АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VIII 1962 Вып. 4

РЕЛЬЕФНО-ЕМКОСТНЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

В. В. Богородский, В. Н. Романов

Рассматривается возможность измерения интенсивности ультразвука по деформации в свободной поверхности жидкости или границы раздела двух несмешивающихся жидкостей при падении на поверхность или на границу раздела ультразвукового пучка. Давление акустической радиации на поверхность раздела приводит к появлению на ней рельефа, который изменяет емкость конденсатора, образованного некоторым электродом и возмущенной поверхностью жидкости или границей раздела жидкостей.

Известно, что при работе ультразвукового излучателя в жидкой среде, в зоне падения ультразвукового пучка на свободную поверхность жидкости, на последней возникает стационарный рельеф; этот рельеф особенно четко проявляется при нормальном падении ультразвукового пучка на поверхность. При увеличении интенсивности ультразвука высота рельефа увеличивается, и при некотором пороговом значении мощности стационарность рельефа нарушается, и возникает так называемый ультразвуковой фонтан. Аналогичный рельеф возникает и при падении ультразвукового пучка на границу раздела двух несмешивающихся жидкостей.

Стационарность рельефа при постоянной интенсивности ультразвукового пучка и монотонная зависимость высоты рельефа от интенсивности позволяет осуществить измерение интенсивности ультразвукового пучка на основании измерения высоты рельефа на поверхности рельефа [1]. В частности, сконструировав измерительную ячейку в виде конденсатора, в котором выпуклый рельеф проводящей жидкости является одним из электродов, можно, принципиально говоря, определять интенсивность звука на основании измерения емкости упомянутого конденсатора. Преимущество такого способа измерения, который мы будем в дальнейшем называть рельефно-емкостным, заключается в том, что измерительная ультразвуковая ячейка — датчик может быть сделана практически прозрачной для ультразвукового пучка.

Деформация поверхности жидкости при падении ультразвукового пучка на границу раздела жидкость — воздух или на границу раздела двух несмешивающихся жидкостей вызывается рядом причин — в первую очередь постоянным давлением акустической радиации, а также акустическими течениями и тому подобное. Для приближения оценки чувствительности рассматриваемого способа измерения мы будем учитывать только радиационное давление, являющееся основным действующим фактором; учет влияния акустических течений встречает большие математические трудности. Мы предположим, что высота подъема рельефа Z_0 прямо пропорциональна интенсивности ультразвука I_0 у поверхности жидкости:

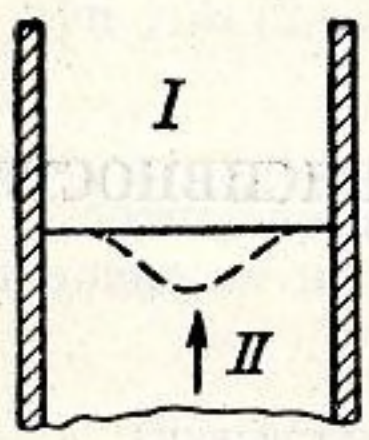
$$Z_0 = AI_0. \tag{1}$$

В работе [2] коэффициент A был определен для случая нормального падения ультразвукового пучка на поверхность раздела. При этом в основу было положено статическое уравнение рельефа в следующем виде:

$$(\alpha_1 - \alpha_2)\nabla z - (\rho_1 - \rho_2)gz = P, \tag{2}$$

где α_1, α_2, ρ_1 и ρ_2 — коэффициенты межфазного натяжения и плотности

двух жидкостей соответственно, ∇ — двухмерный оператор Лапласа в цилиндрической системе координат, z — вертикальная координата, g — ускорение силы тяжести и P — давление ультразвуковой радиации. Если ультразвуковой пучок образован поршневым излучателем и поверхность раздела находится на границе ближней и дальней зон ультразвукового поля, то для случая образования рельефа на границе жидкость — воздух аналитическое выражение для коэффициента A имеет следующий вид:



Фиг. 1

$$A = \frac{2}{\rho g c}\left\{\frac{4a_0}{\sigma} K_1\left(\frac{\sigma}{a_0}\right) + 2K_0\left(\frac{\sigma}{a_0}\right) + 1 - \frac{4a_0^2}{\sigma^2}\right\}, \quad (3)$$

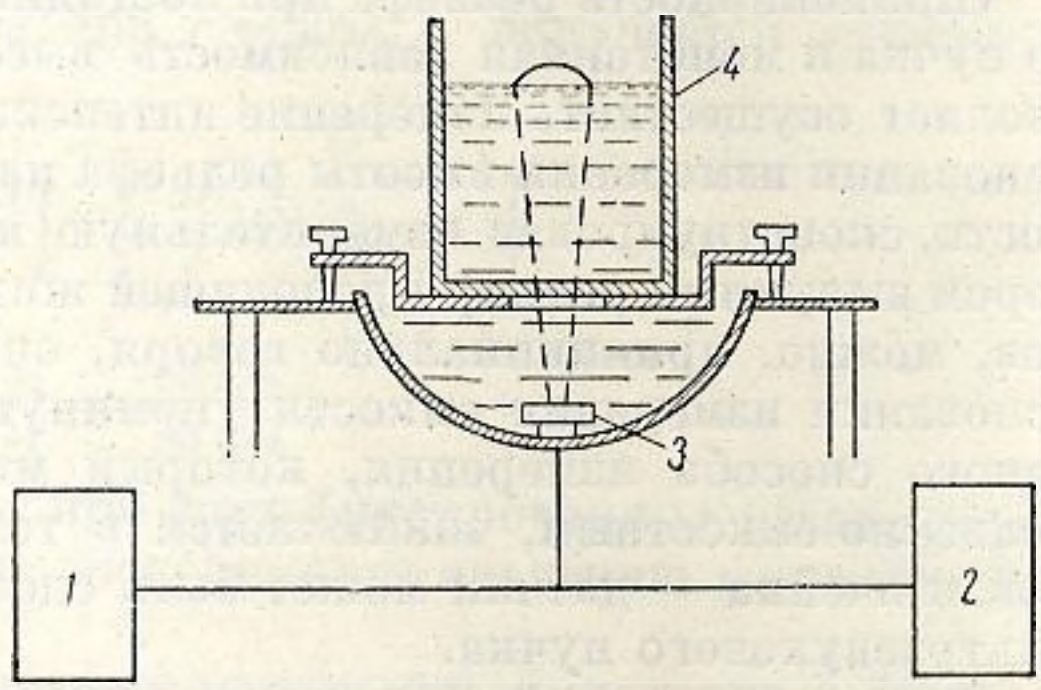
где $\frac{1}{a_0} = \frac{8}{ka}\sqrt{R^2 + a^2}$, k — волновое число, a — радиус излучателя, c — скорость звука в жидкости, K_1 и K_0 — видоизмененные функции Бесселя 2-го рода.

В том случае, когда ультразвуковой пучок падает на границу раздела двух несмешивающихся жидкостей (фиг. 1), высота рельефа будет определяться выражением:

$$Z_{20} = -\frac{I_0}{(\rho_1 - \rho_2) g c_2}\left[1 - \frac{c_2}{c_1} + \gamma^2\left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)\right]\left[\frac{4a_0}{\sigma} K_1\left(\frac{\sigma}{a_0}\right) + 2K_0\left(\frac{\sigma}{a_0}\right) + 1 - \frac{4a_0}{\sigma^2}\right], \quad (4)$$

где c_1 и c_2 — скорости звука в жидкостях I и II соответственно, $\sigma^2 = \frac{(\rho_1 - \rho_2) g}{\alpha_1 - \alpha_2}$ и γ — коэффициент отражения звука (по амплитуде) на границе при нормальном падении. Остальные обозначения прежние. Выражение (4) упрощается при условии $\sigma / a_0 \gg 1$, которое справедливо для относительно низких частот. Учитывая, что $k_1(x) \to 0$ при $x \to \infty$ и $k_0(x) \to 0$ при $x \to \infty$ и пренебрегая величиной $4a_0^2/\sigma^2$ по сравнению с единицей, мы получаем приближенно

$$Z_{20} = -\frac{I_0}{(\rho_1 - \rho_2) g c_2} \times \left[1 - \frac{c_2}{c_1} + \gamma^2\left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)\right]. \quad (5)$$

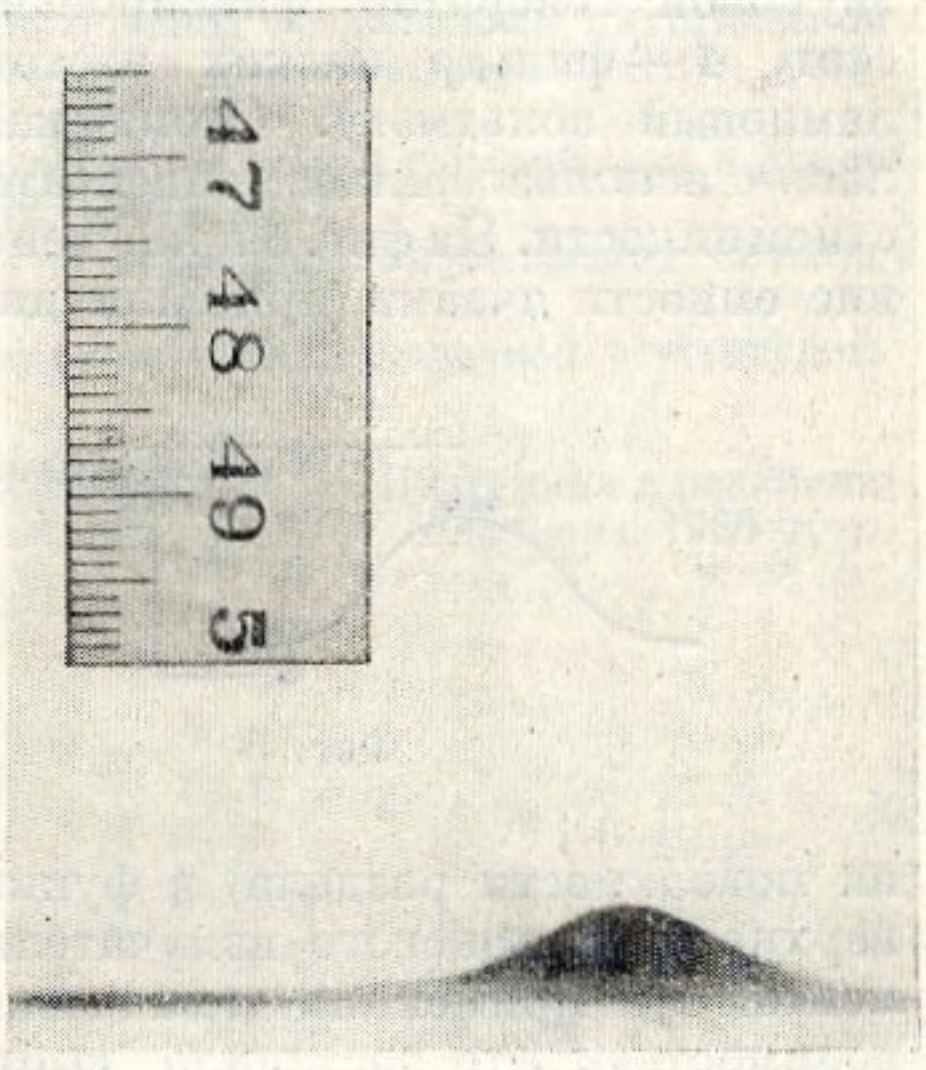


Фиг. 2

Экспериментальная проверка формулы (1) производилась нами для случаев жидкость — воздух и жидкость — жидкость (дистиллированная вода — анилин).

Определение высоты подъема рельефа на границе жидкость — воздух Z_{10} производилось на установке, показанной схематически на фиг. 2, где *1* — генератор ультразвуковых частот, *2* — ламповый вольтметр, *3* — кварцевый излучатель с диаметром излучающей поверхности 4,4 *см* и *4* — плексигласовая кювета, наполненная подсоленной дистиллированной водой. Высота рельефа определялась путем фотографирования его совместно с масштабной шкалой. Для того чтобы краевой угол жидкости со стенками кюветы был близок к 90°, стенки предварительно обрабатывались димитилдихлорсиланом. На фиг. 3 приведена одна из фотографий рельефа на границе дистиллированная вода — воздух. В данном случае расстояние от кварцевого излучателя до невозмущенной поверхности жидкости было равно $z = 30$ *см*, частота ультразвука составляла 720 *кгц*, напряжение на кварце — 1,5 *кв*.

При опытах интенсивность у поверхности кварца, находящегося в трансформаторном масле, вычислялась по формуле $I_0 = 1{,}13\, f^2\, мггц \cdot v^2\, кв_{эфф}$ (см. [3]). Максимальное значение интенсивности у поверхности жидкости рассчитывалось с учетом выводов работы [4]. В опыте, отвечающем фиг. 3, интенсивность у поверхности жидкости (дистиллированная вода) составляла 4,59 *вт/см*^{2}.

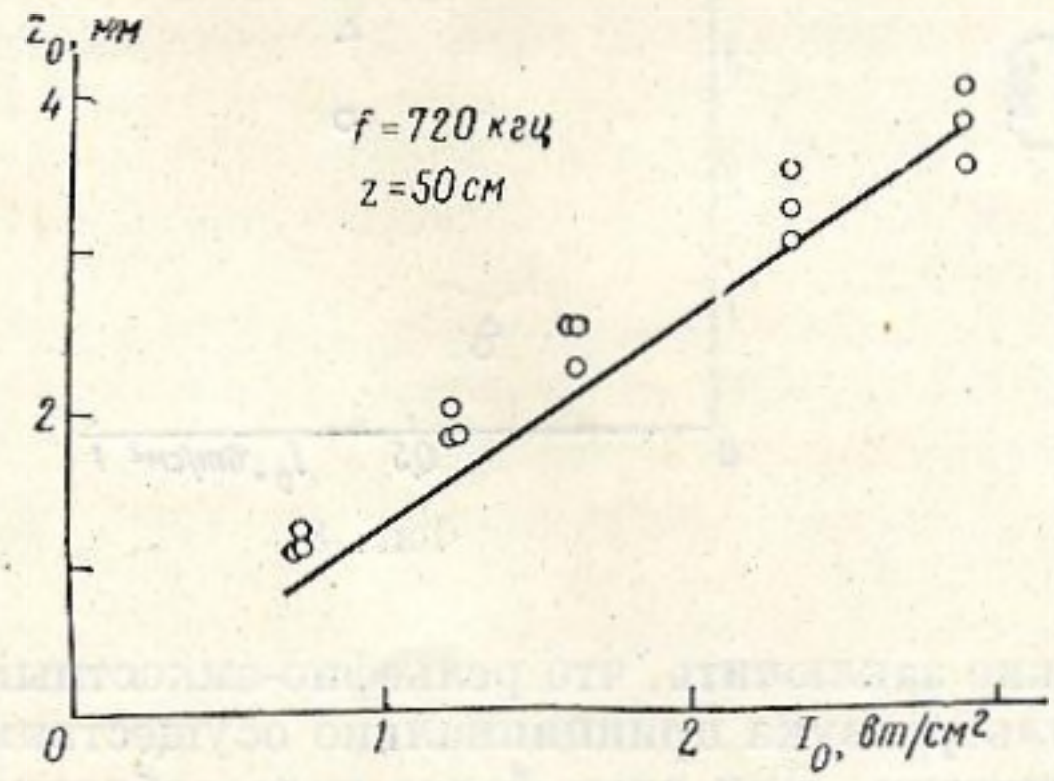


Фиг. 3

Экспериментальная установка позволяла измерять высоту рельефа при акустической мощности от десятых долей *вт/см*^{2} до нескольких *вт/см*^{2}. Нижний предел обусловливался невозможностью наблюдения рельефа из-за малой высоты, верхний — возникновением ультразвукового фонтана.

Проведенные опыты показали, что формула (1) приближенно справедлива; расхождение между расчетными и экспериментальными значениями высоты подъема рельефа не превышало 15—20% (см. фиг. 4, где сплошная линия — теория, кружки — экспериментальные данные).

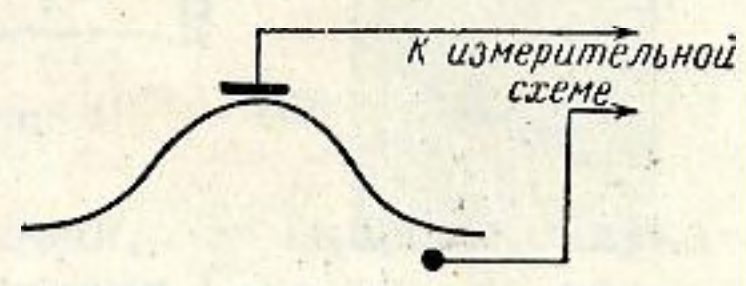
При экспериментальном опробовании рельефно-емкостного способа измерения интенсивности ультразвука, над свободной поверхностью жидкости в опытной установке располагался плоский электрод (фиг. 5). При измерении интенсивности от 2 до 8,1 *вт/см*^{2} емкость конденсатора, образованного этим плоским электродом и поверхностью рельефа проводящей жидкости, изменялась от 0,2 до 2,3 *пкф*.



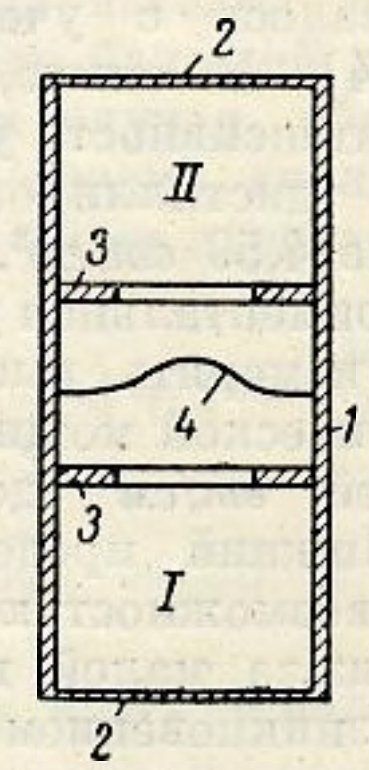
Фиг. 4

Следует заметить, что при больших значениях интенсивности высота рельефа растет медленнее, чем это следует из формулы (1), вследствие существенного возрастания поглощения из-за искажения формы волны [5]. Как показывает расчет, при частоте 720 *кгц* (интенсивность у поверхности кварца 8 *вт/см*^{2} и при расстоянии от кварца до поверхности жидкости 30 *см*) уменьшение давления радиации вследствие указанного эффекта составляет 30%. В действительности эта погрешность была при опытах существенно меньше, так как расстояние от кварца до поверхности жидкости (30 *см*) было меньше расстояния стабилизации (34—46 *см*) [6]. При опытах с двумя жидкостями ультразвуковая измерительная ячейка была выполнена конструктивно в форме, показанной на фиг. 6, где *1* — корпус ячейки, *2* — тонкие пленки, *3* — металлические кольцевые электроды, *4* — рельеф на поверхности раздела жидкостей *I* и *II*. Из формулы (5) видно, что для получения максимальной чувствительности надо выбирать жидкости с близкими плотностями, но с большим различием скоростей звука. При этом коэффициент отражения должен быть малым. По этим соображениям в качестве жидкостей *I* и *II* нами были выбраны анилин и вода соответственно.

Измерение емкости конденсатора, образованного электродами *3* при наличии жидкости выполнялось с помощью электронной схемы, показанной на фиг. 7, где c_x — измеряемая емкость ультразвуковой ячейки, *1* — гетеродин, *2* — смеситель, *3* — ультразвуковой генератор фиксированных частот, *4* — фильтр низких частот и *5* — ламповый вольтметр. Схема калибровалась с использованием конденсатора известной емкости. На фиг. 8 приведено изменение емкости ячейки (при наличии рельефа

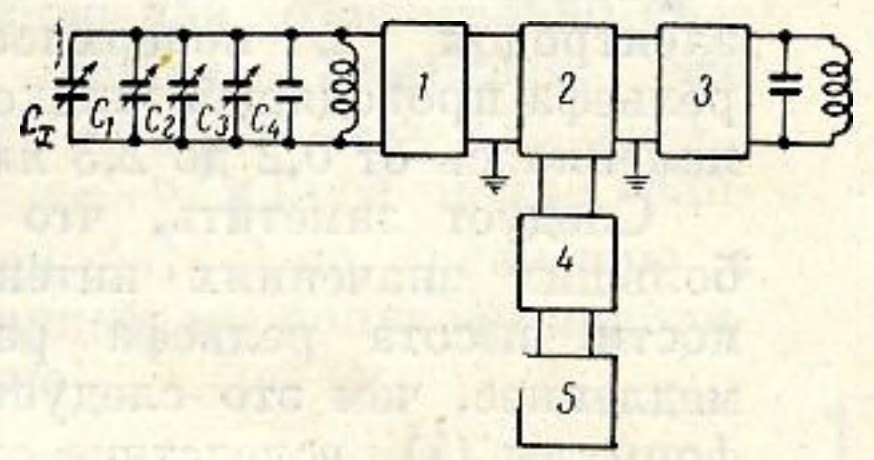


Фиг. 5

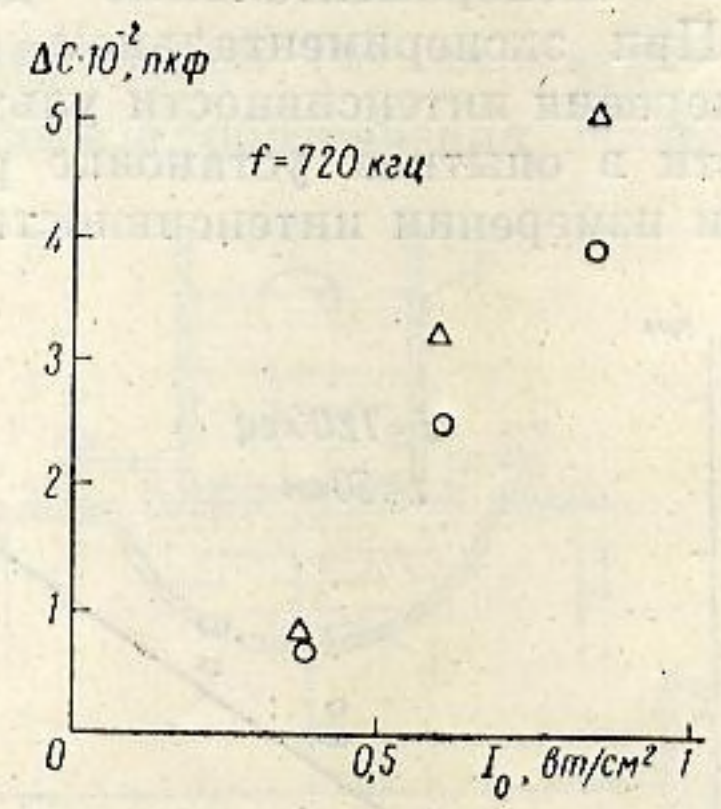


Фиг. 6

на поверхности раздела) в функции интенсивности ультразвука у поверхности кварцевого излучателя. Следует заметить, что при экспериментах мы применяли технический анилин, обладавший заметной проводимостью. Это заставило выбрать относительно большое расстояние между электродами, что в свою очередь существенно уменьшило чувствительность ячейки. Тем не менее очевидно, что и в случае использования двух жидкостей по изменению емкости ячейки можно определить высоту поверхностного рельефа, а, следовательно, и относительную интенсивность ультразвукового пучка.



Фиг. 7



Фиг. 8

На основании изложенного можно заключить, что рельефно-емкостный способ измерения интенсивности ультразвука принципиально осуществим и может быть использован практически. При этом более целесообразно использовать измерительную ячейку с двумя жидкостями. Действительно, при использовании границы раздела жидкость — воздух данный способ измерения обладает существенными недостатками, главными из которых являются влияние отраженного пучка на излучатель ультразвука, искажение ультразвукового пучка и относительно меньшая чувствительность. Использование ультразвуковой ячейки с двумя несмешивающимися жидкостями эти недостатки устраняет. Применение жидкостей с соответствующими параметрами позволит при этом получить бо́льшие изменения емкости ячейки, чем это следует из фиг. 8, т. е. увеличить чувствительность измерительной установки. Общим недостатком описанного способа измерения является невозможность измерения интенсивности в невертикальных ультразвуковых пучках.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Богородский, Е. Д. Пигулевский, В. Г. Прохоров. Способ измерения интенсивности ультразвука в жидкостях. Авт. свид. № 12092.
2. В. В. Богородский, В. Н. Романов. Исследование поверхностного рельефа на поверхности жидкости, находящейся под воздействием акустической радиации. Отчет. Арктический и антарктический н.-и. институт ГУСМП, 1960.
3. Л. Бергман. Ультразвук. М., ИЛ, 1957, стр. 115.
4. A. Carter, A. Williams. A new exposition for velosity potential of a piston source. J. Acoust. Soc. America, 1951, 23, 12, 179—184.
5. Е. В. Романенко. Экспериментальное исследование акустических потоков в воде. Акуст. ж., 1960, 1, 1, 90—95.
6. К. А. Наугольных. О поглощении звуковых волн конечной амплитудой. Акуст. ж., 1958, 4, 2, 115—124.

Арктический и антарктический н.-и. институт
Ленинград

Поступила в редакцию
26 июля 1960 г.