АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1994, том 40, № 1, с. 104 - 106

УДК 534.222

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ В СЫРОМ ПЕСКЕ

© 1994 г. В. Е. Назаров

Институт прикладной физики РАН

603600 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 24.05.93 г.

Приведены описание и результаты экспериментальных исследований самовоздействия и взаимодействия акустических волн в водонасыщенном речном песке.

Распространение интенсивных волн в нелинейных средах сопровождается их взаимодействием и самовоздействием, что может приводить к нелинейным дисперсии и поглощению волн [1]. Подобные эффекты обусловлены, соответственно, реактивной и диссипативной нелинейностями среды.

Традиционно, описание взаимодействия акустических волн проводятся в рамках реактивной нелинейности [2, 3]. Однако, как показали экспериментальные исследования, некоторые металлы и горные породы [4 - 6] обладают (кроме реактивной) и диссипативной нелинейностью. В связи с этим, поиск сред, обладающих диссипативной акустической нелинейностью, и исследование эффектов взаимодействия и самовоздействия упругих волн в таких средах представляет несомненный научный и практический интерес.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований нелинейного распространения и взаимодействия акустических волн в водонасыщенном речном песке. Схема эксперимента изображена на рис. 1. Для измерений использовался стержень, состоящий из стеклянной трубки, заполненной сырым речным песком (объемное содержание воды составляло около 20%). Длина трубки L = 30 см, внутренний диаметр d = 1 см. Стержень 1 возбуждался пьезокерамическим излучателем накачки 2, одна сторона которого была приклеена к массивной металлической нагрузке 3, а другая – к торцу стержня. К другому – свободному торцу стержня приклеивались пьезокерамический излучатель 4 – для возбуждения ультразвукового импульса и приемник – акселерометр 5 – для измерения амплитуд импульса и накачки. Таким образом, стержень являлся низкочастотным акустическим резонатором с жесткой и мягкой границами. Вблизи излучателя накачки на боковую поверхность трубки приклеивался приемник-акселерометр 6 для измерения амплитуды ультразвукового импульса, прошедшего через стержень. С целью обеспечения стабильности измерений песок в трубке предварительно уплотнялся при возбуждении в резонаторе интенсивных колебаний в широком диапазоне частот.

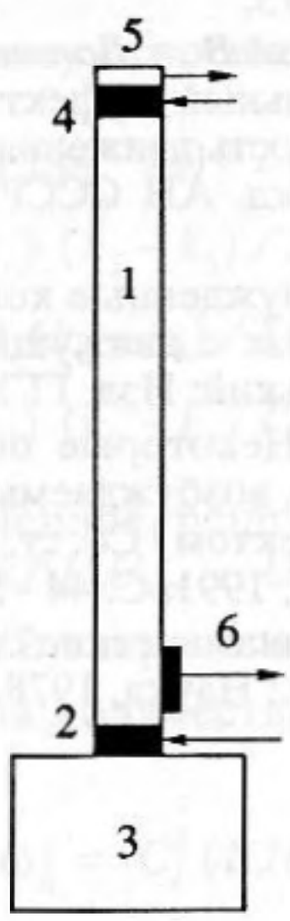

Рис. 1. Блок-схема эксперимента.

При исследовании распространения в стержне ультразвукового импульса и его взаимодействия с низкочастотной волной были обнаружены эффекты самопросветления водонасыщенного речного песка и усиления слабого ультразвукового импульса в поле мощной низкочастотной волны накачки.

В первом эксперименте ультразвуковой импульс возбуждался излучателем 2. Длительность импульса составляла T = 500 μс; частота повторения импульсов $F_и$ = 50 Гц; частота волны f = 90 кГц. В этом эксперименте проводились измерения относительных величин: амплитуды V напряжения на излучателе 2 пропорциональной амплитуде $U(0)$ смещения одного торца стержня (x = 0) и ампитуды W напряжения, возникающего в приемнике 5, пропорциональной амплитуде $U(L)$ смещения другого торца стержня (x = L).

Измерения этих величин проводились с помощью двухлучевого осциллографа.

Предварительная проверка системы излучатель 2 – приемник 5 показала ее линейность, т.е.

$$W \sim V. \qquad (1)$$

В контрольном эксперименте со стеклянным стержнем и трубкой без песка также не было обнаружено отклонения от этой зависимости.

Как видно из рис. 2, зависимость $W(V)$ существенно нелинейна, причем в диапазоне напряжений $0 < \ln V < 4$ амплитуда принимаемой волны растет быстрее, чем амплитуда волны излучаемой. Это свидетельствует об уменьшении коэффициента диссипации среды и ее нелинейном просветлении под действием акустической волны. Обнаруженный эффект – безинерционен и обратим: изменения амплитуд W и V синхронны.

На начальном участке ($0 < \ln V < 2$) эффект нелинейного акустического просветления можно описать в рамках степенной диссипативной нелинейности среды [4 - 6]:

$$U_{tt} - c^2 U_{xx} - \beta(1 + a\varepsilon_0^{\alpha}) U_{txx} = 0, \qquad (2)$$

где U – смещение частиц среды в волне, ε_0 – амплитуда деформации волны, c – скорость распространения волны, β – линейный коэффициент диссипации среды, a, $\alpha = \text{const}$.

Решение этого уравнения ищем в виде:

$$U(x, t) = \frac{1}{2} U(0) \exp[j(\omega t - kx) - \chi(x)] + \text{к. с.} \qquad (3)$$

где $\chi(x)$ – коэффициент затухания волны, $\omega = ck$.

Полагая в (3) $\chi'_x \ll k$, получаем:

$$U(L) = \frac{U(0)\exp(-\delta L)}{\{1 + a\,[kU(0)]^{\alpha}\,[1 - \exp(-\alpha\delta L)]\}^{1/\alpha}}, \qquad (4)$$

где $\delta = \beta\omega^2/2c^3$. Из сравнения выражения (4) с экспериментальными результатами следует, что параметр a диссипативной акустической нелинейности отрицателен.

При малой амплитуде $U_1(0)$ волны, создаваемой излучателем, когда $|a[kU_1(0)^{\alpha}| \ll 1$ и влиянием нелинейности можно пренебречь, из (4) находим:

$$U_1(L) = U_1(0)\exp(-\delta L). \qquad (5)$$

Поделив уравнения (4, 5) друг на друга и введя обозначения $M = U(L)/U_1(L)$, $N = U_1(0)/U_1(0)$, получим:

$$N/M = [1 + bN^{\alpha}]^{1/\alpha}, \qquad (6)$$

где $b = a[kU_1(0)]^{\alpha}[1 - \exp(-\alpha\delta L)]$. Это уравнение позволяет определить показатель степени α. Дважды логарифмируя (6) при $|bN^{\alpha}| \ll 1$, имеем:

$$\ln\ln M = \ln(-b/\alpha) + \alpha \ln N. \qquad (7)$$

Используя результаты эксперимента, построим зависимость (7) (рис. 3). Из этого рисунка по

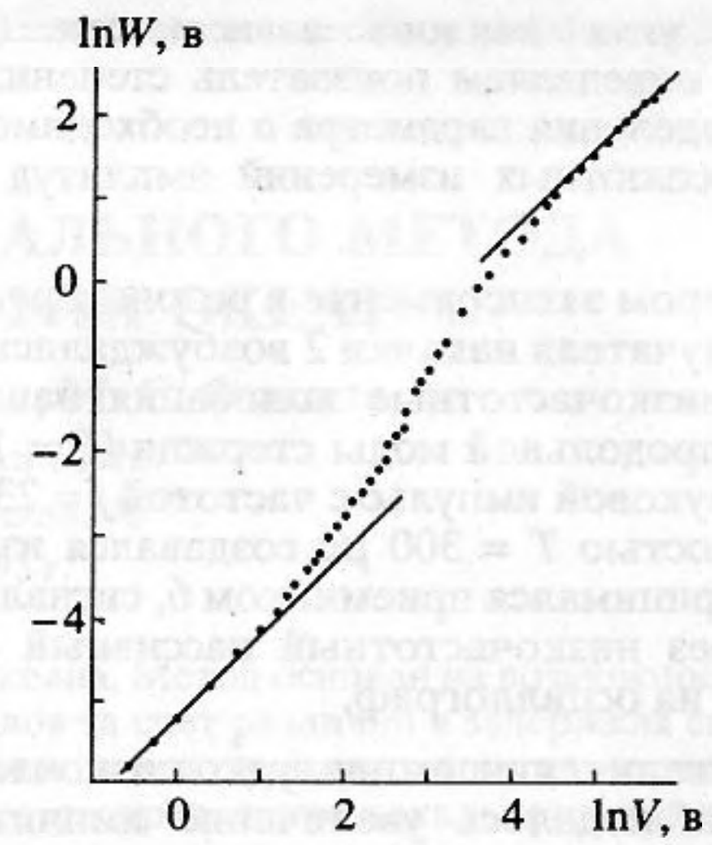

Рис. 2. Зависимость амплитуды W напряжения на приемнике от амплитуды V напряжения на излучателе. Прямая линия соответствует зависимости (1).

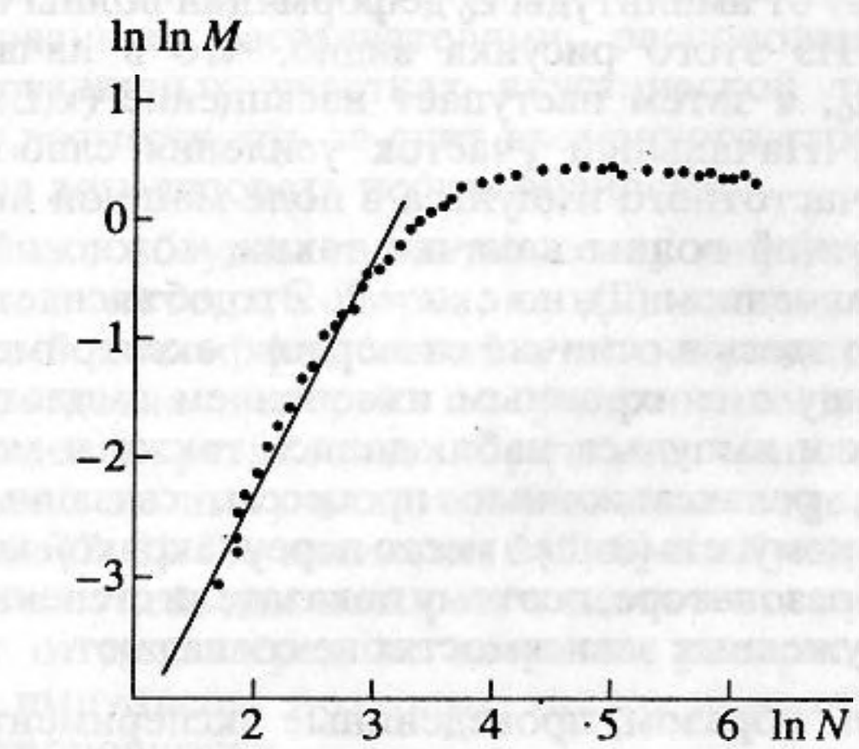

Рис. 3. Зависимость $\ln\ln M$ от $\ln N$. Прямая линия соответствует степени $\alpha = 2$.

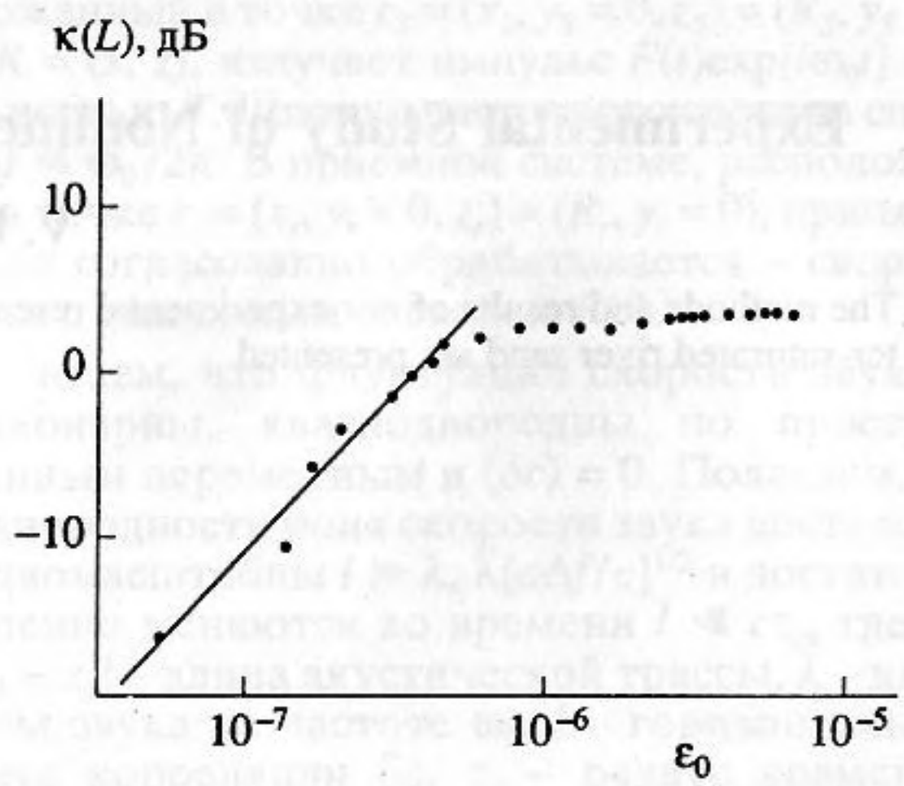

Рис. 4. Зависимость $\kappa(L)$ от амплитуды ε_0 деформации волны накачки. Прямая линия соответствует степени $\alpha = 1$.

тангенсу угла наклона зависимости (7) при $|bN^{\alpha}| \ll 1$ определяем показатель степени: $\alpha = 2$. (Для определения параметра a необходимо проведение абсолютных измерений амплитуд $U(0)$ и $U(L)$).

Во втором эксперименте в резонаторе при помощи излучателя накачки 2 возбуждались интенсивные низкочастотные колебания на частоте третьей продольной моды стержня (F = 10 кГц). Ультразвуковой импульс с частотой f = 230 кГц и длительностью T = 300 μс создавался излучателем 4 и принимался приемником 6, сигнал с которого через низкочастотный пассивный фильтр поступал на осциллограф.

При увеличении амплитуды низкочастотной волны наблюдалось увеличение амплитуды A высокочастотного импульса, принятого приемником 6. На рис. 4 в логарифмических координатах изображена зависимость коэффициента усиления $\kappa(L) = \ln(A/A_0)$ (A_0 – амплитуда импульса без накачки) от амплитуды ε_0 деформации волны накачки. Из этого рисунка видно, что в начале $\kappa(L) \sim \varepsilon_0$, а затем наступает насыщение ($\kappa(L) =$ = const). Начальный участок усиления слабого высокочастотного импульса в поле мощной низкочастотной волны накачки также можно описать уравнением (2), но с $\alpha = 1$. Это объясняется тем, что здесь в отличие от первого эксперимента, наряду с синхронным изменением амплитуд накачки и импульса наблюдались также и медленные, релаксационные процессы, связанные, по-видимому, с имевшей место переупаковкой песчинок в резонаторе, поэтому показатели степени α в обнаруженных зависимостях не совпадают.

Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют о наличии у водонасыщенных зернистых сред, подобных речному песку, диссипативной нелинейности, проявляющейся в зависимости коэффициента диссипации от параметров акустического воздействия. В гидродинамике аналогичными свойствами обладают, так называемые, неньютоновские (или бингамовские) жидкости, для которых их вязкость, определяющая сопротивление течению, является нелинейной функцией приложенного напряжения [7 - 9]. Вероятно эти же свойства неньютоновских сред проявляются и для акустических волн, что может быть использовано для дистанционного управления (при помощи виброакустических полей) гидродинамическими процессами в таких средах и их акустической диагностики.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Сороса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. М.: Наука, 1990. 432 с.
2. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 520 с.
3. *Руденко О.В., Солуян С.И.* Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 288 с.
4. *Назаров В.Е.* Нелинейное затухание звука на звуке в металлах // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 6. С. 1177 - 1182.
5. *Зименков С.В., Назаров В.Е.* Диссипативная акустическая нелинейность меди // Физика металлов и металловедение. 1992. № 3. С. 62 - 65.
6. *Зименков С.В., Назаров В.Е.* Нелинейные акустические эффекты в образцах горных пород. // Изв. РАН. Физика Земли. 1993. № 1. С. 13 - 18.
7. *Уилкинсон УЛ.* Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 244 с.
8. *Рейнер М.* Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.
9. *Шульман З.П.* Беседы о реофизике. Минск: Наука и техника, 1976. 96 с.

Experimental Study of Nonlinear Acoustic Bleaching in Moist Sand

V. E. Nazarov

The methods and results of our experimental research on acoustic wave interaction and self-interaction in water-saturated river sand are presented.