АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 1, с. 61 - 64

УДК 534.222

НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ТРЕЩИНАМИ ВО ЛЬДУ

© 1996 г. А. Э. Екимов, А. В. Лебедев, Л. А. Островский, А. М. Сутин

Институт прикладной физики РАН
603600 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 02.11.94 г.

В работе приведены результаты натурных исследований нелинейных эффектов в ледовом покрытии. Экспериментально обнаружена генерация гармоник и субгармоник основной частоты вблизи трещины при гармоническом вибрационном возбуждении льда. Предложено использовать этот эффект для диагностики трещин.

Исследования вибрационных свойств льда представляют интерес для акустики Арктики и механики ледового покрытия морей. Одним из важных вопросов является трещинообразование, сопровождающееся эмиссией звука. Такое излучение вносит существенный вклад в акустические шумы Арктики [1, 2] и используется для диагностики трещин. Однако излучение звука происходит только в момент трещинообразования. Значительный интерес представляют также методы диагностики уже имеющихся трещин.

Наши работа направлена на исследование нелинейных эффектов при прохождении звука через трещину, которые могут лечь в основу нелинейных методов диагностики.

Исследования последних лет показали, что многие типы макроскопических неоднородностей и дефектов в твердых телах могут приводить к аномально высокой акустической нелинейности среды [3]. Поэтому методы диагностики, основанные на использовании нелинейных эффектов, обладают высокой чувствительностью к наличию дефектов, что может быть использовано для определения наличия трещин в ледовом покрытии.

Впервые нелинейные методы использовались для обнаружения газовых пузырьков в жидкости [6, 7], позднее – для диагностики трещин в слоистых материалах [8] и контроля прочности бетона [9]. В работе [10] обнаружено сильное возрастание параметра нелинейности стали при накоплении дефектов за счет нагружения.

Обычно в диагностических целях используются процессы генерации комбинационных частот и высших гармоник. При интенсивном возбуждении сред с трещинами наблюдался и более сложный процесс – генерация субгармоник [11, 12].

В данной работе приведены результаты натурных исследований нелинейных эффектов в ледовом покрытии, при вибрационном возбуждении.

Эксперименты были выполнены на естественном пресноводном озере с размерами порядка 100×300 м и глубиной до 5 м, толщина льда составляла приблизительно 0.4 м. Измерения проводились вблизи берега, где находилась сквозная протяженная трещина, образовавшаяся из-за проседания льда. Использовалась методика динамических испытаний льда, заключающаяся в возбуждении колебаний льда в нормальном к поверхности направлении гармоническим источником – электродинамическим вибратором. Эти колебания регистрировались в фиксированных точках приемниками вибраций (акселерометрами). Акселерометры располагались на жестких металлических штырях, забитых по нормали к поверхности льда и реагировали только на нормальную к поверхности льда компоненту вибраций. Сигналы с акселерометров регистрировались магнитофоном (Bruel&Kjer 7005) с последующей когерентной обработкой на ЭВМ. Блок-схема измерений приведена на рис. 1.

Источник последовательно размещался в двух характерных точках – вблизи трещины на расстоянии 0.2 м и на удалении от нее на расстоянии 2 м. В ходе измерений частота вибровозбудителя перестраивалась по линейному закону в полосе – от 200 Гц до 2 кГц. Скорость перестройки составляла примерно 1 Гц/с, что позволило ввести данные в ЭВМ с достаточным числом усреднений на каждой частоте при разрешении не хуже 16 Гц. При этом амплитуда силы поддерживалась постоянной для каждой серии измерений. Проводились серии измерений как для различных амплитуд возбуждения, так и для различных положений вибратора относительно трещины. Максимальная величина силы, действующей со стороны вибровозбудителя на лед, в экспериментах составляла 30 Н, минимальная – 4 Н. Для приема сигналов использовались акселерометры с широкой рабочей полосой частот (до 10 кГц), что позволило при обработке выделить не только частоту возбуждения, но и ее гармоники и субгармоники (рис. 2).

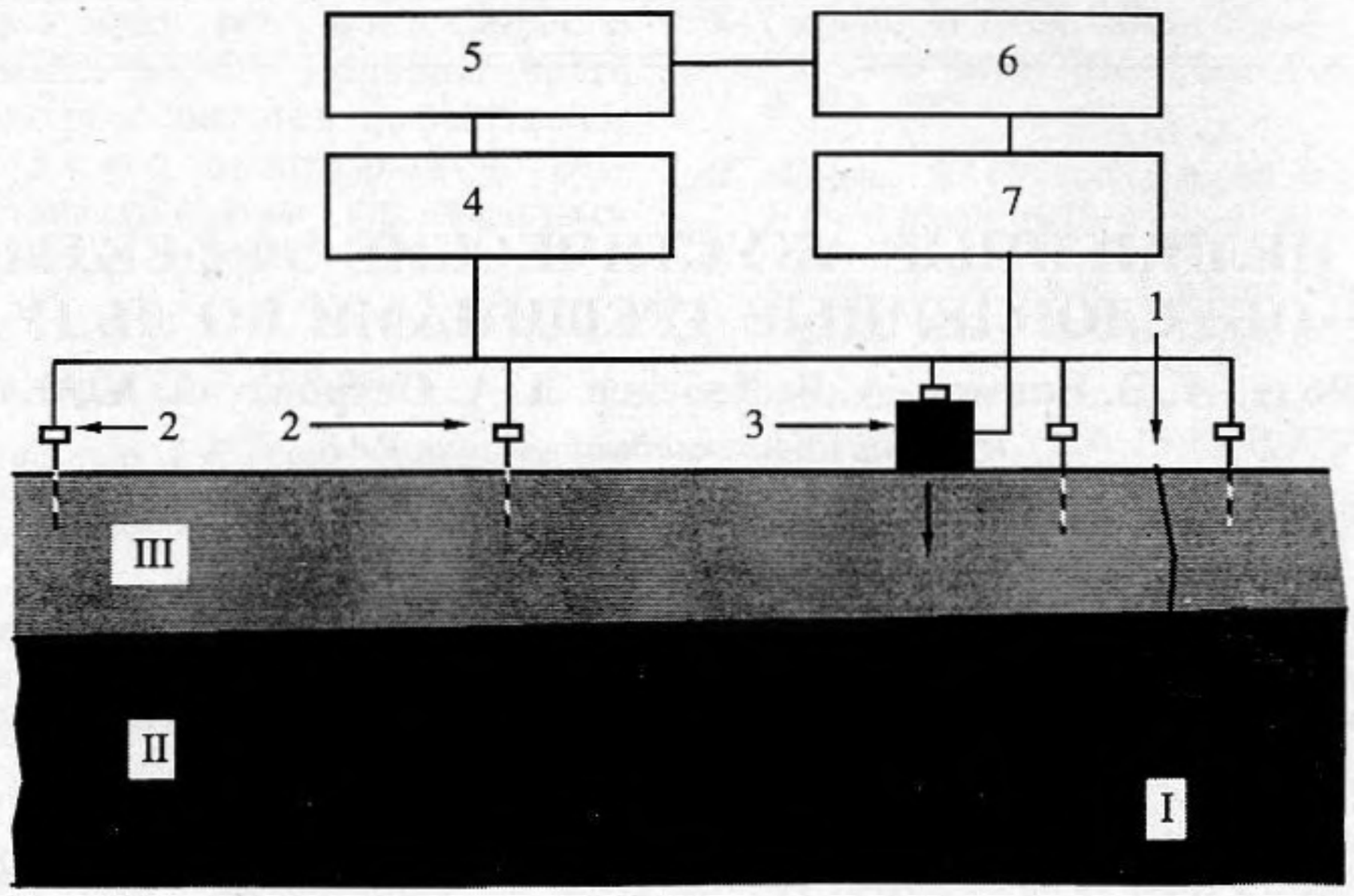

Рис. 1. Геометрия эксперимента. I – грунт, II – вода, III – лед. 1 – трещина, 2 – акселерометры, 3 – вибратор, 4 – предварительные усилители, 5 – магнитофон (Bruel&Kjer 7005), 6 – генератор (Bruel&Kjer 1047), 7 – усилитель мощности.

Один из акселерометров располагался непосредственно на вибраторе, что позволяло контролировать в процессе измерений как амплитуду, так и спектральный состав возбуждающей силы.

Проводились две серии измерений в разные дни, в первой из них температура воздуха составляла –5°С, а во второй +3°С. В первой серии лед был жестким и сухим, исследуемая трещина имела видимые границы. Во второй серии лед начал активно таять, вода выступила над его поверхностью. При этом та же трещина была покрыта слоем воды, которая заполнила трещину и частично замерзла в ней. Таким образом, сравнение результатов измерений в этих двух сериях позволяет судить о влиянии состояния трещины на нелинейные акустические эффекты.

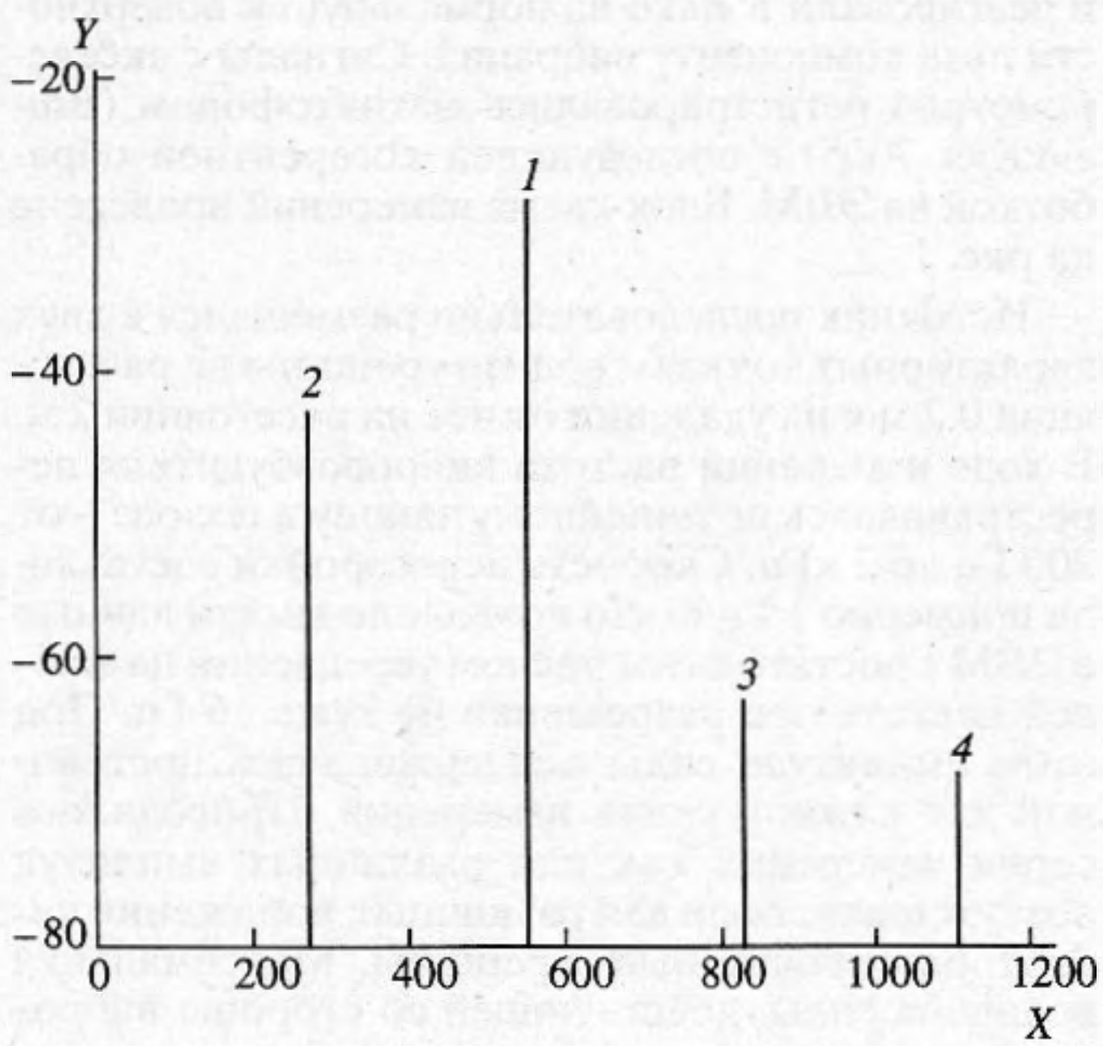

Рис. 2. Спектральный состав виброускорения вблизи от трещины при гармоническом возбуждении. *1* – вибрации на частоте возбуждения (f), *2* – на субгармонике частоты возбуждения ($f/2$), *3* – на частоте второй субгармоники ($3f/2$), *4* – на частоте гармоники ($2f$). X – частота в Гц, Y – ускорение в дБ относительно 1 мс$^{-2}$.

Приведем наиболее характерные частотные зависимости для вибраций при расположении вибратора последовательно вблизи (0.2 м) от трещины (рис. 3) и на расстоянии 2 м от нее (рис. 4). Измерения вибраций здесь производились в одной и той же точке вблизи трещины и амплитуда возбуждающей силы составляла 4 Н. По оси ординат отложен уровень ускорения, по оси абсцисс – частота основного тона. На графиках рис. 3, 4 и последующих все данные для удобства сравнения приведены к единому масштабу частоты. Это означает, что выбраны следующие масштабные коэффициенты: 1 – для основной частоты (f), 2 – для субгармоники ($2f$), 1/2 – для гармоники ($f/2$) и 2/3 – для второй субгармоники ($2f/3$).

Следует отметить высокий уровень генерируемой субгармоники в широкой полосе частот (на 5 - 10 дБ ниже уровня вибраций на частоте возбуждения). При расположении вибратора вдали от трещины нелинейных искажений практически не наблюдалось (рис. 4). Заметим, что расстояние между точкой возбуждения и приема одинаково. Таким образом, можно предположить, что причиной генерации субгармоник, гармоник и частоты 3/2 от основной является наличие трещины.

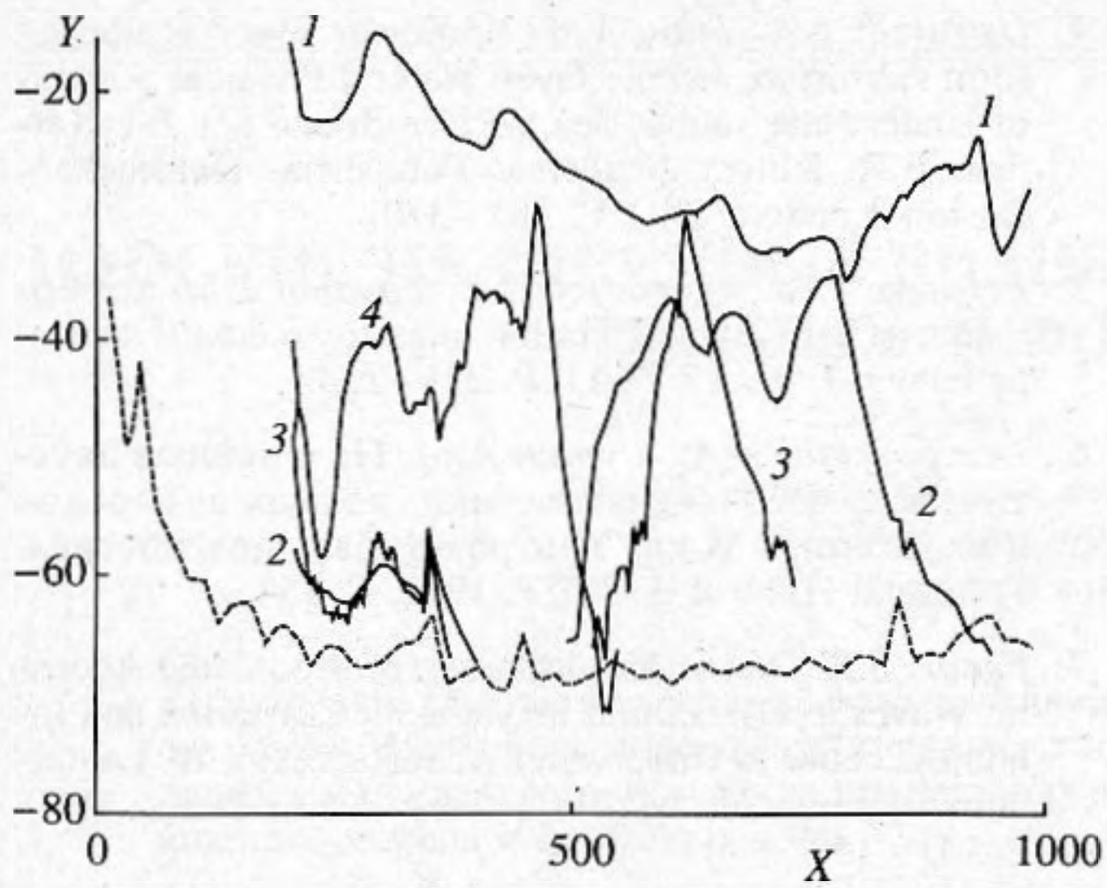

Рис. 3. Амплитудно-частотная зависимость виброускорения при возбуждении перестраиваемым по частоте вибровозбудителем, расположенным вблизи от трещины. Температура воздуха −5°С. *1* – вибрации на частоте возбуждения (f), *2* – на субгармонике частоты возбуждения ($f/2$), *3* – на частоте второй субгармоники ($3f/2$), *4* – на частоте гармоники ($2f$), пунктир соответствует уровню шумов. X – частота в Гц, Y – ускорение в дБ относительно 1 мс$^{-2}$.

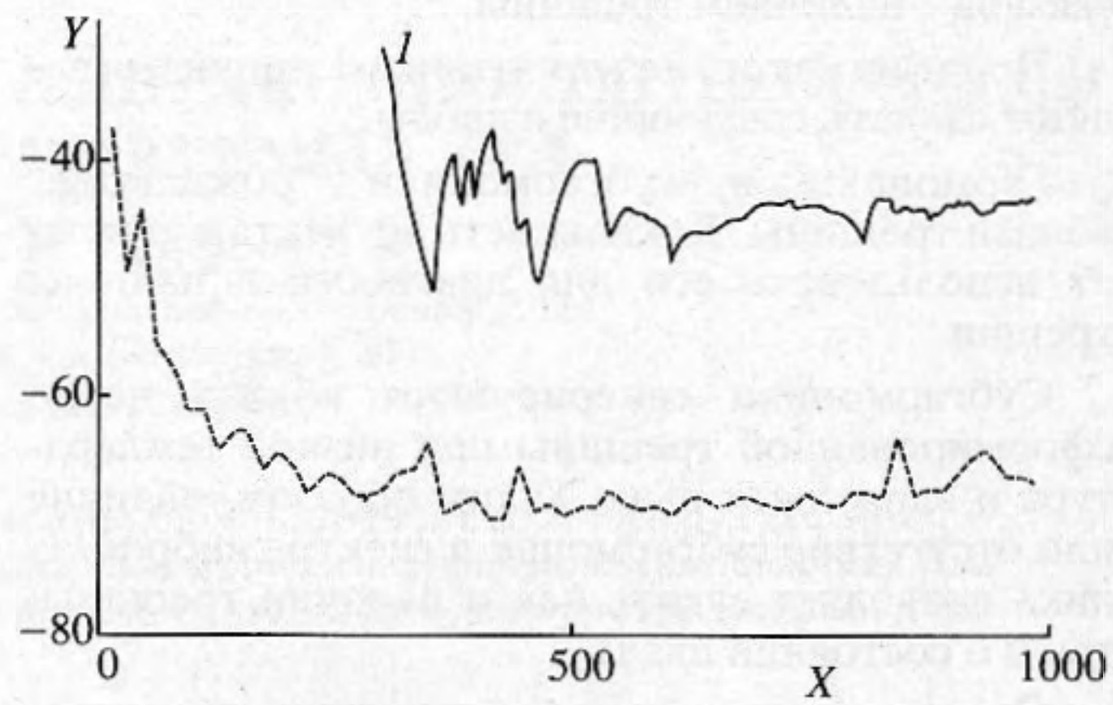

Рис. 4. Амплитудно-частотная зависимость виброускорения при возбуждении перестраиваемым по частоте вибровозбудителем, расположенным на удалении 2 м от трещины. Температура воздуха −5°С. *1* – вибрации на частоте возбуждения (f), *2* – на субгармонике частоты возбуждения ($f/2$), *3* – на частоте второй субгармоники ($3f/2$), *4* – на частоте гармоники ($2f$), пунктир соответствует уровню шумов. X – частота в Гц, Y – ускорение в дБ относительно 1 мс$^{-2}$.

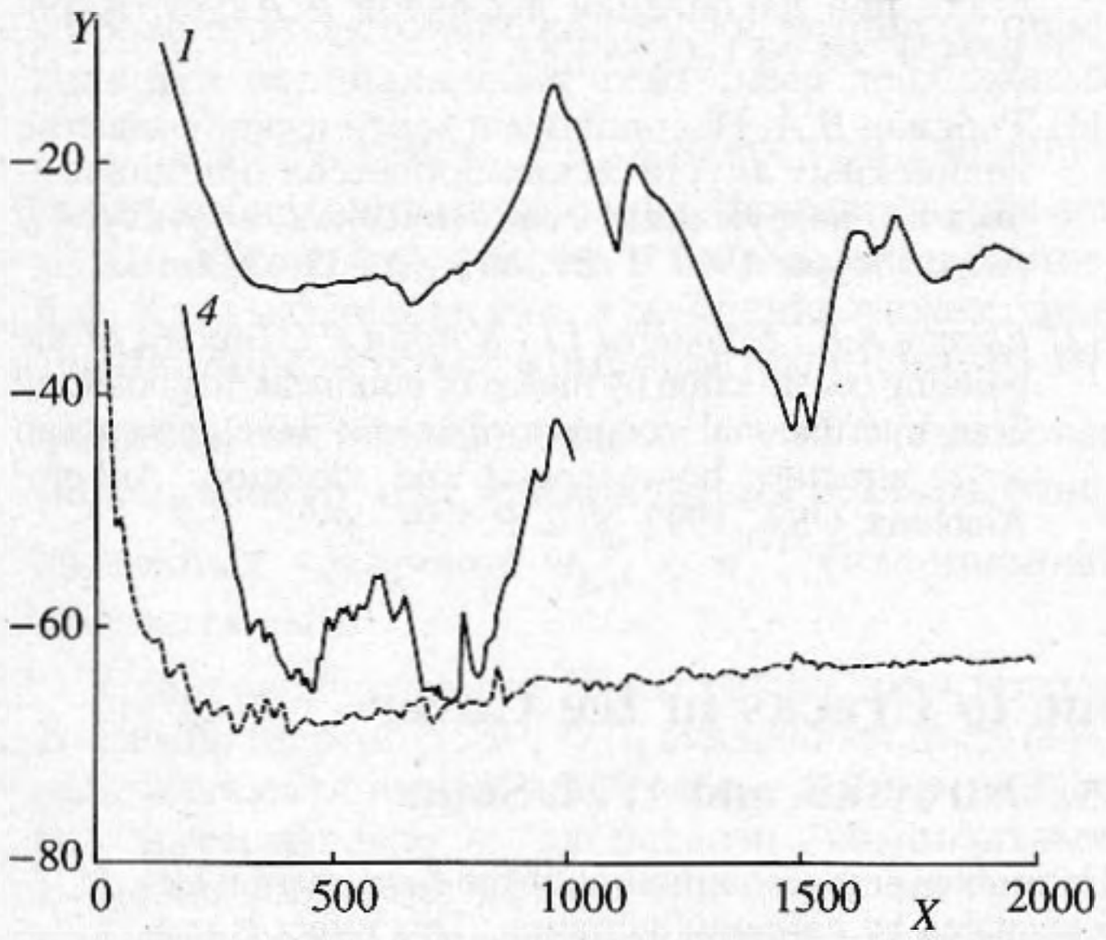

Рис. 5. Амплитудно-частотная зависимость виброускорения при возбуждении перестраиваемым по частоте вибровозбудителем, расположенным вблизи от трещины, датчик на удалении 0.2 м. Температура воздуха +3°С. *1* – вибрации на частоте возбуждения (f), *2* – на субгармонике частоты возбуждения ($f/2$), *3* – на частоте второй субгармоники ($3f/2$), *4* – на частоте гармоники ($2f$), пунктир соответствует уровню шумов. X – частота в Гц, Y – ускорение в дБ относительно 1 мс$^{-2}$.

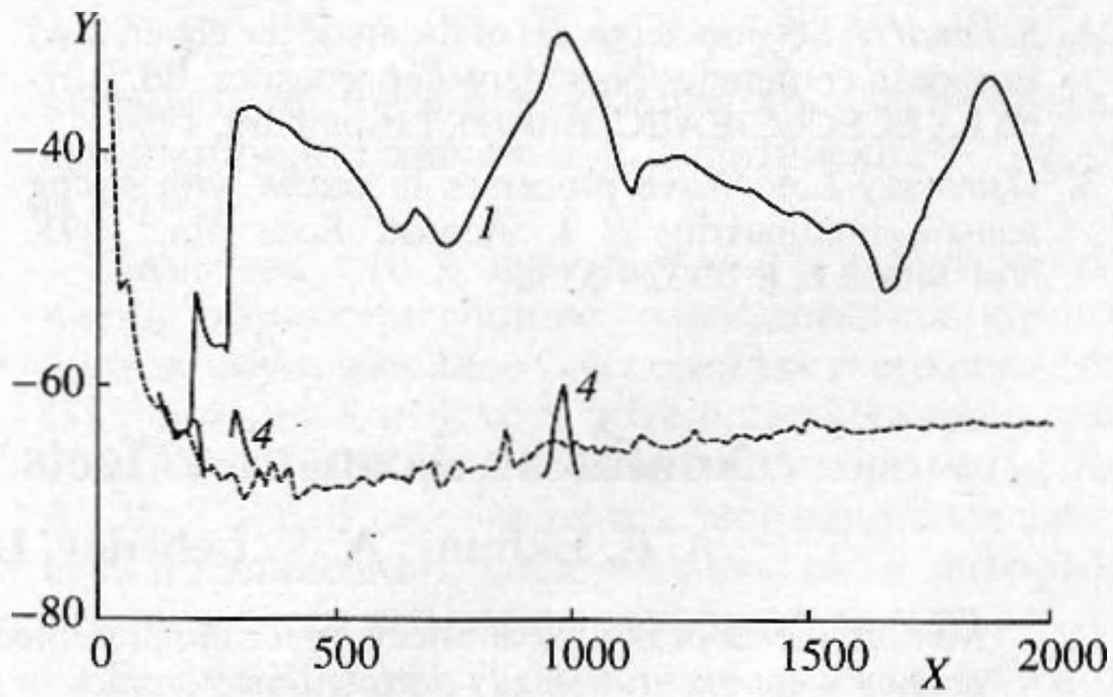

Рис. 6. Амплитудно-частотная зависимость виброускорения при возбуждении перестраиваемым по частоте вибровозбудителем, расположенным вблизи от трещины, датчик на удалении 2 м. Температура воздуха +3°С. *1* – вибрации на частоте возбуждения (f), *2* – на субгармонике частоты возбуждения ($f/2$), *3* – на частоте второй субгармоники ($3f/2$), *4* – на частоте гармоники ($2f$), пунктир соответствует уровню шумов. X – частота в Гц, Y – ускорение в дБ относительно 1 мс$^{-2}$.

Вторая серия измерений проводилась при плюсовой температуре. Следует отметить, что наиболее интересный момент в этом случае – отсутствие генерации субгармоник даже для большой величины возбуждающей силы (30 Н). В этой серии измерений отмечалось заметное возрастание уровня второй гармоники на датчике, расположенном вблизи трещины (рис. 5).

На датчике, удаленном от трещины, уровень гармоник был существенно ниже (рис. 6). Поэтому можно сделать вывод, что генерация гармоник связана с наличием трещины.

Подведем итог. Результаты измерений позволяют сделать следующие выводы.

Гармоники и субгармоники "рождаются" вблизи трещины. Локальность эффекта позволяет использовать его для диагностики наличия трещин.

Субгармоники генерируются вблизи четко сформированной трещины при низкой температуре и влажности льда. Таким образом, наличие или отсутствие субгармоник в спектре виброотклика позволяет судить как о наличии трещины, так и о состоянии льда.

Следует также отметить высокую помехозащищенность метода диагностики трещин по наличию субгармоники, что позволяет использовать мощные полигармонические источники вибраций.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда (грант R8U000) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-02-03508-А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stein P.J.* Interpretation of a few ice event transients // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83. № 2. P. 617 - 622.
2. *Schmidt H.* Seismo-acoustics of the arctic ice cover, 2-nd European conference on underwater acoustics, Ed. Bjerno L., ECSCEC-EAEC, Brussel, Luxemburg, 1994.
3. *Ostrovsky L.A.* Wave processes in media with strong aoustic nonlinearity // J. Acoust. Soc. Am. 1993. Vol. 90. № 6. P. 3332 - 3338.
4. *Ostrovsky L.A., Sutin A.M.* Nonlinear sound scattering form subsurface bubble layer. Natural Physical Sources of Underwater sound. Sea Surface Sound (2). Ed. Kerman B.R. Kluver Academic Publishers. Dordrecht – Boston–London, 1993. P. 363 - 370.
5. *Belyaeva I.Yu., Ostrovsky L.A., Timanin E.M.* Experiments on harmonic generation in grainy media // Acoustic letters. 1992. 15. № 11. P. 221 - 224.
6. *Островский Л.А., Сутин А.М.* Нелинейные акустические методы диагностики газовых пузырьков в жидкости. – В кн. Ультразвуковая диагностика. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. С. 151.
7. *Fenlon F.H.* On the Amplification of Modulated Acoustic Waves in Gas-Liquid Mixtures. – Cavitation and Inhomogeneties in Underwater Acoustics., Ed. W. Lauterborn. Spring-Verlag, Heidelberg New York, 1980. P. 141 - 150.
8. *Антонец В.А., Донской Д.М., Сутин А.М.* Нелинейная вибродиагностика расслоения и непроклея в многослойных конструкциях // Механика композитных материалов. 1986. Т. 5. С. 934 - 937.
9. *Schkolnik I.* Nondestructive testing of concreres: New aspects // Nondestr. Test. Eval. 1993. Vol. 10. P, 351 - 358.
10. *Коротков А.С., Славинский М.М., Сутин А.М.* Изменение нелинейного акустического параметра стали при накоплении дефектов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 84 - 87.
11. *Робсман В.А.* Накопление и хаотическое развитие нелинейных акустических процессов при динамическом нагружении геологических структур // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 2. С. 333 - 349.
12. *Ekimov A.E., Kolodieva I.I., Korotin P.I.* Studies of the building construction by means of nonlinear diagnostics // 2-nd International congress of recent developments in air-& structure borne sound and vibration. Auburn, Alabama, USA. 1992. V. 2. P. 859 - 862.

Nonlinear Acoustic Effects Due to Cracks in Ice Cover

A. E. Ekimov, A. V. Lebedev, L. A. Ostrovskii, and A. M. Sutin

Measurements of nonlinear effects in ice are presented. Harmonics and subharmonics of the fundamental frequency were experimentally detected near a crack in ice excitated by harmonic vibration. This effect is proposed for crack diagnostics.