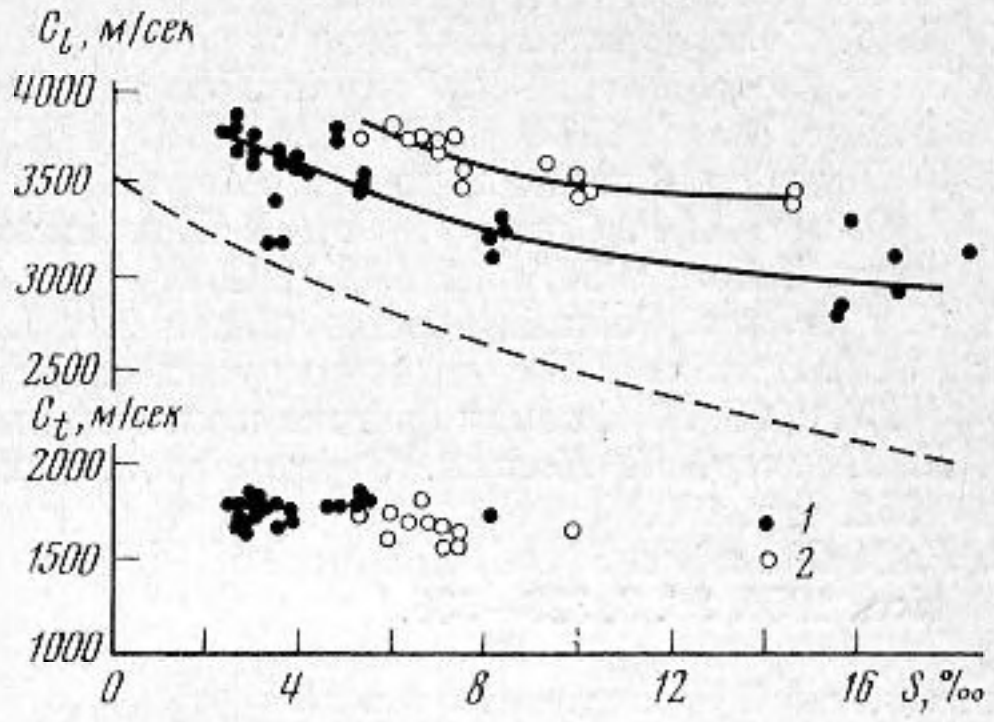
Исследованию механических характеристик морских льдов Арктического бассейна акустическим методом посвящены работы [3, 4]. Автор работы [3] уделил основное внимание получению температурных зависимостей скоростей продольных и сдвиговых колебаний, модулей Юнга и сдвига для различных слоев дрейфующих льдов, что необходимо для изучения распределения модулей упругости по толщине ледяного покрова их сезонных изменений. Паундер и Ланглебен [4] пытались получить эмпирическую формулу, связывающую модуль Юнга с соленостью льда, однако предложенная ими формула не была подтверждена дальнейшими исследованиями [5]. Кроме того, имеются работы [6–8], посвященные исследованию характеристик упругости морских льдов с помощью сейсмоакустического метода. Однако этот метод дает усредненные по толщине льда данные и не позволяет однозначно судить о влиянии тех или иных параметров льда на его механические свойства.

Во время проведения советско-американского эксперимента «Беринг» (февраль – март 1973 г.) были выполнены исследования механических характеристик морских льдов импульсным ультразвуковым методом. Специфика ледовых условий в Беринговом море в период проведения опытов, заключающаяся в наличии морских льдов различных возрастных стадий (от ниласа до белого), позволила провести исследования в широком диапазоне изменения солености и плотности льда и основное внимание уделить влиянию этих физических параметров на скорость распространения в нем ультразвуковых волн.

В качестве основной измерительной аппаратуры мы использовали ультразвуковой измеритель скорости (УЗИС-ЛЭТИ), предназначенный для измерения скорости продольных и сдвиговых волн во льду. Рабочая частота прибора составляла 1,67 *Мгц*, точность измерений – 0,5–1,5%. Необходимо отметить, что точность измерения скорости сдвиговых волн была, по-видимому, хуже вышеназванной. Это вызвано тем обстоятельством, что сдвиговые волны с трудом возбуждались во льдах высокой солености в температурном интервале от –1 до –10° С, в связи с чем не всегда четко фиксировалась первая полуволна прошедшего через образец импульса из-за недостаточного превышения уровня сигнала над собственными шумами измерительного тракта.

Исследования проводились на образцах, извлекаемых кольцевым буром из ледяного покрова. Параллельно определялись плотность и соленость образцов льда, контролировалась их температура.

Результаты измерений скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в зависимости от солености льда представлены на фигуре. Каждая нанесенная точка представляет собой среднее из трех измерений на одном и том же образце. Скорость продольных волн C_l уменьшается с увеличением солености и возрастает с понижением температуры, причем кривые, проведенные по экспериментальным точкам при разных температурах, практически параллельны.



Зависимость скорости распространения продольной C_l и сдвиговой C_t волн от солености льда при температурах $-5 - -8°$ С (*1*) и $-11 - -13°$ С (*2*)

Для объяснения хода кривых и оценки влияния физических параметров (плотность или пористость, соленость, температура) на скорость упругих волн обратимся к некоторым выводам работы [9]. Из этой работы следует, что на скорость распространения упругих волн существенное влияние оказывает пористость материала. Если рассматривать лед как двухкомпонентную пористую структуру со скелетом из кристаллов льда и с порами, заполненными водой, т. е. не учитывать объем воздушных включений, то под пористостью льда следует понимать отношение объема жидкой фазы ко всему объему. В этом случае пористость льда (или плотность как величина, обратная пористости) и его соленость, которая определяется содержанием жидкой фазы – рассола, будут линейно связаны между собой. Штриховой линией на фигуре изображены результаты расчета скорости продольных волн по методу, предложенному в работе [10] для пористых сред. При этом использовалась модель, состоящая из жесткого остова, обладающего значением модуля Юнга присущего льду, и пор, заполненных морской водой, для которой с высокой степенью точности известны плотность и скорость звука. Расчет выполнялся для температуры $-1{,}8°$.

Хотя пренебрежение сдвиговой упругостью остова не является строго обоснованным, однако удовлетворительное совпадение хода экспериментальных и расчетной кривых до значений солености 8–9‰ и сравнительно небольшое отличие их абсолютных значений (~10%), следующее из приведения к одинаковой температуре с помощью известных экспериментальных температурных зависимостей скорости продольных волн во льде, может свидетельствовать о том, что наиболее существенное влияние на скорость продольных волн во льде оказывает наличие в нем жидкой фазы, значительно меньше влияние воздушных включений.

Отклонение от параллельности экспериментальных и расчетной кривых при солености >10‰ может быть связано с усилением стекания рассола во время измерений.

Экспериментальные кривые дают также возможность проследить влияние температуры на скорость распространения ультразвука. Понижение температуры с $-5 - -8°$ С до $-11 - -13°$ С привело к увеличение скорости продольных волн в среднем на 12%. Этот результат хорошо согласуется с температурными зависимостями, полученными для дрейфующих льдов [3]. Скорость сдвиговых волн C_t (см. фигуру) практически не зависит от солености (при соленостях льда >10‰ эти волны возбудить в образцах не удалось) и температуры в том диапазоне ее изменения, в которой наблюдался во время опытов. Этот результат, по-видимому, может быть объяснен спецификой распространения данного типа колебаний в пористых средах. В отличие от продольной волны, связанной с изменением объема (отсюда влияние заполнения пор жидкой фазой), сдвиговая волна вызывает изменение формы тела, поэтому основное влияние на ее скорость должно оказывать состояние остова, т. е. его жесткость (или упругость), а не состояние заполнителя пор. При значительном понижении температуры обычно наблюдается увеличение значений C_l (правда, в небольших пределах), что может быть связано с возрастанием упругости остова.

На основании полученных значений скоростей ультразвука в образцах льда можно легко вычислить коэффициенты Пуассона, модули Юнга и сдвига.

В заключение следует отметить, что данная работа представляет лишь первый этап изучения морских льдов разных возрастных стадий. Возникает необходимость дальнейших исследований ледяного покрова в широком диапазоне изменения его солености и плотности и в значительном интервале изменения температур (например, в термостате) для получения эмпирических формул, связывающих физические параметры льда и характеристики его упругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В. В. Богородский.* Импульсный ультразвуковой метод исследования физических свойств льдов. Тр. семинара по физике и применению ультразвука. ЛЭТИ, 1958, стр. 76–86.
2. *В. В. Богородский, А. В. Гусев, Г. П. Хохлов.* Физика пресноводного льда. Л., Гидрометеоиздат, 1971, стр. 227.
3. *В. В. Богородский.* Упругие характеристики льда. Акуст. ж., 1958, *4*, 1, 19–23.
4. *M. P. Langleben, E. R. Pounder.* Ice and Snow, ed. W. D. Kingery, M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1963, p. 69–78.
5. *Э. Паундер.* Физика льда. М., «Мир», 1967, стр. 189.
6. *J. Oliver, A. P. Crary, R. Cottell.* Elastic waves in arctic pack ice. Trans. Amer. Geophys. Union, 1954, *35*, 2, 282–292.
7. *K. Hunkins.* Seismic studies of sea ice. J. Geophys. Res., 1960, *65*, 10, 3459–3472.
8. *Е. М. Линьков.* Изучение упругих свойств ледяного покрова в Арктике. Вестник ЛГУ, 1958, № 4, серия физика и химия, вып. 1, 17–22.
9. *К. Цвикер, К. Костен.* Звукопоглощающие материалы, М., Изд-во иностр. лит., 1952, стр. 160.
10. *P. L. Chambre.* Speed of Sound of Plane Wave in Gross Mixture. J. Acoust. Soc. America, 1954, *26*, 3, 329–336.

Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт

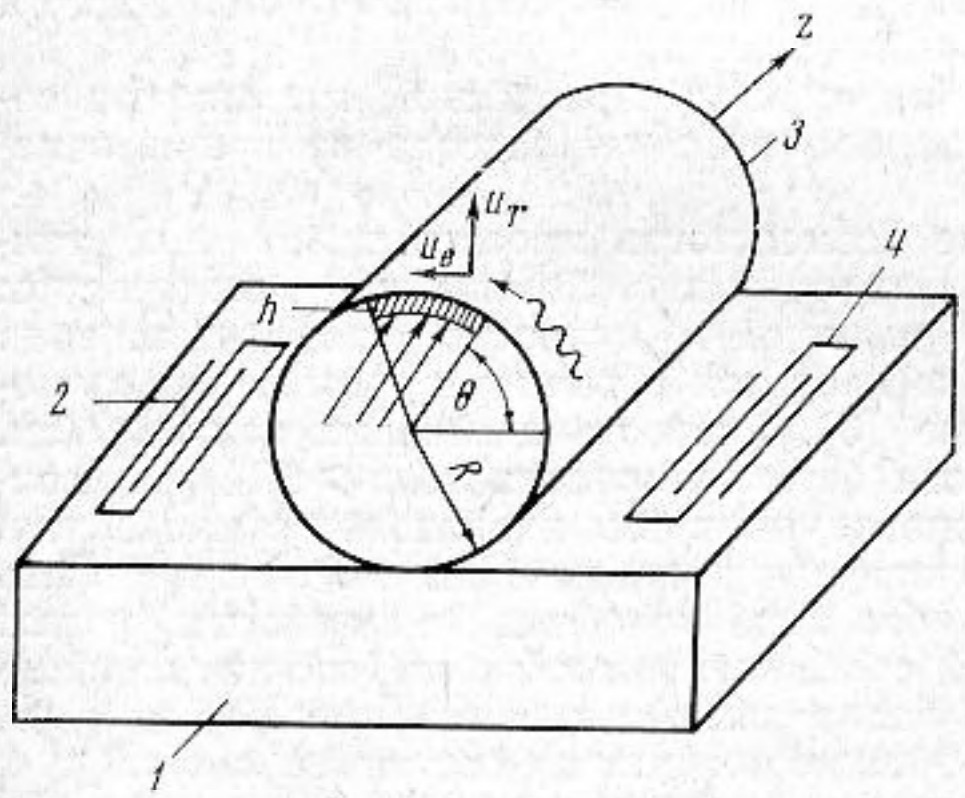
Поступила
1 октября 1973 г.
После исправления
20 мая 1974 г.

УДК 534.231.1:548

О ВОЛНАХ РЭЛЕЕВСКОГО ТИПА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА СУЛЬФИДА КАДМИЯ

В. И. Васькова, И. А. Викторов, И. М. Сильвестрова, А. А. Талашев

В работе [1] теоретически показано, что на цилиндрических поверхностях кристаллов, обладающих плоскостью поперечной изотропии (например, в кристаллах структуры вюрцита – CdS, CdSe, ZnO, ZnS и др.), существуют точные решения уравнений упругости, имеющие вид бегущих по θ (где θ – угловая цилиндрическая координата) волн рэлеевского типа. Цель настоящей работы – экспериментальное подтверждение возможности существования таких волн на выпуклой цилиндрической поверхности кристалла CdS.



Фиг. 1. Схема акустической части экспериментальной установки

На фиг. 1 изображена акустическая часть экспериментальной установки. На плоской поверхности кристалла *1* CdS с помощью системы гребенчатых электродов *2* возбуждался импульс рэлеевских волн прямоугольной формы с длительностью 3 *мксек* и частотой заполнения 2,7 *Мгц*. К кристаллу *1* с помощью тонкого слоя салола приклеивался цилиндр *3* из сульфида кадмия диаметром 8,5 и длиной 7 *мм*. Ось *z* цилиндра была параллельна гексагональной оси кристалла. Оба кристалла были изготовлены в ВНИИМонокристаллов методом, описанным в работе [2]. Плоские и цилиндрические поверхности кристаллических образцов были оптически полированными, а торцы цилиндра были параллельны с точностью не хуже 30′.

Рэлеевская волна, распространяясь через границу кристаллов *1*, *3*, частично трансформировалась в волну рэлеевского типа на цилиндре (с компонентами смещений U_r, U_θ), которая неоднократно обегала цилиндр, а на границе каждый раз частично трансформировалась в рэлеевскую волну на плоской поверхности. Импульсы рэлеевских волн, прошедшие «на прямую» и после пробегов по цилиндру регистрировались приемной системой электродов *4*. Кроме того, волна на цилиндре регистрировалась еще методом дифракции света. Поляризованный в вертикальной плоскости