

УДК 534.222

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО РАССЕЯНИЯ ЗВУКА НА СЛОЕ СУХОГО ПЕСКА

© 1999 г. А. Л. Матвеев, В. Е. Назаров, А. И. Потапов, И. А. Соустова, А. М. Сутин

*Институт прикладной физики РАН*

*603600 Н. Новгород, Ульянова, 46*

*E-mail: nazarov@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 30.12.97 г.

Работа посвящена экспериментальному исследованию нелинейного рассеяния звука на слое речного песка. По результатам измерения акустического поля излучения слоем на разностной частоте оценен эффективный параметр квадратичной нелинейности песка. Проведенные эксперименты показали, что эффект нелинейного рассеяния на слое может быть использован для акустической диагностики поддонных слоев.

В последнее время большое внимание уделяется развитию акустических методов диагностики морских осадков. Это связано как с научными задачами – разработкой физических моделей таких сред, так и с практическими – поиск нефтеносных районов, развитие новых методов мониторинга и т.д. [1–6]. К настоящему времени достаточно подробно разработаны простейшие линейные модели морских осадков как сред со сложной структурой [1, 2, 5]. В таких моделях осадки представляют собой пористые водоподобные среды, содержащие пузырьки газа и твердые включения. Экспериментальные исследования последних лет показали [6], что подобные среды обладают высокой упругой нелинейностью, что может быть обусловлено как сильной сжимаемостью пузырьков газа [3], так и концентрацией напряжений на границах отдельных зерен. Кроме того, было показано [7], что нелинейные акустические параметры таких сред более чувствительны к изменениям ее структуры и наличию в ней различных дефектов, чем линейные параметры (скорость звука, коэффициент поглощения).

В настоящей работе приводятся описание и результаты экспериментального исследования нелинейного рассеяния низкочастотной акустической волны, возникающей при взаимодействии неколлинеарных высокочастотных волн, в слое сухого речного песка. На основе измерений уровня волны разностной частоты, образовавшейся в слое, определено значение эффективного параметра квадратичной упругой нелинейности сухого песка.

Для наблюдения эффекта генерации звука разностной частоты при взаимодействии двух высокочастотных акустических волн использовалась методика, ранее развитая при изучении нелинейных эффектов на пузырьковом слое в

жидкости, содержащей газопузырьки [6]. Исследования проводились в измерительном акустическом бассейне размером  $2.5 \times 3 \times 5$  см<sup>3</sup>, так что масштабы этого эксперимента находятся между полевыми и обычными лабораторными экспериментами.

Экспериментальные исследования нелинейного рассеяния звука проводились в импульсном режиме, что позволяло избежать влияния отражения акустических сигналов от стенок бассейна. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Два неколлинеарных высокочастотных акустических пучка создавались разнесенными излучателями 1 и 2; их радиусы  $a_1 = a_2 = a = 10$  см. Излучатели находились на расстоянии  $L = 1.7$  м от слоя песка 3 на глубине  $H = 0.5$  м. Слой песка находился в тонкостенном металлическом контейнере с размерами  $50 \times 100 \times 5$  см<sup>3</sup>. Акустическая ось первого излучателя была установлена нормально к поверхности слоя ( $\theta_1 = 0^\circ$ ), а второго – под углом  $\theta_2 = 4^\circ$ . Частота первого излучателя составляла  $f_1 = 62.4$  кГц, а второго – изменялась и составляла в одном случае  $f_2 = 69.2$  кГц, а во втором  $f_2 = 75.2$  кГц, так что разностные частоты  $f_3 = f_2 - f_1$  были равны 6.8 кГц и 12.8 кГц, соответственно. Длительность импульсов накачки составляла 2.2 мс. Прием сигналов осуществлялся гидрофонами 8103 фирмы “Брюль и Кьер”.

Измерение излучаемых сигналов и сигнала разностной частоты производилось с помощью анализатора спектра.

Перед проведением экспериментов с песком исследовались параметры акустического поля в области, куда затем помещался слой. Для этого в область предполагаемого размещения контейнера с песком помещался приемный гидрофон.

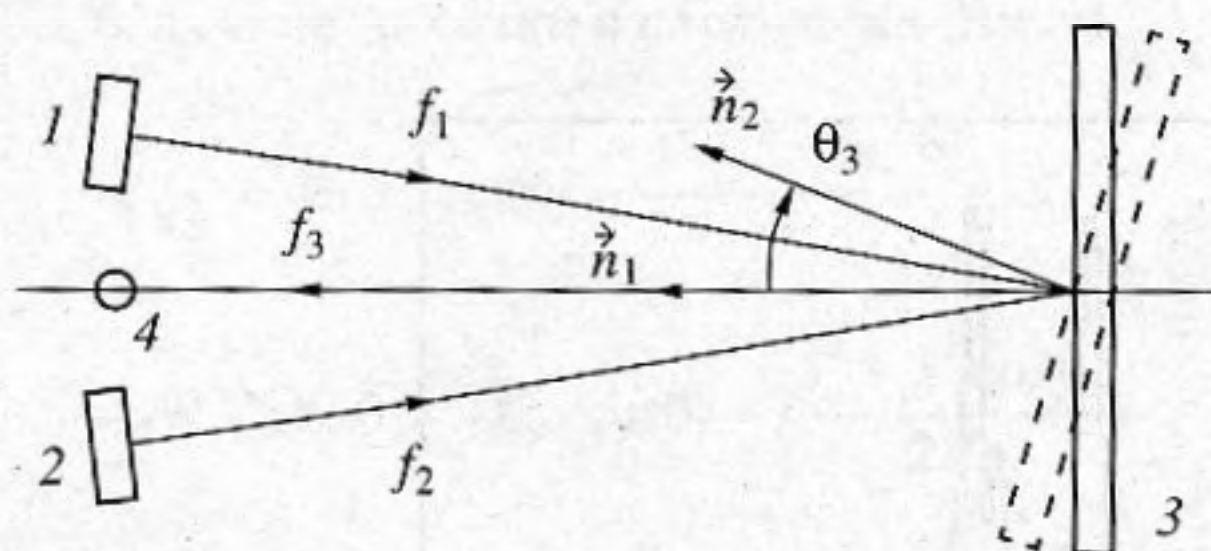


Рис. 1. Схема эксперимента: 1, 2 – излучатели высокочастотных волн; 3 – слой песка; 4 – приемный гидрофон.

тах накачки  $f_{1,2}$  коэффициент затухания составлял около 30 дБ. Коэффициенты затухания на разностных частотах были равны  $K_1 = 7.3$  дБ при  $f_3 = 6.8$  кГц и  $K_2 = 12$  дБ при  $f_3 = 12.8$  кГц.

При измерении волны разностной частоты, рассеянной слоем песка, уровень НЧ волны был существенно выше фона, а излучение имело явно выраженную диаграмму направленности, ось которой составляла угол  $\theta_3$  к нормали слоя. Угловая зависимость амплитуды волны разностной частоты, рассеянной слоем песка, определялась при помощи поворота контейнера относительно его центра, при этом приемный гидрофон помещался рядом с излучателями накачки (см. рис. 1).

На рис. 2 приведен спектр излучаемого сигнала на расстоянии 1.7 м от излучателей в бассейне без слоя. Здесь амплитуды давления составляли:  $P_1 = 16$  кПа на частоте  $f_1 = 62.4$  кГц и  $P_2 = 26$  кПа на частоте  $f_2 = 69.8$  кГц. Принимаемый сигнал содержал слабую составляющую (около 20 Па) на разностной частоте  $f_3 = 7.4$  кГц, которая образовалась при взаимодействии излученных сигналов в воде.

В ходе проведения эксперимента со слоем были определены значения коэффициентов затухания звука в слое песка на частотах накачки и разностной частоте. Для этого контейнер с песком устанавливался перпендикулярно акустической оси излучателей на расстоянии 80 см от них, а гидрофон располагался на акустической оси излучателей на расстоянии 40 см за слоем песка. На частоте

На рис. 3 приведен спектр рассеянного слоем сигнала, принятого гидрофоном, находящемся на расстоянии  $L = 1.7$  м от слоя, плоскость которого была повернута на угол  $\theta_3 = -22^\circ$  относительно акустической оси первого излучателя. Амплитуда  $P_3$  акустического давления на разностной частоте  $f_3 = 6.8$  кГц составляла около 60 Па.

На рис. 4 приведены зависимости амплитуды давления рассеянного сигнала на разностных частотах  $f_3 = 6.8$  кГц и  $f_3 = 12.8$  кГц, измеренные при изменении угла  $\theta_3$ . Видно, что направление излучения сигнала на разностной частоте зависит от частоты волны накачки.

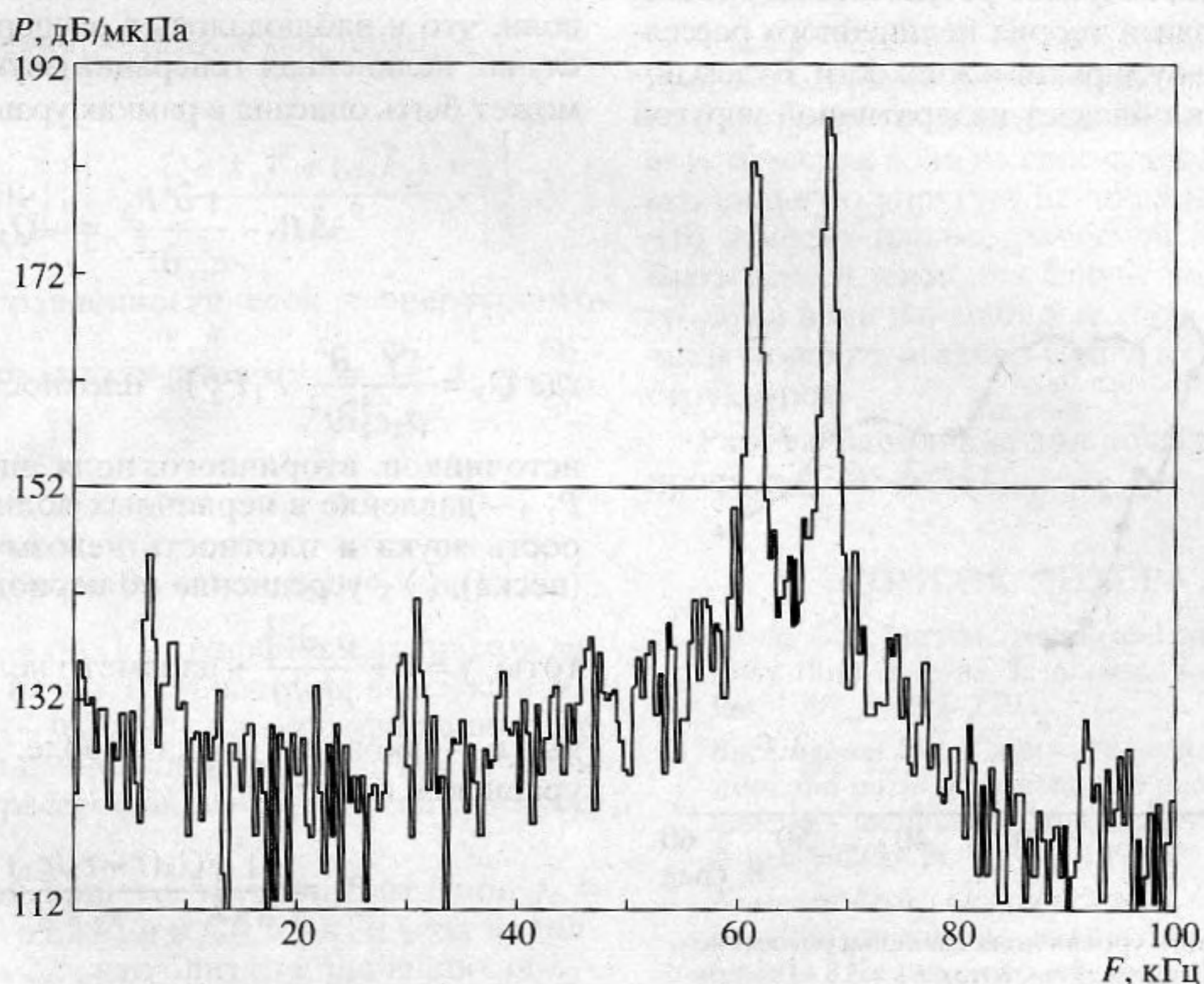


Рис. 2. Спектр излучаемого сигнала на расстоянии  $L = 1.7$  м от излучателей (1, 2) в отсутствии слоя песка.

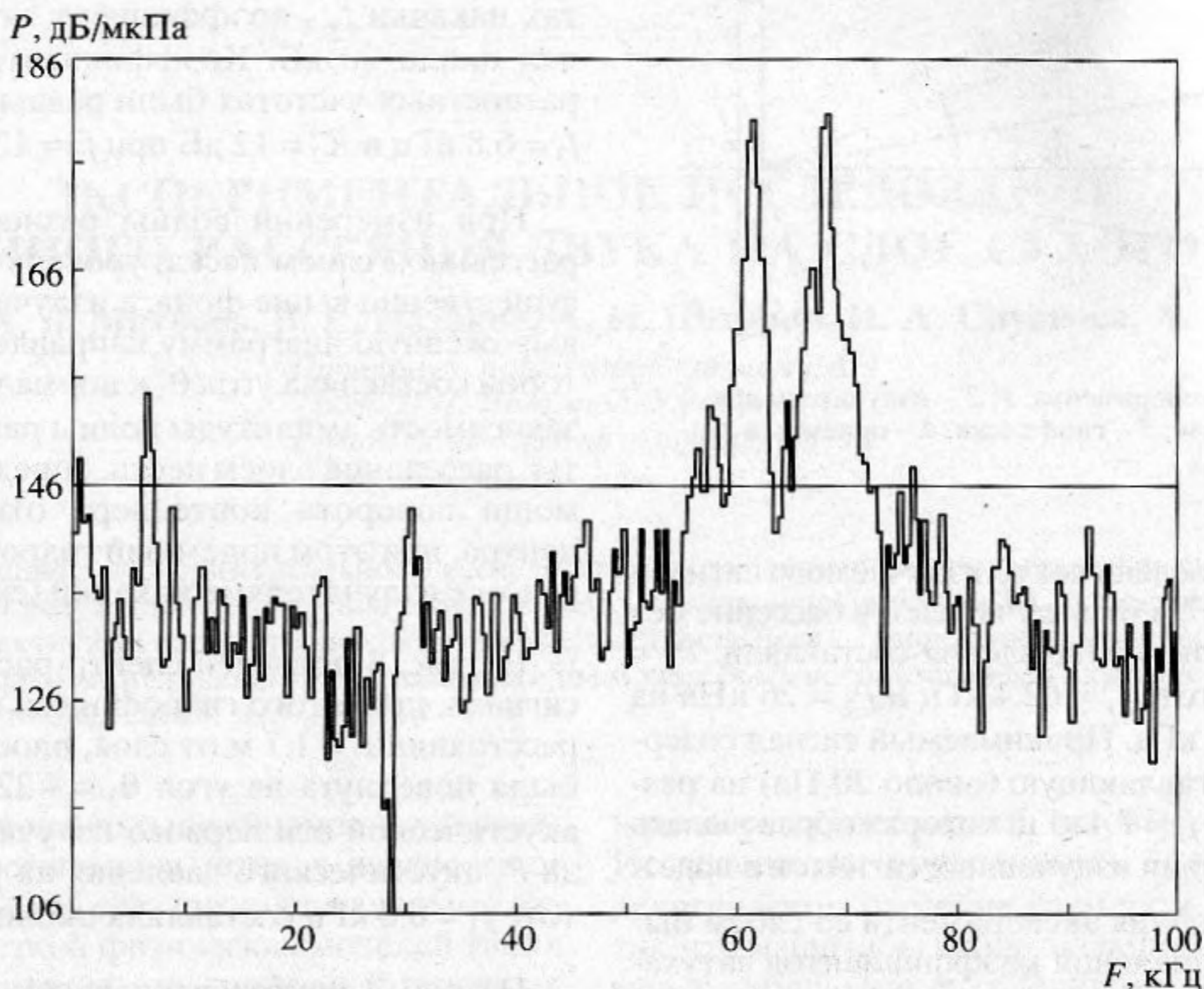


Рис. 3. Спектр рассеянного слоя песка сигнала, принятого гидрофоном (4) и пропущенного через пассивный фильтр ФВЧ.

Для теоретического описания полученных результатов и определения параметра нелинейности сухого песка воспользуемся результатами работы [8], где была развита теория нелинейного рассеяния звука на слое пузырьков в жидкости. Будем полагать, что песок обладает квадратичной упругой

нелинейностью. Такая нелинейность должна приводить к линейной зависимости уровня разностной частоты от произведения амплитуд первичных волн, что и наблюдалось в эксперименте. В этом случае нелинейная генерация звука на частоте  $f_3$  может быть описана в рамках уравнения [10]:

$$\Delta P_3 - \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 P_3}{\partial t^2} = -Q_3,$$

где  $Q_3 = \frac{\gamma}{\rho_2 c_2^4} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \langle P_1 P_2^* \rangle$  – плотность виртуальных источников вторичного поля низкой частоты,  $P_{1,2}$  – давление в первичных волнах,  $c_2, \rho_2$  – скорость звука и плотность невозмущенной среды (песка),  $\langle \rangle$  – усреднение по периоду высокой частоты,  $\gamma = 1 + \frac{\rho_2 \partial c_2^2}{c_2^2 \partial \rho}$  – параметр нелинейности среды,  $c_1$  – скорость звука в воде. Решение этого уравнения имеет вид

$$P_3 = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{Q_3(t - r_2/c_1)}{r_2} dv,$$

где  $dv$  – элемент объема в области взаимодействия,  $r_2$  – расстояние от  $dv$  до точки наблюдения.

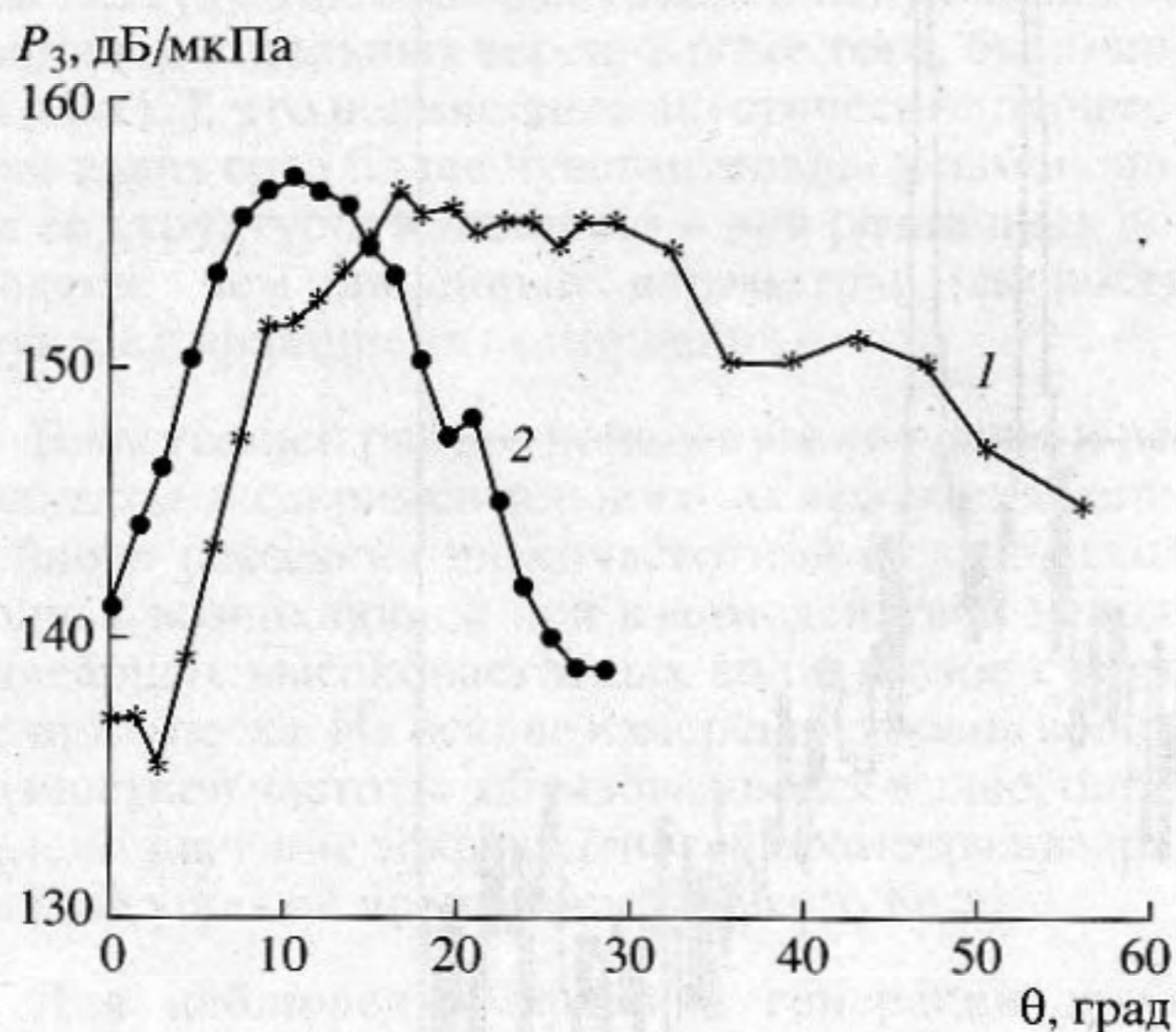


Рис. 4. Зависимость уровня поля давления рассеянного сигнала на разностных частотах  $F_3 = 6.8$  кГц (кривая 1) и  $F_3 = 12.8$  кГц (кривая 2) при изменении угла облучения слоя песка.

Для пучков накачки в слое песка имеем

$$P_{1,2} = \beta_1 \bar{P}_{1,2} \exp \left\{ \frac{-y^2 - x^2 \cos^2 \theta_i}{R_i^2} a_i^2 K_i^2 - \right. \\ \left. - jK_i Z \cos \theta_i - jK_i x \sin \theta_i - j \frac{y^2 + x^2 \cos \theta_i}{2R_i} - \frac{\alpha_i z}{\cos \theta_i} \right\} e^{j\omega_{1,2} t}$$

$P_{1,2}$  – амплитуды давления, создаваемых излучателями 1, 2 на расстоянии  $R_{1,2}$ ;  $\beta_1 = 2(\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1) / [1 + (\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1)]$  – коэффициент прохождения для волн накачки из воды в песок,  $\alpha_{1,2}$  – коэффициенты затухания первичных волн в слое,  $i = 1, 2$ . Нетрудно получить выражение для волны разностной частоты  $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ , рассеянной слоем “назад” – в левое полупространство [8].

$$P_3 = \{ \gamma \omega_3^2 L^2 P_1 P_2 [1 - \exp(-\beta_- j k_- L)] (\beta_- / \beta_1^2) \times \\ \times \beta_- D(\theta) \} / \left\{ (\beta_- + j k_-) \sqrt{1 + \frac{4k_3^2 L^2}{(k_1 a_1)^2 + (k_2 a_2)^2}} \times \right. \\ \left. \times 2\rho_2 c_2^4 R_0 a_1 k_1 a_2 k_2 \right\},$$

где

$$D(\theta) = \exp \left\{ \left[ -\frac{1}{4} (k_1^2 a_1^2 + k_2^2 a_2^2) \cos \theta_3 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin^2(\theta - \theta_3) \right] / \left[ 1 + \frac{((a_1 k_1)^2 + (a_2 k_2)^2)^2}{4k_3^2 L^2} \right] \right\}$$

диаграмма направленности слоя – апертурного параметрического излучателя,  $k_1 = \frac{\omega_1}{c_1}$ ;  $k_2 = \frac{\omega_2}{c_1}$ ;

$$k_3 = \frac{\omega_3}{c_1},$$

$$\theta_3 = \arcsin [(\omega_1 \sin \theta_1 - \omega_2 \sin \theta_2) (\omega_1 - \omega_2)^{-1}],$$

$\beta_2 = 2\rho_2 c_2 / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)$  – коэффициент прохождения для волны разностной частоты из песка в воду,  $\beta_- = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 / \cos \theta_3$ ,  $\alpha_3$  – коэффициент затухания волны разностной частоты,  $k_- = k_1 - k_2 - k_3 \cos \theta_3$ ,  $R_0$  – расстояние от слоя песка до точки наблюдения.

Для условий нашего эксперимента при  $f_1 = 6.24$  кГц,  $f_2 = 69.2$  кГц и  $f_3 = 6.8$  кГц угол  $\theta_3$  должен составлять  $22^\circ$ , что близко к значению, полученному в ходе эксперимента. При сильном затухании волн в слое песка  $\beta_- L \gg 1$  (а именно этот случай имел место в эксперименте) выражение для поля излучения  $P_3$  на оси  $\theta = \theta_3$  несколько упрощается:

$$P_3 = \frac{\gamma \omega_3^2 L^2 P_1 P_2 \beta_- \sqrt{1 + (k_- / \beta_-)^2}}{\beta_-^2 2\rho_2 c_2^4 (a_1 k_1) (a_2 k_2) \sqrt{1 + 4k_3^2 L^2 / [(k_1 a_1)^2 + (k_2 a_2)^2]}}$$

Это выражение позволяет оценить значение эффективного параметра нелинейности  $\gamma$  сухого песка.

Для условий эксперимента при указанных выше амплитудах высокочастотных волн и волны разностной частоты, для квадратичного параметра нелинейности песка получаем значение  $\gamma = 3 \times 10^3$  при  $\rho_2 = 2$  гр/см<sup>3</sup>,  $c_2 = 2 \times 10^4$  см/сек. Значение этого же параметра можно оценить из модели зернистой среды [9], согласно которой ее нелинейность определяется статической деформацией  $\epsilon_0$ :

$$\gamma = 1 / (2\epsilon_0). \quad (1)$$

Величину статической деформации среды  $\epsilon_0$  можно оценить, зная давление верхних слоев песка на нижние:  $\epsilon_0 \approx \frac{gH}{c_2^2}$ . Для слоя высотой  $H = 20$  см

получаем  $\epsilon_0 = 10^4$ . Расчет по формуле (1) дает для параметра квадратичной нелинейности величину около  $5 \times 10^3$ , что по порядку величины совпадает со значением, полученным из акустических измерений.

Таким образом, проведенные эксперименты продемонстрировали возможность эффективно нелинейного взаимодействия неколлинеарных акустических волн на слое сухого речного песка и его сильную упругую нелинейность, и показали, что эффект параметрической генерации может быть использован для излучения низкочастотного звука волн в поддонные слои с целью диагностики морских осадков и других сред со сложной структурой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 97-05-64711).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deone G.B. Internal friction and boundary conditions in lossy fluid seabeds. J. Acoust. Soc. Amer. В. 101(1). Jan. 1997. P. 233–239.
2. Buckingham M.J. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments. J. Acoust. Soc. Amer. 102(5). Pt. 1. Nov. 1997. P. 2579–2596.
3. Кобелев Ю.А., Островский Л.А. Модели газожидкостной смеси как нелинейной диспергирующей Среды / Нелинейная акустика, Горький. ИПФ АН СССР. 1980. С. 143–160.

4. *Беляева И.Ю., Тиманин Е.М.* Экспериментальное исследование нелинейных свойств поросодержащих упругих сред // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 5. С. 1026–1028.
5. *Anderson A.L., Hampton L.D.* Acoustics of gas-bearing sediments. Part 1, 2 // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1980. 6716. P. 1865–1903.
6. *Klusek Z., Sutin A., Matveev A., Potapov A.* Observation of nonlinear scattering of acoustical waves of sea sediments. *Acoustics Lett.* 1994. V. 18. № 11. P. 198–203.
7. *Беляева И.Ю., Зайцев В.Ю., Островский Л.А.* Нелинейные акустоупругие свойства зернистых сред. *Акуст. журнал.* 1993. Т. 39. № 1. С. 25–32.
8. *Кустов Л.М., Назаров В.Е., Сутин А.М.* Нелинейное рассеяние звука на пузырьковом слое. *Акуст. журн.* 1986. Т. 32. № 6. С. 804–810.
9. *Беляева И.Ю., Зайцев В.Ю.* Структурно-пористая нелинейность зернистых сред: теория, эксперимент. *Радиофизика.* 1995. Т. 38. № 1–2. С. 94–99.
10. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. С. 264.

## Experimental Investigation of Nonlinear Acoustic Scattering in a Layer of Dry Sand

A. L. Matveev, V. E. Nazarov, A. I. Potapov, I. A. Soustova, and A. M. Sutin

An experimental study of the nonlinear scattering of a low-frequency acoustic wave generated as a result of the interaction of noncollinear high-frequency waves in a dry sand layer is described. The level of the difference-frequency wave generated in the sand layer is used to evaluate the effective parameter of nonlinearity of dry sand. The resulting value agrees well with the estimate obtained from the granular medium model.