АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XV 1969 Вып. 2

УДК 534.222

О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМАХ ЗВУКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ЛЬДА В ЖИДКОСТИ

В. В. Богородский, В. П. Гаврило, В. С. Григорьев, А. В. Гусев

Анализируются спектральные характеристики звуков, возникающих в водной среде при разрушении льда, рассматриваемого как твердое тело с большим диапазоном изменений физико-механических свойств, в основном определяемых температурой, структурой и соленостью. Выдвигаются предположения о механизме возникновения звукового поля в воде при разрушении льда.

Разрушение льда, покрывающего поверхности естественных водоемов, при взаимодействии плавающего льда с неподвижным льдом, с берегом, различными гидротехническими сооружениями и т. п. представляет собой весьма сложный динамический процесс. Многочисленные наблюдения показывают, что из этого сложного явления можно выделить такие частные процессы, как образование динамических и термических трещин во льду, раздавливание отдельных обломков, трение льда о лед и тому подобное.

Определенные стороны этих явлений могут изучаться акустическими методами. Действительно, нарушение сплошности твердых тел всегда сопровождается возникновением звука в окружающей среде. Интенсивность, временные и спектральные характеристики звука, возникающего при разрушении льда, принципиально позволяют делать суждения о деталях физического процесса разрушения. Для этого, однако, необходимо изучать связь процесса разрушения с возникающими при этом звуковыми явлениями.

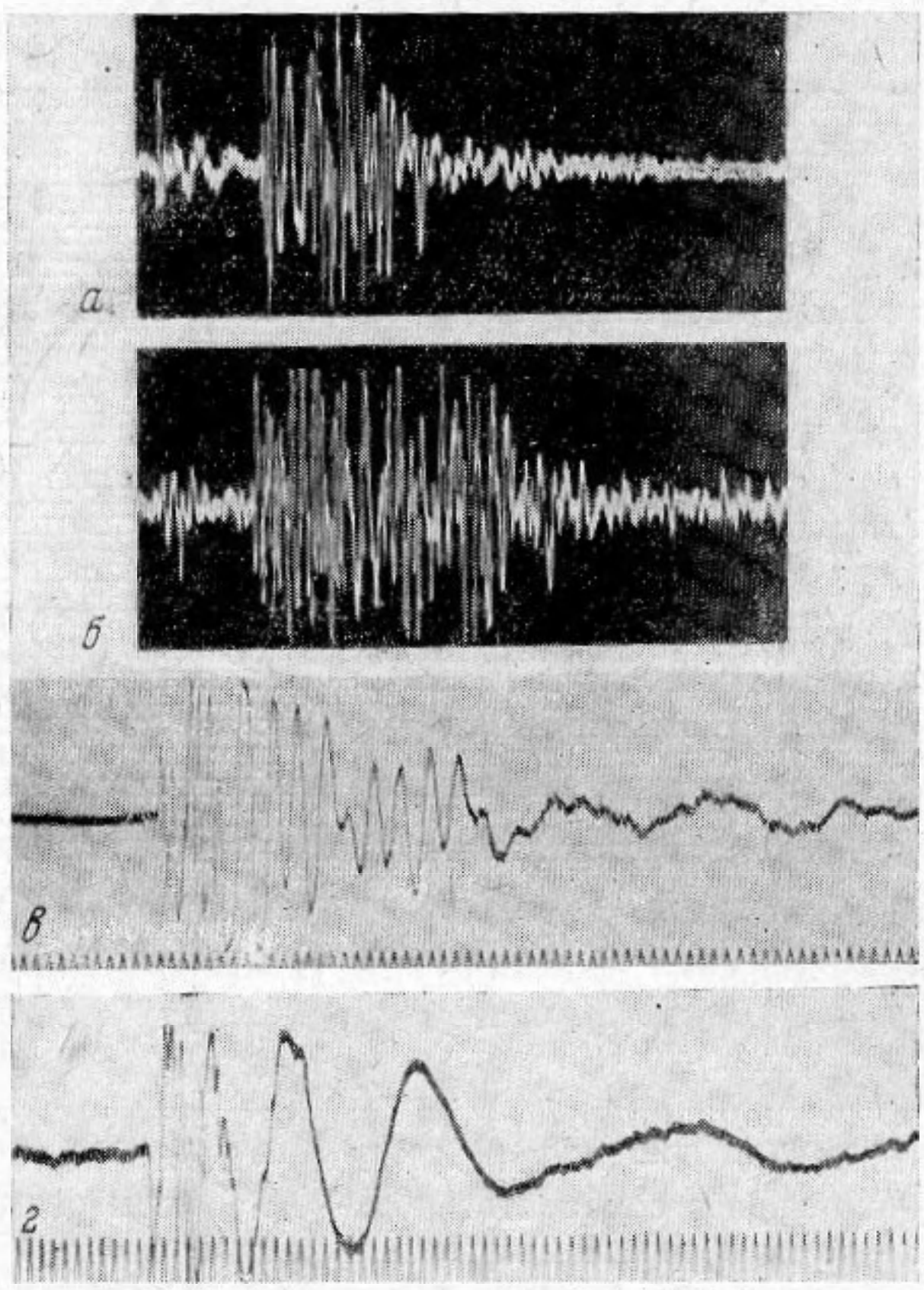
Сложный комплексный характер естественного разрушения льда и некоторые трудности проведения натурных исследований привели авторов данной работы к выводу о целесообразности постановки лабораторных и полунатурных экспериментов, в которых бы воспроизводились явления, аналогичные наблюдаемым в природе. При этих опытах исследовались шумы, возникающие при искусственном разрушении образцов льда, шумы трения образцов льда и шумы при образовании термических трещин в образцах. Эти процессы наиболее легко воспроизводятся и позволяют вместе с тем изменять параметры разрушаемого материала (льда) в широком диапазоне изменения его механических свойств.

Эксперименты проводились в естественных водоемах и в бассейне холодильной камеры. При полевых опытах из ледового покрова изготовлялись образцы определенных размеров и форм, которые разрушались в воде приспособленным для этого гидравлическим прессом; разрушались кубические и цилиндрические образцы объемом 200 *см*^{3}. Для разлома на опорах изготовлялись стержни длиной 0,5—1,0 *м* с сечением 10—50 *см*^{2}.

Для исследования спектров шумов трения по ледяному покрову толщиной 35 *см* протаскивались ледяные брусья размерами 35 × 35 × 200 *см*; размеры неровностей трущихся поверхностей не превышали 0,5 *см*. Ско-

рость протяжки на активном участке длиною 10 *м* поддерживалась постоянной в пределах 0,5—1,0 *м/сек*. Температура воздуха во время экспериментов была $-3 \div -5°$.

Шумы, обусловленные появлением термических трещин во льду, создавались искусственно: образцы льда объемом $(5 \div 8)\ 10^3$ *см*^{3}, охлажденные до температуры $-20°$ опускались в воду. Вследствие резкого перепада температур лед растрескивался, создавая специфический импульсный шум.



Фиг. 1

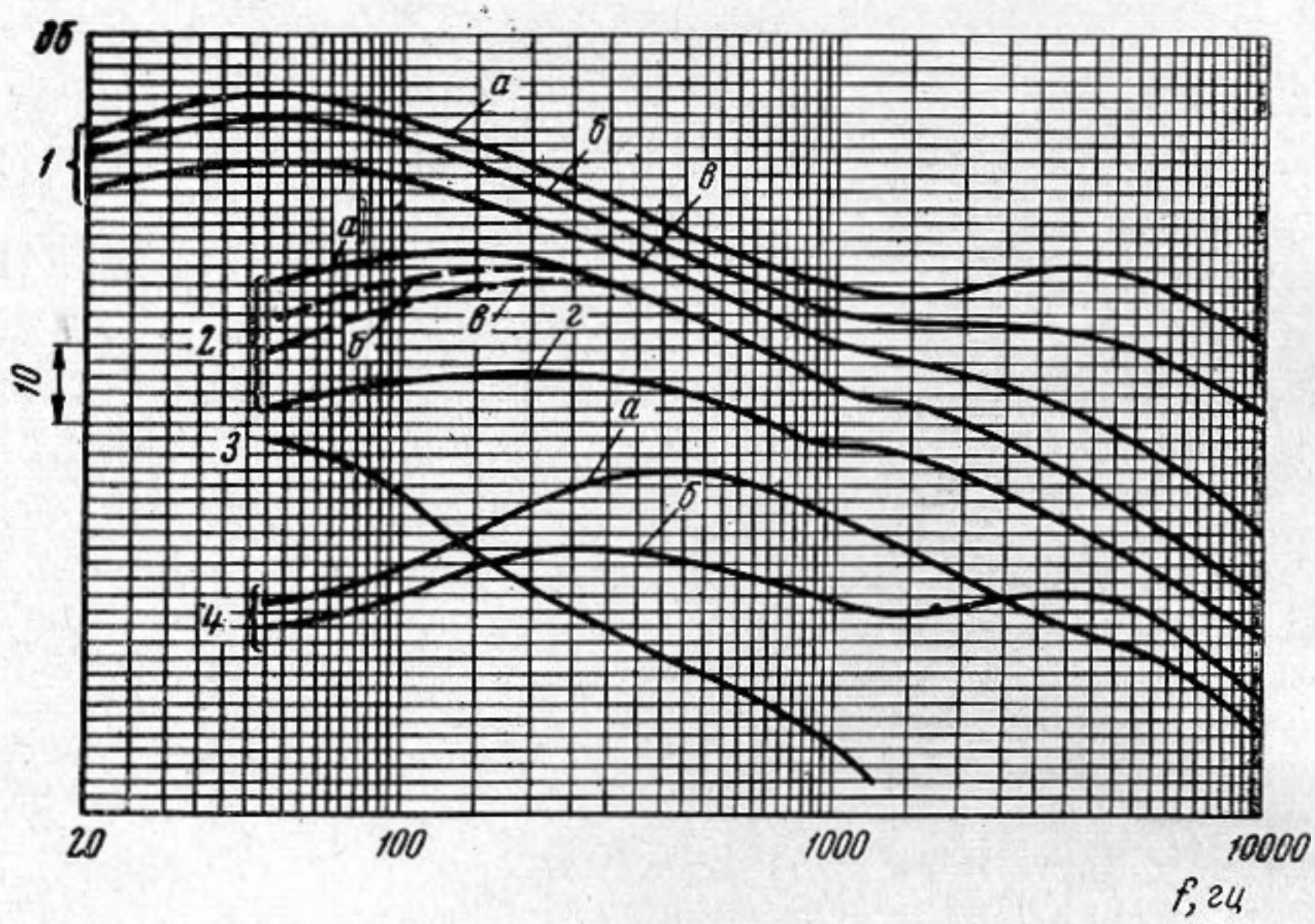
Во всех случаях звуковые сигналы записывались калиброванным гидроакустическим приемным трактом на магнитофонную ленту для последующего спектрального и временного анализа в звуковом диапазоне частот.

Сигналы в основном представляли собой импульсы различных амплитуд и длительностей. Из осциллограмм, приведенных на фиг. 1 видно, что импульсы, возникающие в результате искусственного разрушения льда представляют собой затухающие сигналы, длительность которых составляет десятые — сотые доли секунды; временные отметки на осциллограммах соответствуют частоте 500 *гц*. Для образцов из пресноводного льда при раздавливании их прессом (*а*) среднее значение длительности импульсов $\tau_{ср}$ составляет $0{,}19 \pm 0{,}05$ *сек* для образцов, приготовленных из соленой воды, $\tau_{ср} = 0{,}21 \pm 0{,}06$ *сек* (*б*). Для разлома стержней (*в*) и возникновения термических трещин (*г*) характерны импульсы с длительностью $\tau_{ср} = 0{,}08 \div 0{,}13$ *сек*. Напряжения, возникающие в образцах льда, контролировались по показаниям манометра пресса или, при разломе стержней, динамометра.

Результаты спектрального анализа описанных сигналов приведены на фиг. 2. Спектральные характеристики построены путем усреднения десятков частных спектров, полученных для однократных импульсов. По оси

ординат отложены значения спектральной плотности в децибелах; условный начальный уровень шкалы децибел одинаков для всех кривых.

На фигуре цифрами *1—4* обозначены спектры шума, возникающего в следующих случаях: *1* — при раздавливании прессом образцов: *а* — из пресного льда при разрушающем напряжении на сжатие $\sigma_{вр} = 100—120$; *б* — из пресного или соленого льда при $\sigma_{вр} = 70—80$; *в* — из льда, насыщенного рассолом, при $\sigma_{вр} = 40—50$ *кг/см²*; *2* — при разломе погруженных в воду стержней из льда, путем приложения силы, превышающей раз-



Фиг. 2

рушающее напряжение на изгиб. Размеры стержней из пресноводного льда: *а* — 10 × 10 × 90; *б* — 5 × 10 × 60, *в* — 2,5 × 2,5 × 30; спектр *г* относится к случаю льда с соленостью 0,5—0,8% при размерах образца 8 × 8 × 90 *см*; *3* — при образовании термических трещин; *4* — при трении образца льда: *а* — о влажный ледяной покров; *б* — о заснеженный ледяной покров (толщина слоя свежевыпавшего снега была не больше 1—1,5 *см*).

Из рассмотрения спектров первой группы следует, что при общем спаде 6—8 *дб/окт* устойчиво наблюдаются плавные максимумы (1, *а* и 1, *б*). На частотах 4 *кгц* и выше соответственные превышения достигают 6 и 12 *дб* для образцов с $\sigma_{вр}$, равными соответственно 80 и 120 *кг/см²*. На спектрах для образцов, насыщенных рассолом, как правило, таких максимумов не обнаруживается.

В спектрах импульсов при изломе стержней из пресного льда различных размеров при температуре —5° обнаруживаются максимумы на частотах в пределах 150—250 *гц* (2, *а*, *б* и *в*). При разломе стержней из соленого, более пластичного, льда при температуре —1° интенсивность звука значительно меньше и характерен более гладкий спектр (2, *г*). Спектр импульсов, возникающих при термическом разрушении льда, характеризуется быстрым спаданием спектральной плотности с частотой (10—11 *дб/окт*) (*3*).

Максимальное значение спектральной плотности звуковой энергии шумов, возникающих при трении сухого льда (*4*, *а*), лежит в области частот 200—1000 *гц*. При трении льда о лед при наличии снежной прослойки (*4*, *б*) в спектрах шумов наблюдается второй максимум, лежащий в диапазоне частот 4—5 *кгц*.

Анализ проведенных экспериментальных материалов позволяет сделать некоторые предположения о механизме звукообразования при разрушении

льда. Прежде всего, отчетливо выраженный импульсный характер наблюдаемых звуков в совокупности с общим характером спадания спектральной плотности с частотой показывает, что при разрушении льда могут иметь место кавитационные явления. Эти кавитационные явления могут быть принципиально двух видов: гидродинамическая кавитация, возникающая при разлете обломков, и своеобразная кавитация особого вида — возникновение полостей при разрыве или изломе образца. С другой стороны, наличие в спектрах отчетливо выраженных, хотя и расплывчатых максимумов может указывать на непосредственное излучение звука обломками льда, колеблющимися с присущими им собственными частотами.

В пользу предположения о наличии гидродинамической кавитации при разрушении льда в реальных условиях говорят следующие соображения.

Прежде всего, лед всегда содержит воздушные, а соленый лед также и солевые, включения, высвобождающиеся при разрушении льда. Поэтому в водной среде, в которой движутся обломки разрушающегося льда, несомненно существует большое число потенциальных зародышей кавитации. Вместе с тем, кавитационная прочность как пресной так и морской воды при низких температурах существенно понижается [1, 2]. Наконец, следует заметить, что в естественных условиях, например при торошении льда, последний увлекает за собой в водную среду снег, в котором в среднем содержится до 50% воздуха.

Однако для суждения о реальной возможности возникновения гидродинамической кавитации необходимо иметь сведения о действительных скоростях разлета обломков льда при его разрушении. Осуществить необходимые для этого эксперименты в натуральных условиях весьма затруднительно; поэтому нами были проведены опыты в лабораторных условиях. Образцы льда в форме кубов с ребрами, равными 10 *см*, помещались в прозрачную кювету с охлажденной водой. При разрушении образца прессом производилась киносъемка со скоростью 1000 *кадр/сек*. Одновременно регистрировались возникающие при этом звуковые процессы. Анализ таких кинограмм показал, что скорости разлета отдельных обломков льда зависят от размеров образца, а также его упругости и прочности и достигают десятков метров в секунду. В начальном интервале времени от 0,005 до 0,05 *сек* зарегистрированы скорости до 22 *м/сек*. Можно было также приближенно оценить скорость распространения трещин во льду. Оказалось, в условиях эксперимента она лежит в пределах 50—100 *м/сек*. Интегральное звуковое давление, измеренное на расстоянии 10—15 *см* от образца, составляло при его разрушении 500 ÷ 1500 *н/м*^{2}. Аналогичные лабораторные эксперименты, проведенные путем излома стержневых образцов льда, показали, что и в этом случае скорость перемещения обломков достигает 11 *м/сек*.

Очевидно, что при столь больших скоростях перемещения обломков льда и несомненном наличии множественных возможных центров возникновения кавитации, реально существуют условия для возникновения гидродинамической кавитации, сопровождающейся импульсным кавитационным шумом. Следует заметить, что визуальное наблюдение разрушения образца льда показывает, что этот процесс действительно сопровождается множественным возникновением всплывающих пузырьков.

Попробуем оценить с этой точки зрения особенности спектров, полученных при разрушении кубических образцов льда (группа спектров *1* на фиг. 2). Следуя Пернику [1] мы можем предположить, что наличие низкочастотного спектрального максимума в области частот 50—60 *гц* (фиг. 2, *1, а, б, в*) обусловлено процессами захлопывания кавитационных пузырьков в вихревом следе за движущимися обломками. Статистический анализ размеров обломков показал, что в среднем наиболее часто встречающиеся обломки имеют размер до 2 *см*; полагая для простоты число Струхаля равным 0,2, мы получаем при скоростях 2—20 *м/сек* струхалевскую частоту в пределах 20—200 *гц*. Таким образом, можно считать правдоподобным высказанное предположение о механизме возникновения указанного мак-

симума. Дальнейшее спадание спектральной плоскости со скоростью около 6 *дб/окт* легко объясняется обычными особенностями индивидуальных кавитационных импульсов [3].

Для объяснения максимума в области частот 3—4 *кгц* приходится сделать предположение о существенном наличии в жидкости пузырьков радиусами около 10^{-2} *см*.

В случае излома стержней размер обломков значительно больше, чем при разрушении кубического образца и скорости разлета в среднем меньше. Поэтому частоты Струхаля оказываются низкими и развиваемая концепция становится не применимой для объяснения спектрального максимума в области частот 150—250 *гц*, характерного для спектров группы *2* фиг. 2. Общее спадение спектров к высоким частотам и в данном случае можно приписать наличию кавитационных явлений; однако низкочастотный максимум в данном случае, вероятно, определяется затухающими колебательными процессами, возникающими в обломках льда при его разрушении. Поскольку главные обломки в данном случае сохраняют стержневую форму, можно оценить их собственную частоту по формуле

$$\omega = \frac{4{,}73}{l^2}\sqrt{\frac{E \cdot I}{\mu}},$$

где l — длина обломка, *см*; E — модуль упругости, *кг/см*^{2}; I — момент инерции поперечного сечения стержня относительной нейтральной оси сечения, перпендикулярной к плоскости колебаний, *см*^{4}; μ — масса единицы длин обломка, *кг·сек*^{2}*/см*^{2}. При изломе ледяных стержней длиной 100 *см* и сечением 10×10 *см*^{2} длина главных обломков при опытах составляла около 50 *см*. Полагая в приведенной формуле $E = 6 \cdot 10^7$ *г/см*^{2}, мы получаем при этих размерах обломка частоту 200 *гц*, что согласуется с частотой максимума в спектрах группы *2* фиг. 2.

Перейдем к рассмотрению гипотезы о «кавитации разлома». При сжатии ледяных полей естественный морской лед может выдерживать статические напряжения порядка нескольких десятков атмосфер. В среднем для пакового льда разрушающее напряжение при сжатии составляет около 50 *кг/см*^{2} [5]. Нарушение сплошности льда приводит к резкому снятию нагрузки, сопровождающемуся возникновением кавитационной полости разлома, а также к освобождению внутриледных газовых включений. Ориентировочный расчет в предположении, что разрываемый образец представляет собой стержень длиною 1 *м* при сечении 10×10 *см*^{2} и при разрывном усилии 100 *кг/см*^{2}, дает полость с эквивалентным радиусом около 1,5 *см*; время существования такой вакуумной полости в водной среде составляет около 0,001 *сек*. Соответственный спектральный максимум должен был бы находиться вблизи 1000 *гц*. Мы видим, что такой спектральный максимум, хотя и слабо выраженный, действительно наблюдается при изломе стержневого образца близких размеров (фиг. 2, группа спектров *2*). Таким образом, гипотеза о «кавитации разлома» имеет право на существование. Возможно, что высокочастотные максимумы на спектрах группы *1* (фиг. 2) обуславливаются подобным механизмом. Естественно, что дальнейшие уточнения приведенных соображений требуют проведения более детальных экспериментов и теоретических оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Перник. Проблемы кавитации. Л., Судпромгиз, 1966.
2. Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. Введение в нелинейную акустику. М., «Наука», 1966.
3. Г. Флинн. Физика акустической кавитации в жидкости. «Физическая акустика», под ред. У. Мэзона, т. I, ч. Б. М., «Мир», 1967.
4. И. М. Бабаков. Теория колебаний. М., «Наука», 1965.
5. Х. Р. Пейтон. Некоторые механические свойства льда. Сб. переводов «Лед и снег», М., «Мир», 1966.

Арктический и антарктический н.-и. институт
Ленинград

Поступила в редакцию
4 июля 1967 г.