

Итак, проведенный анализ показал, что в благоприятной для измерений области частот влияние потерь в пьезопластинах на суммарные потери резонатора невелико и несмотря на то, что закрепленные пьезопластины даже в прецизионных резонаторах имеют невысокую собственную добротность, удается получить добротность резонансных пиков в резонаторе порядка $3 \cdot 10^4$. Влияние потерь в пьезопластинах особенно велико при измерениях на частотах, близких к ω_n , и при измерениях без эталонной жидкости. Значительно меньшую погрешность потери в пьезопластинах вносят в результаты измерений с использованием эталонных жидкостей. Исключить или уменьшить эти погрешности можно с помощью формул (9) и (10).

ЛИТЕРАТУРА

1. Eggers F. Eine Resonatormethode zur Bestimmung von Schall-Geschwindigkeit und Dämpfung an geringen Flüssigkeitsmengen.— *Acustica*, 1967–1968. v. 19, № 6, p. 323–328.
2. Эггерс Ф., Функ Т. Ультразвуковые измерения на жидких образцах объемом порядка миллилитра в диапазоне частот 0,5–100 МГц.— *Приборы для научных исследований*, 1973, т. 44, № 8, с. 38–47.
3. Pethrick R. A., Wyn-Iones E. An ultrasonic resonance technique operating in the frequency range 200 kHz to 30 MHz and designed for chemical relaxation studies.— *Ultrasonics*, September, 1972, p. 228–230.
4. Сарвазян А. П., Харакоз Д. П. Дифференциальный интерферометр малого объема для измерения скорости и поглощения ультразвука.— *ПТЭ*, 1981, № 3, с. 203–206.
5. Рящиков А. С., Кононенко В. С. Особенности измерения акустических параметров в жидких кристаллах на частотах ниже 1 МГц.— В кн.: *Применение ультразвука к исследованию вещества*. М.: Изд-во Всесоюз. заоч. машиностроительн. ин-та, 1982, вып. 33, с. 131–135.
6. Кононенко В. С. Ультразвуковая дифракция в интерферометре.— В кн.: *Применение ультразвука к исследованию вещества*. М.: Изд-во Всесоюз. заоч. машиностроит. ин-та, 1981, вып. 31, с. 18–20.
7. Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В. Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс: Мокслас, 1983. 144 с.
8. Сарвазян А. П., Саркисов Г. Н. Использование фазочастотной характеристики интерферометра постоянной длины для прецизионных измерений скорости и поглощения ультразвука и фазовые погрешности интерферометра.— В кн.: *Докл. X Всесоюз. акуст. конф. Сек. II*. М.: АКИН, 1983, с. 28–31.

Куйбышевский институт инженеров
железнодорожного транспорта

Поступило в редакцию
27.XI.1984

УДК 534.26+534.8:53.085.332

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН АКУСТИЧЕСКИМ МИКРОСКОПОМ

Кулаков М. А., Морозов А. И.

Метод измерения скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) с помощью акустического микроскопа по зависимости выходного сигнала от расстояния объект — акустическая линза $|\dot{V}(z)|$ [1] может быть применен как к пьезо- так и непьезо-электрическим материалам, не требует больших размеров образца и изготовления на нем измерительных преобразователей. Настоящая работа посвящена рассмотрению недостаточно выясненных вопросов использования этого метода.

Функция $|\dot{V}(z)|$ имеет участок характерных осцилляций, период которых Δz зависит от скорости v_R вытекающих ПАВ в образце. В большинстве случаев v_R незначительно ($\sim 0,1\%$) отличается от скорости рэлеевской ПАВ в отсутствие нагрузки поверхности жидкостью [2], поэтому далее не будем делать различия между этими скоростями. В работе [3] в приближении геометрической оптики показано, что в изотропном материале

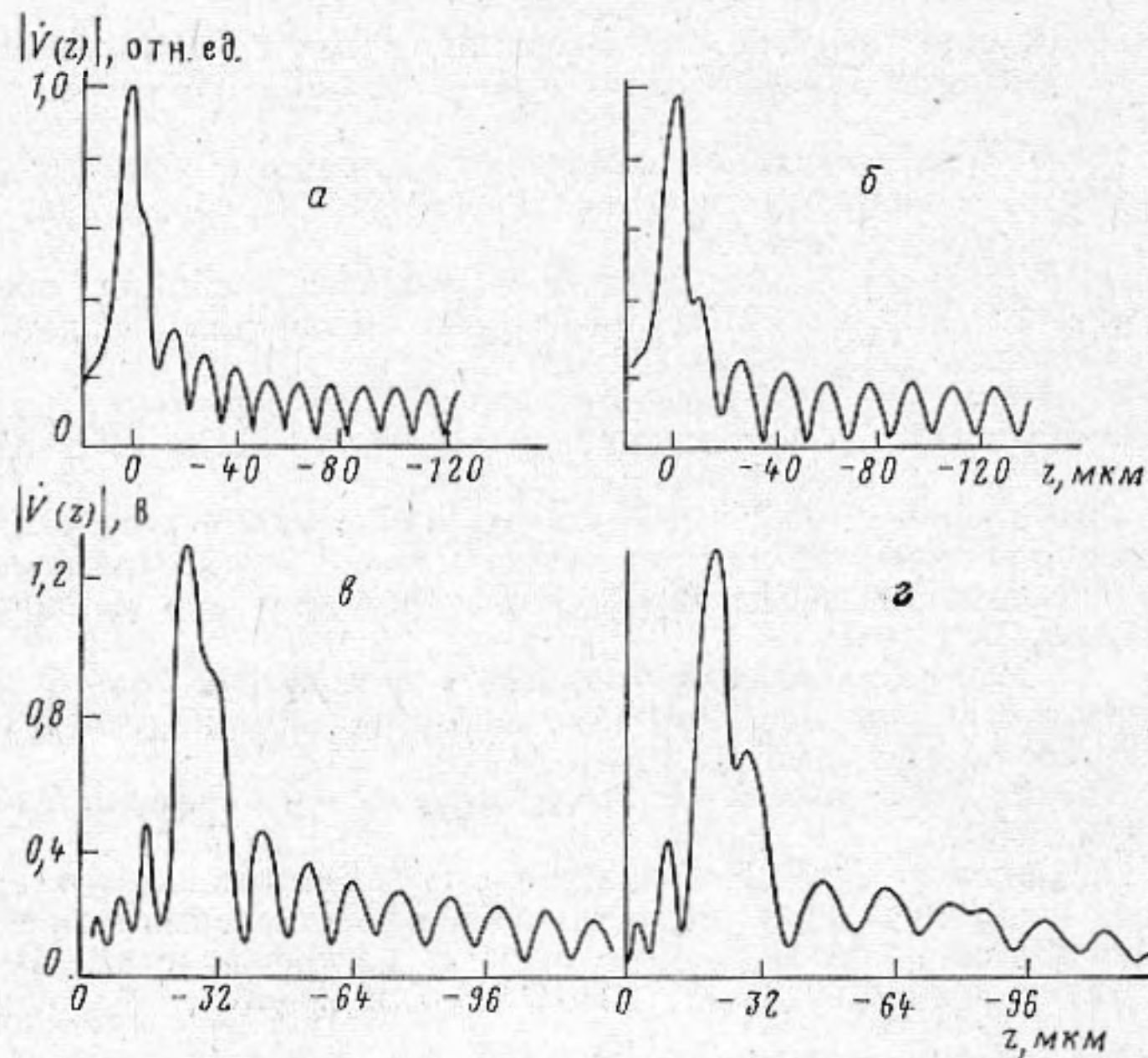
$$\Delta z = \frac{v_{ж}}{2f} \frac{1}{1 - \sqrt{1 - (v_{ж}/v_R)^2}}, \quad (1)$$

где f — частота, $v_{ж}$ — скорость акустических волн в иммерсионной жидкости. В материалах, обладающих анизотропией, период Δz определяется усредненной по всем направлениям в плоскости подложки скоростью ПАВ \bar{v}_R .

Выражение (1) не учитывает характеристик акустического тракта микроскопа, например свойств акустической линзы, что может приводить к ошибочным результатам. Аналитическое выражение для $|\dot{V}(z)|$, учитывающее эти характеристики, было получено в работах [4, 5].

Проведенный нами численный расчет $|\dot{V}(z)|$ с использованием основных результатов работ [4, 5] показал, что, за исключением случаев аподизации преобразователя или линзы, расхождение между значениями Δz , полученными согласно формуле (1) и в соответствии с более строгим подходом, не превышает 0,1%. Это справедливо во всем рассмотренном диапазоне изменения характеристик объекта (скорость \bar{v}_R : $1,5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^3$ м/с, затухание Γ : 10–1000 дБ/мкс) и акустического тракта.

На форму и период $|\dot{V}(z)|$ влияет такая аподизация преобразователя или линзы, при которой существуют области (включающие параксиальную область), где чувствительность преобразователя или функция пропускания линзы равны нулю. На фиг. 1 изображены расчетные и экспериментальные кривые $|\dot{V}(z)|$ для {0001}



Фиг. 1. Расчетные (а, б) и экспериментальные (в, г) зависимости $|\dot{V}(z)|$ для ZnO ($\bar{v}_R = 2,68 \cdot 10^3$ м/с, $\Gamma = 150$ дБ/мкс, $f = 404$ МГц): а — неаподизованная линза, б — аподизованная линза, диаметр изолированной части апертуры 150 мкм, в — неаподизованная линза, г — аподизованная линза, диаметр изолированной части апертуры 125 мкм

плоскости ZnO, полученные при аподизованной линзе. Аподизация осуществлялась нанесением на центральную часть акустической линзы капли эпоксидного компаунда диаметром около 140 мкм, которая практически полностью ослабляла аксиальные лучи. Из фигуры видно, что Δz при этом увеличивается. На практике аподизация преобразователя может возникнуть вследствие его дефектов, а линзы — вследствие ее загрязнения.

Упрощенная схема акустического микроскопа в режиме регистрации $|\dot{V}(z)|$ изображена на фиг. 2. Отличие от обычного режима визуализации состоит в том, что образец сканируется только в направлении z , а сигнал с выхода приемника поступает не на модулятор яркости, а на вход «У» осциллографа.

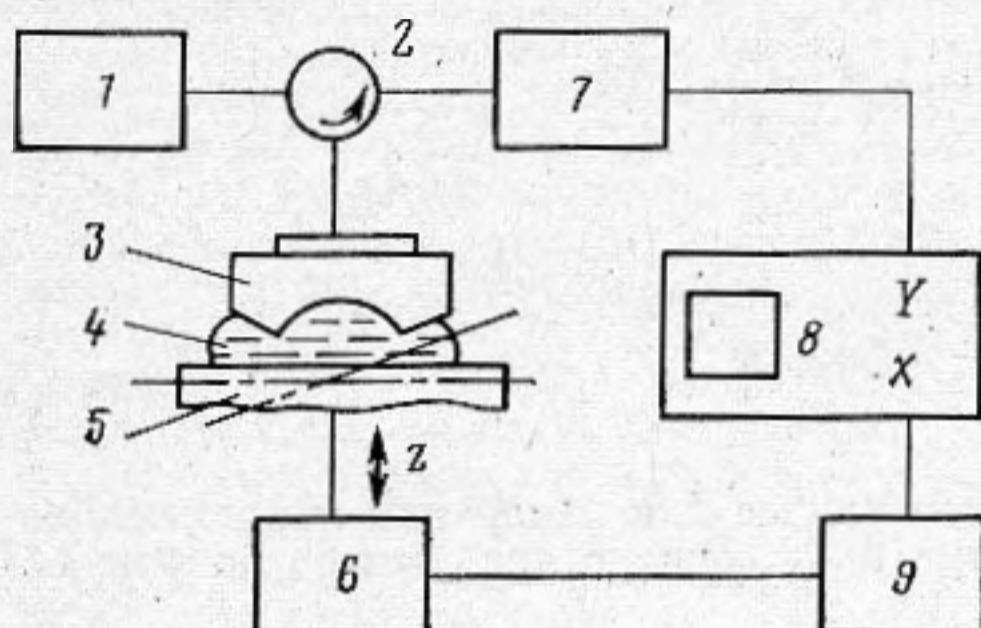
Измерения \bar{v}_R проводились на частотах 400–650 МГц. В качестве иммерсионной жидкости применяли дистиллированную воду или метиловый спирт. Спирт использовался для расширения нижнего предела измеряемых скоростей \bar{v}_R до $1,5 \cdot 10^3$ м/с. Перемещение линзы и отсчет z осуществлялись микрометрическим винтом с точностью $\pm 0,5$ мкм. Результаты измерений для ряда материалов с хорошо изученными свойствами приведены в таблице. Из таблицы видно, что в диапазоне скоростей \bar{v}_R от $1,7 \cdot 10^3$ м/с (CdS) до $5,65 \cdot 10^3$ м/с (Al_2O_3) расхождение с литературными данными в большинстве случаев не превосходит 1% (при измерении Δz по двум и более осцилляциям $|\dot{V}(z)|$). Основным источником случайных ошибок в нашем случае являлась ошибка измерений Δz вследствие ограниченной точности отсчетного устройства перемещения линзы. Источником систематических погрешностей могут быть, как отмечалось выше, некоторые дефекты акустического тракта микроскопа.

Точность измерений зависит также от качества обработки поверхности образца и ее разориентации по отношению к фокальной плоскости линзы. На фиг. 3 приведена зависимость измеренного значения \bar{v}_R от степени непараллельности поверхности и фокальной плоскости линзы. Видно, что вплоть до углов порядка 4° непараллельность практически не сказывается (в пределах точности измерений) на величину \bar{v}_R .

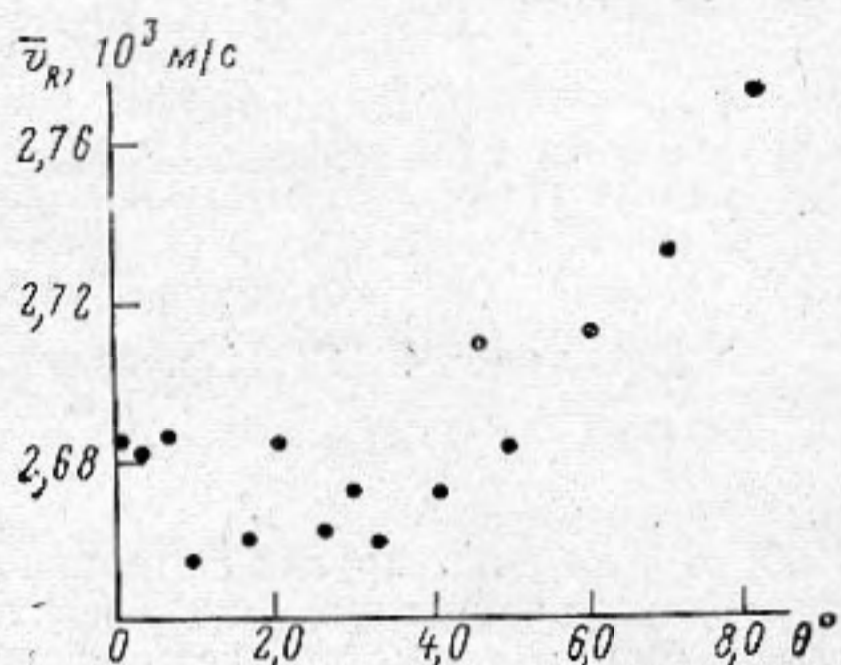
Для выяснения влияния качества обработки поверхности образца скорость \bar{v}_R

измерялась последовательно на полированной и шлифованной абразивами МЗ, М5, М10 поверхностях ZnO и Si. Значения скоростей также приведены в таблице. Видно, что при шлифовке мелким абразивом результаты практически не изменяются. При более грубой поверхности (абразив М10) $|\dot{V}(z)|$ деформируются и измерения на данной частоте становятся невозможными.

Одним из главных достоинств рассматриваемого метода является возможность проведения измерений на малых образцах. Для экспериментальной оценки минимального размера образца скорость ПАВ измерялась на торцах кварцевых волокон различного диаметра. Полученные значения \bar{v}_R для всех образцов хорошо согласу-



Фиг. 2



Фиг. 3

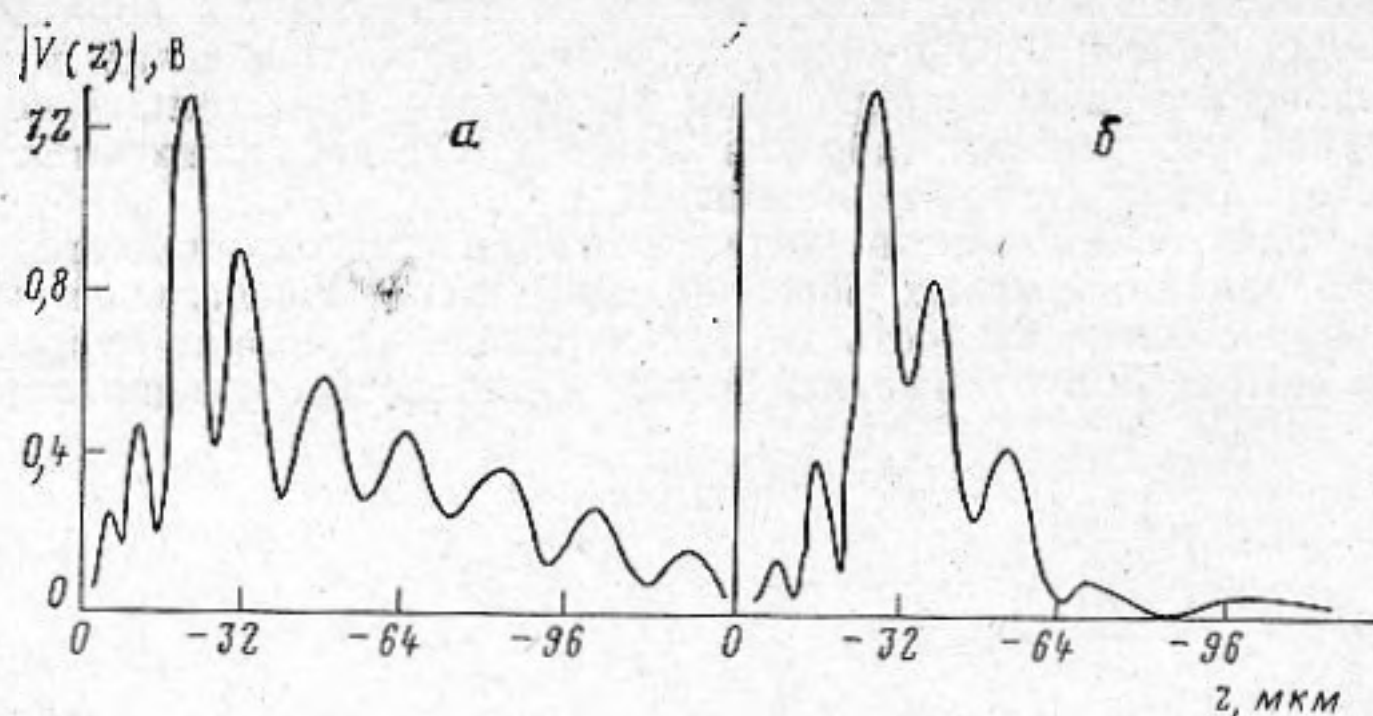
Фиг. 2. Сканирующий акустический микроскоп в режиме регистрации $|\dot{V}(z)|$: 1 — СВЧ-генератор, 2 — циркулятор, 3 — акустический элемент, 4 — иммерсионная жидкость, 5 — объект на карданном держателе, 6 — сканер, 7 — СВЧ-приемник, 8 — осциллограф, 9 — управление сканером и разверткой

Фиг. 3. Зависимость измеренных значений \bar{v}_R от угла установки плоскости объекта

ются с результатами измерений на массивных образцах из того же материала. Из фиг. 4 видно, что при уменьшении диаметра образца количество наблюдаемых осцилляций уменьшалось и несколько изменялась их норма. Исследования показали, что минимальный диаметр образца, необходимый для измерения \bar{v}_R , составляет $\sim 6\lambda_R$, что для большинства материалов составляет ~ 50 мкм на частоте АВ 400 МГц.

Увеличение степени анизотропии исследуемой поверхности приводит к нарушению периодичности осцилляций $|\dot{V}(z)|$ и измерения \bar{v}_R сильно затруднены. С этой ситуацией столкнулись при исследовании $|\dot{V}(z)|$ для GaAs {111}, GdTe {111}, CaF₂

Материал	Кристаллическая плоскость	Измеренное значение $\bar{v}_R, 10^3$ м/с	Литературные данные, 10^3 м/с	Расхождение с литературными данными, %	Примечание
Al ₂ O ₃	{0001}	5,58	5,65	1,2	Измерено по 1 осцилляции $ \dot{V}(z) $
Si	{111}	4,59	4,64	1,0	Массивный образец
Si	{111}	4,63	4,64	0,21	Измерения проводились на поверхности образца в форме треугольника со стороной 250 мкм
Si	{111}	4,6	4,64	0,86	Измерения проводились на поверхности, шлифованной абразивом М5
Плавленный кварц		3,42	3,4	0,6	Массивный образец
		3,44	3,4	1,2	Измерения проводились на торце волокна \varnothing 120 мкм
		3,4	3,4	0,0	Измерения проводились на торце волокна \varnothing 80 мкм
		3,35	3,4	1,5	Измерения проводились на торце волокна \varnothing 50 мкм
ZnO	{0001}	2,68	2,68	0,0	Полированная поверхность
ZnO	{0001}	2,71	2,68	1,1	Измерения проводились на поверхности, шлифованной абразивом МЗ
ZnO	{0001}	2,72	2,68	1,6	То же, М5
CdS	{0001}	1,7	1,712	0,7	Иммерсия метиловым спиртом
CdS	{0001}	4,1	4,17	1,6	Иммерсия водой, осцилляции $ \dot{V}(z) $ вызваны продольными объемными АВ



Фиг. 4. $|V(z)|$, полученные на торцах кварцевых волокон;
а — $\varnothing 120$, б — $\varnothing 50$ мкм

{100} и некоторых других материалов. В этом случае для измерений можно использовать цилиндрическую акустическую линзу [6, 7], однако требуемые размеры образцов при этом заметно увеличиваются.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что на плоских поверхностях микроскопических образцов сканирующим акустическим микроскопом возможны измерения скорости рэлеевской ПАВ в диапазоне $1,7 \cdot 10^3 - 6,0 \cdot 10^3$ м/с с точностью $\approx 1\%$ без жестких требований к элементам акустического тракта и обработке поверхности образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Weglein R. D.* SAW dispersion and film thickness measurements by acoustic microscopy.— *Appl. Phys. Lett.*, 1979, v. 35, № 3, p. 215–217.
2. *Викторов И. А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
3. *Parmon W., Bertony H. L.* Ray interpretation of the material signatures in the acoustic microscope.— *Electron. Lett.*, 1979, v. 15, № 21, p. 684–685.
4. *Atalar A.* An angular spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy.— *J. Appl. Phys.*, 1978, v. 49, № 10, p. 5130–5139.
5. *Atalar A.* A physical model for acoustic signatures.— *J. Appl. Phys.*, 1979, v. 50, № 12, p. 8237–8239.
6. *Березина С. И.* Применение акустического микроскопа к определению ориентационных зависимостей скорости поверхностных акустических волн в кристаллах.— В кн.: XI Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Материалы, ч. I. Душанбе: Дониш, 1981, с. 84–85.
7. *Kushibiki J., Ohkubo A., Chubachi N.* Linearly focused acoustic beams for acoustic microscopy.— *Electron. Lett.*, 1981, v. 17, № 15, p. 520–522.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
30.I.1985

УДК 534.222.2;534.286-14

НЕЛИНЕЙНОЕ ЗАТУХАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПАКЕТА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ЕЕ ВЗВОЛНОВАННОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Павлов В. И., Слабейцус Ю.

Результаты многочисленных экспериментальных работ, посвященных исследованию распространения звука в океане, свидетельствуют о наличии аномально большого затухания звука, значительно превосходящего классическое поглощение в морской воде за счет вязкости (см., например, монографию [1]). Дело в том, что затухание звука в океане — это сложное физическое явление, обусловленное механизмами различной физической природы. К причинам, наиболее существенно влияющим на дополнительное затухание, относятся поглощение и рассеяние звука неоднородностями среды и включениями, релаксационные процессы, взаимодействие звукового поля с внутренними волнами, нелинейное взаимодействие звукового сигнала с низкочастотным акустическим шумом [1–3]. Здесь же следует отметить и механизм затухания, связанный с рассеянием когерентной звуковой волны на случайных поверхностных неоднородностях [3, 4], а также вклад в процессы рассеяния и по-