АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXV 1989 Вып. 4

УДК 539.3:534.242

НЕЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ОГРАНИЧЕННОГО ЗВУКОВОГО ПУЧКА ОТ УПРУГОЙ СФЕРЫ В ЖИДКОСТИ

Поддубняк А. П., Пороховский В. В.

Путем численно-аналитического анализа эхосигналов от стальной сферы в воде при озвучивании ограниченным звуковым пучком с кольцевым поперечным сечением выявлен вклад незеркального (обратного) рассеяния, обусловленного переизлучением поверхностной волны рэлеевского типа.

Обратное (незеркальное) отражение ограниченного звукового пучка, набегающего на границу раздела жидкость — твердое тело под углом, равным или почти равным критическому углу возбуждения рэлеевских волн, впервые наблюдалось Сасаки [1]. Теоретические [2—7] и экспериментальные [8—12] исследования показали, что такое явление наблюдается также при падении ограниченных звуковых пучков под критическими углами возбуждения боковых и разного типа поверхностных упругих волн. По своей природе обратное отражение, как и эффект сдвига ограниченного акустического пучка [13, 14], есть следствие условий пространственно-временного синхронизма между падающей звуковой и возбужденной упругой поверхностной (нормальной) волнами. Это явление во многом аналогично аномальному прохождению плоской звуковой волны через пластину, открытому С. Н. Ржевкиным и С. И. Кречмером [15, 16] и незеркальному отражению всесторонне изученному Л. М. Лямшевым и др. (см., например, работы [17—23]). В частности, в работах [24—31] теоретически и экспериментально выявлено незеркальное отражение звука толстыми пластинами и цилиндрами, тонкими стержнями и оболочками. Что касается исследований, относящихся к взаимодействию ограниченных звуковых пучков с объектами, то они проводились в основном для случаев плоской границы раздела сред. Исключение составляют экспериментальные измерения [32], при которых обнаружено обратное рассеяние волнового пучка от локально озвученного упругого кругового цилиндра. При этом предполагалось, что акустическая плоскость падающего пучка содержит ось цилиндра. В данной работе аналогичный эффект выявлен численно-аналитическим путем для случая упругой сферы.

Рассматривается нестационарная осесимметричная задача рассеяния хорошо коллимированного звукового пучка, поперечное сечение которого имеет вид кругового кольца, упругой сферой в акустической среде. Вблизи поверхности рассеивателя нормированное звуковое давление представляется формулой

$$p_{inc}(r, \theta, t) = f\left(t - \frac{r}{c}\cos\theta\right)[H(\pi-\theta-\theta_i^-) - H(\pi-\theta-\theta_i^+)], \quad (1)$$

$$\theta_i^{\pm} = \theta_i \pm \theta_0/2,$$
$$f(t) = \sin\omega_0 t[H(t) - H(t-t_0)], \quad (2)$$

где r, θ — сферические координаты с началом отсчета в центре отражателя (направление $\theta=\pi$ соответствует направлению рассеяния «назад»), t — время, c — скорость звука в жидкости, ω_0 — частота заполнения квазимонохроматического импульса посылки, t_0 — его длительность, $\theta=\pi-\theta_i^{\pm}$ — угловые значения краевых линий кольца озвучивания на поверхности объекта падающим пучком шириной θ_0, $H(z)$ — функция Хевисайда. Дав-

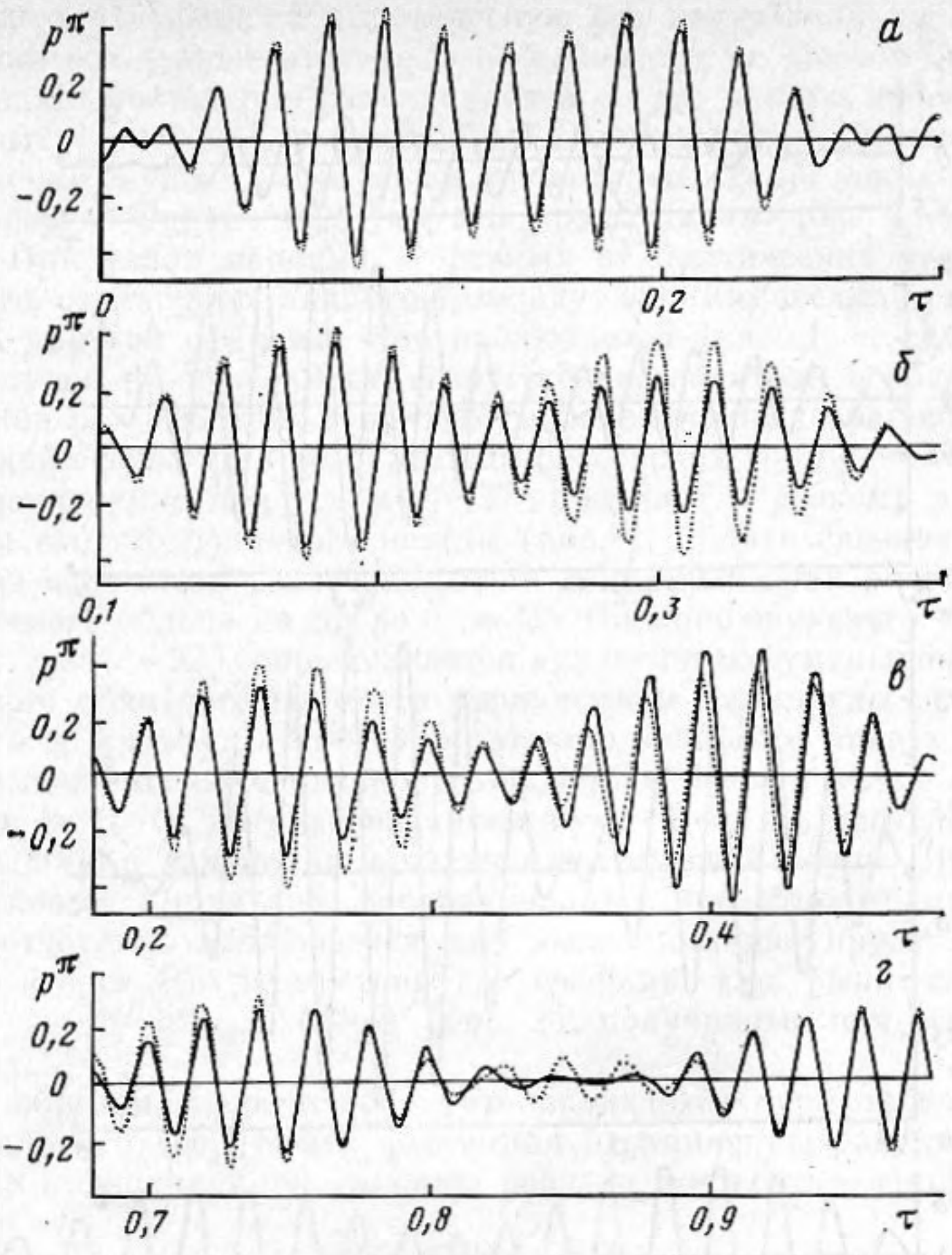

Рис. 1. Эхосигналы от сфер в воде при разных углах падения звуковых пучков шириной $\theta_0=8°$ (сплошные линии для стальной сферы, пунктирные — для акустически жесткой неподвижной сферы: *а* — $\theta_i=20°$, *б* — $\theta_i=27°$, *в* — $\theta_i=32°$, *г* — $\theta_i=54°$

ление в рассеянной волне представляется с помощью интеграла Фурье

$$p_{sc}(r,\theta,t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}p_{sc}(r,\theta,\omega)e^{-i\omega t}\,d\omega, \tag{3}$$

а спектральная плотность (стационарный эхосигнал) имеет вид

$$p_{sc}(r,\theta,\omega)=-f(\omega)\sum_{l=0}^{\infty}\left(l+\frac{1}{2}\right)h_l^{(1)}(kr)P_l(\cos\theta)\times$$

$$\times\frac{j_l^{0}(x)F_l(x)-xj_l^{0\prime}(x)}{h_l^{(1)}(x)F_l(x)-xh_l^{(1)\prime}(x)},\qquad x=ka \tag{4}$$

$$j_l^{0}(x)=\int_{\pi-\theta_l^{+}}^{\pi-\theta_l^{-}}e^{ix\cos\theta}P_l(\cos\theta)\sin\theta\,d\theta, \tag{5}$$

где $h_l^{(1)}(z)$ — сферическая функция Ханкеля первого рода, $P_l(z)$ — полином Лежандра, $f(\omega)$ — фурье-спектр функции $f(t)$, $\omega=kc$ — параметр преобразования Фурье (круговая частота), k — волновое число в жидкости, a — радиус упругой сферы, импедансные свойства которой описываются функцией податливости $F_l(x)$ [33].

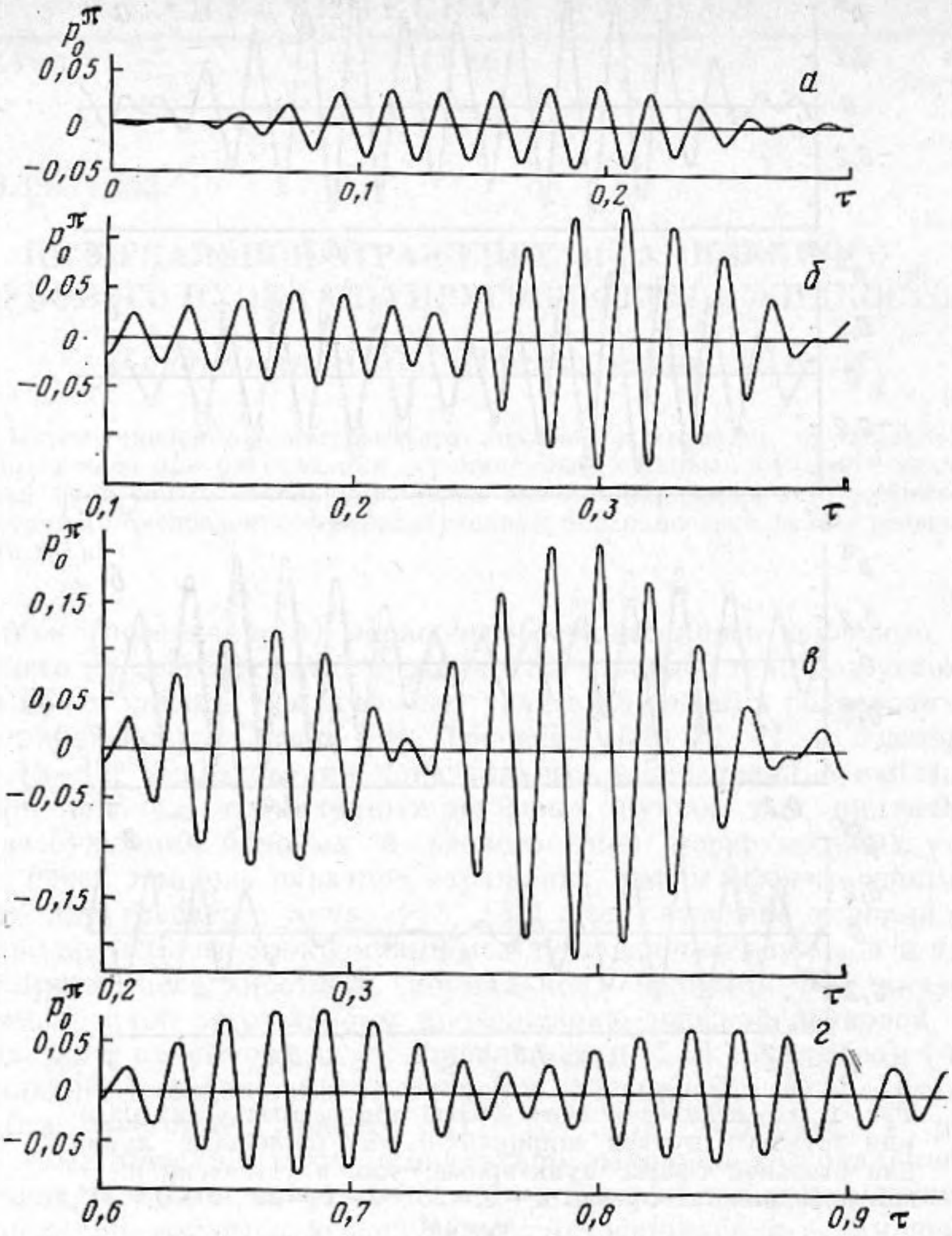

Рис. 2. Эхосигналы от стальной сферы с вычетом «жесткого фона» (обозначения те же)

Подсчеты на основе формул (2)—(5) проводились для локационного направления $\theta=180°$ при $r\gg a$. Частота заполнения импульса посылки ω_0 отвечает резонансу возбуждения рэлеевской волны при фиксированном угловом моменте $l=l_R$ для стальной сферы ($c_L=6100$ м/с, $c_T=3280$ м/с, $\rho_s=7700$ кг/м^3) в воде ($c=1410$ м/с, $\rho=1000$ кг/м^3), который устанавливается путем анализа парциальных амплитуд рассеяния с выделением фонового (акустически жесткого) вклада [33]. Здесь c_L, c_T — скорости распространения продольной и поперечной волн в материале сферы, ρ_s, ρ — плотности твердой и жидкой сред соответственно. На рис. 1 приведены относительные амплитуды давлений $p^\pi=p_{sc}(r, \pi, t)(r/a)$ $(r\gg a)$, вычисленные при $x_0=314{,}40$, $\tau_0=0{,}04$, $l_R=146$ $(x_0=k_0a$, $k_0c=\omega_0$, $\tau_0=ct_0/a)$ и для разных углов падения. Импульс посылки выбран высокочастотным и кратковременным, содержащим всего два периода синусоиды, для того, чтобы отличить вклады излучения волн от краевых линий звукового кольца на сфере. Отсчет времени τ в безразмерном виде ведется с момента касания плоскостью фронта волны поверхности сферы в ее полюсе $r=a$, $\theta=\pi$.

Анализ проведенных графиков показывает, что из-за дифракционных эффектов короткий импульс в процессе отражения сильно расползается во времени. При небольших прицельных углах θ_i ($\theta_i=20°$) звуковые импульсы, излученные краевыми точками волнового пучка на сфере, перекрываются, образуя волновой пакет. С увеличением θ_i расстояние между

проекциями этих точек на акустическую ось излучателя увеличивается, а сами точки все дальше отступают от наблюдателя. Поэтому рассеянный волновой пакет постепенно разъединяется на два пакета, уровень огибающих которых с ростом θ_i уменьшается. Вычисления показывают, что такое разделение звуковых импульсов происходит как на жесткой, так и на упругой сферах. Однако для упругой сферы характерны некоторые особенности. При углах падения, отличных от критических углов полного внутреннего отражения, аналогия между эхоимпульсами, рассеянными жесткой и упругой сферами, еще наблюдается (рис. 1, *а*, *г*). Попадание звуковых лучей на поверхность упругого рассеивателя в области критических углов резко меняет структуру переизлученных волновых пакетов. Для стальной сферы угол возбуждения рэлеевских волн $\theta_R=\arcsin(l_R/x_0)\approx \approx 27{,}4°$. Озвучивание под углом $\theta_i=27°$ приводит к резкому уменьшению амплитуды второго волнового пакета (рис. 1, *б*), что связано с несовпадением фаз излучения рэлеевских волн и краевых волн внешней окружности звукового кольца на сфере $\theta_i^+=31°$. Падение звукового пучка с прицельным углом $\theta_i=32°$ сопровождается аналогичным уменьшением амплитуды первого волнового пакета и увеличением амплитуды несколько задержанного во времени ($\Delta\tau\approx 0{,}002$) второго волнового пакета (рис. 1, *в*). Эффект замедления обусловлен прохождением фронта волны от критической точки $\theta=\pi-\theta_R$ до краевой точки пучка $\theta=\pi-\theta_i^+$ со скоростью рэлеевской волны и дальнейшим излучением краевой волны. Явление усиления звуковых импульсов, переизлученных поверхностными упругими волнами, отчетливо наблюдается при выделении из упругого рассеяния «жесткого фона». Это иллюстрируют графики для разности амплитуд давления $p_0{}^\pi=p^\pi-p^\pi|_{\rho_s=\infty}$ ($r\gg a$) (рис. 2), полученные при всех прежних параметрах.

Таким образом, теоретически устанавливается существование эффекта незеркального (обратного) рассеяния ограниченных звуковых пучков и в случае криволинейной границы раздела жидкость — упругое твердое тело.

Приведенные на рис. 1, 2 эхосигналы малы по амплитуде из-за недостаточной продолжительности падающего сигнала. Применение длинных посылок позволяет лучше удовлетворить условия синхронизма (резонансного возбуждения). Это означает, что спектральная линия падающего импульса будет соизмерима по ширине со спектральной линией отклика и тем самым будет выполняться режим квазистационарного рассеяния [33]. На рис. 3 представлен эхосигнал, вычисленный при $\theta_i=27°$ и продолжительном озвучивании на частоте, отвечающей парциальному рэлеевскому резонансу, имеющему место при $l=l_R=145$. В пределах временного интервала $\tau\leqslant 5$ четко выделяются два волновых пакета. Аналогичные вычисления при других параметрах удара опорных лучей пучка, отличных от рэлеевского, показали, что первый волновой пакет соответствует суперпозиции импульсов с характерными биениями, излученных краевыми линиями звукового кольца на поверхности сферы. Сравнение со случаем жесткой сферы показало, что этот сигнал соответствует рассеянию от объекта, как от недеформируемого, второй же — слабо возбужденным рэлеевским импульсам, обогнувшим один раз поверхность сферы (задержка во времени $\Delta\tau\approx 2{,}48$). Причем, если падение лучей пучка докритическое, то формирование второго эхоимпульса осуществляется также за счет переотраженных один раз на тыльной поверхности проходящих волн, деструктивно интерферирующих со слабыми рэлеевскими. Эффект незеркального отражения проявляется при падении ограниченного звукового пучка вблизи рэлеевского угла (фиг. 3). Амплитуда импульса рэлеевского типа практически совпадает с резонансным уровнем соответствующей линии спектра отклика, поэтому вторичный импульс значительно усилен. Что касается первого волнового пакета, то его усиление происходит еще и в силу конструктивной суперпозиции рэлеевской волны с волнами, излученными краевыми линиями звукового кольца на сфере. По времени поступления незеркального отражения, которое можно определить с большой точностью либо изменением ширины пучка, либо

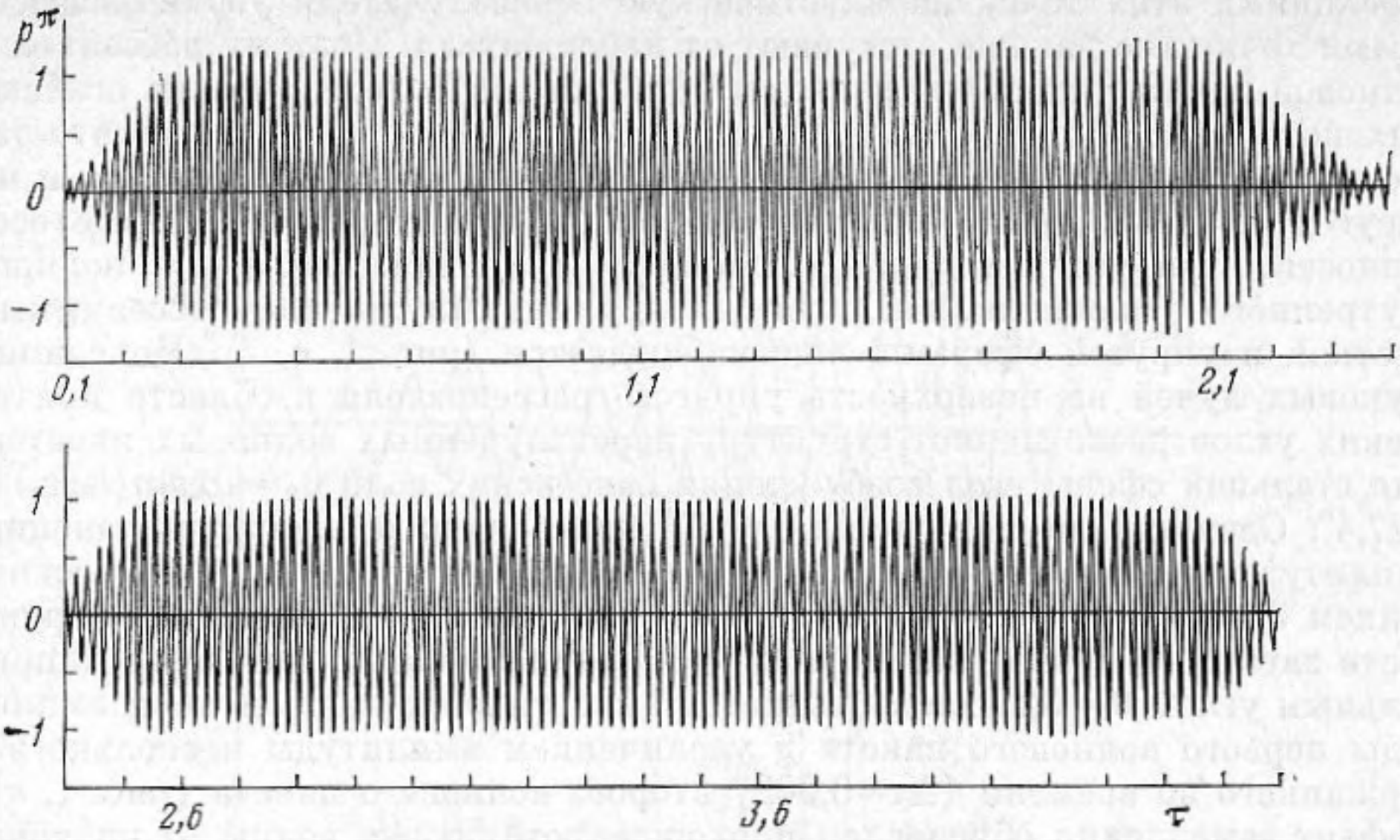

Рис. 3. Вклад квазиустановившегося незеркального отражения при x_0= =314,16, τ_0=2, θ_i=27°, θ_0=8°

выделением фонового рассеяния от объекта как от акустически непроницаемого, восстанавливается критический угол, а следовательно, и скорость распространения поверхностной волны на упругой сфере.

В заключение отметим, что аналогичным образом можно выделить незеркальные отражения ограниченных звуковых пучков, рассеянных упругодеформируемыми объектами в жидкости, внутреннее строение которых более сложно (толстостенные и тонкостенные оболочки с вакуумом, или заполненные акустической жидкостью), а форма отлична от сферической.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sasaki S.* Back reflection of ultrasonic wave obliquely incident to solid surface in water // Japan. J. Phys. 1963. V. 2. № 3. P. 198.
2. *Петухов Ю. В.* Угловая зависимость амплитуды вытекающей волны, возбуждаемой при отражении сферического ультразвукового пучка от плоской границы раздела жидкость – твердое тело // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 5. С. 701–703.
3. *Bertoni H. L., Tamir T.* Unified theory of Rayleigh-angle phenomena for acoustic beam at liquid-solid interface // Rev. Progr. Quant. Nondestr. Eval.: Proc. 9 Annu. Rev. San Diego. Calif., 1–6 Aug., 1982. N. Y., 1983. V. 2B. P. 883–895.
4. *Kundu Tribikram.* On the nonspecular reflection of bounded acoustic beams // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 83. № 2. P. 18–24.
5. *Norris A. N.* The influence of beam type on the back reflection of ultrasonic beams from a liquid-solid interface // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 76. № 2. P. 629–631.
6. *Pitts L. E., Plona T. J., Mayer W. G.* Theory of nonspecular reflection effects for an ultrasonic beam incident on a solid plate in liquid // IEEE. Trans. Sonics and Ultrasonics. 1977. V. 24. № 2. P. 101–109.
7. *Rousseau M., Gatignol P.* Asymptotic analysis of nonspecular effects for the reflection and the transmission of a Gaussian acoustic beam incident on a solid plate // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 80. № 1. P. 325–332.
8. *Diachok O. J., Mayer W. G.* Conical reflection of ultrasound from a liquid-solid interface // J. Acoust. Soc. Amer. 1970. V. 47. N 1. Pt 2. P. 155–157.
9. *Chimenti D. E., Nayfeh A. H.* Leaky Rayleigh waves at a layered halfspace fluid interface // Ultrason. Symp. Proc., Chicago, Ill. Oct. 14–16, 1981. V. 1. N. Y., 1981. P. 291–294.
10. *Neubauer W. G.* Underwater acoustic reflection by bodies and surfaces: what has been done, is being done, and what needs doing.– One man's view // Elastic Wave Scattering and Propagation // Ed. Varadan V. K., Varadan V. V. Ann. Arbor. Mich. 1982. P. 3–20.
11. *De Billy M., Adler L., Quentin G.* Measurements of backscattered leaky Lamb waves in plates // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 75. № 3. P. 998–1001.
12. *De Billy M., Quentin G., Bolland K., Adler L.* Surface wave velocity measurement on cubic crystals from Rayleigh angle backscattering // Acustica. 1986. V. 60. № 2. P. 169–171.
13. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

14. *Годин О. А., Прокопюк И. В.* К теории смещения ограниченных волновых пучков при отражении // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 2. С. 178–185.
15. *Makarov W. I., Rshevkin S. N.* Untersuchungen der Schallausbreitung in festen Körpern, Platten und Schalen mittels eines optischen Verfahrens und Dunkelfeld // Proc. 3rd Int. Cong. Acoustics. Stuttgart. 1959. V. 1. Amsterdam e. a.: Elsevier Publ. Co., 1961. P. 398–401.
16. *Шендеров Е. Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 348 с.
17. *Fay R. D.* Interactions between a plate and a sound field // J. Acoust. Soc. Amer. 1948. V. 20. № 5. P. 620–625.
18. *Finney W. J.* Reflection of sound from submerged plates // J. Acoust. Soc. Amer. 1948. V. 20. № 5. P. 626–637.
19. *Лямшев Л. М.* Отражение звука тонкой пластинкой в воде // Докл. АН СССР. 1954. Т. 99. № 5. С. 719–721.
20. *Лямшев Л. М.* Дифракция звука на тонкой ограниченной пластинке в жидкости // Акуст. журн. 1955. Т. 1. № 2. С. 138–143.
21. *Лямшев Л. М.* Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 73 с.
22. *Лямшев Л. М.* Незеркальное отражение звука тонкими ограниченными пластинками в жидкости // Acta phys. Acad. sci. hung. 1956. V. 6. № 1. P. 33–65.
23. *Rumerman M. L.* Nonspecular acoustic backscattering from finite plates // J. Acoust. Soc. Amer. 1979. V. 65. № 5. P. 1121–1126.
24. *Лямшев Л. М.* Незеркальное отражение звука тонкой цилиндрической оболочкой // Акуст. журн. 1956. Т. 2. № 2. С. 188–193.
25. *Лямшев Л. М., Рудаков С. Н.* Отражение звука толстыми ограниченными пластинками в жидкости // Акуст. журн. 1956. Т. 2. № 2. С. 228–230.
26. *Лямшев Л. М.* К теории рассеяния звука тонким стержнем // Акуст. журн. 1956. Т. 2. № 4. С. 358–365.
27. *Лямшев Л. М.* Дифракция звука на тонкой ограниченной упругой цилиндрической оболочке // Докл. АН СССР. 1957. Т. 115. № 2. С. 271–273.
28. *Лямшев Л. М.* Рассеяние звука тонким ограниченным стержнем // Акуст. журн. 1958. Т. 4. № 1. С. 51–58.
29. *Лямшев Л. М., Рудаков С. Н.* Экспериментальное исследование незеркального отражения звука тонкими ограниченными стержнями в воде // Акуст. журн. 1958. Т. 4. № 3. С. 283–285.
30. *Лямшев Л. М.* Рассеяние звука упругими цилиндрами // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 1. С. 58–63.
31. *Лямшев Л. М.* Способ измерения скорости звука в непрозрачных твердых, жидких и газообразных средах: А. с. № 116843 СССР // Б. И. 19.01.59.
32. *de Billy M., Quentin G., Adler L.* Backscattering of a bounded ultrasonic beam at Rayleigh angle from plane and curved liquid-solid interfaces // Ultrason. Int. 83: Conf. Proc., Halifax, 12–14 July, 1983. Borough Green, Sevenoaks. 1983. P. 254–258.
33. *Подстригач Я. С., Поддубняк А. П.* Рассеяние звуковых пучков на упругих телах сферической и цилиндрической формы. Киев: Наук. думка, 1986. 262 с.

Институт прикладных проблем
механики и математики
Академии наук УССР

Поступила в редакцию
13.V.1988