АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 5

УДК 534.8

ОСЛАБЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МАЛОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЯХ С ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЬКАМИ

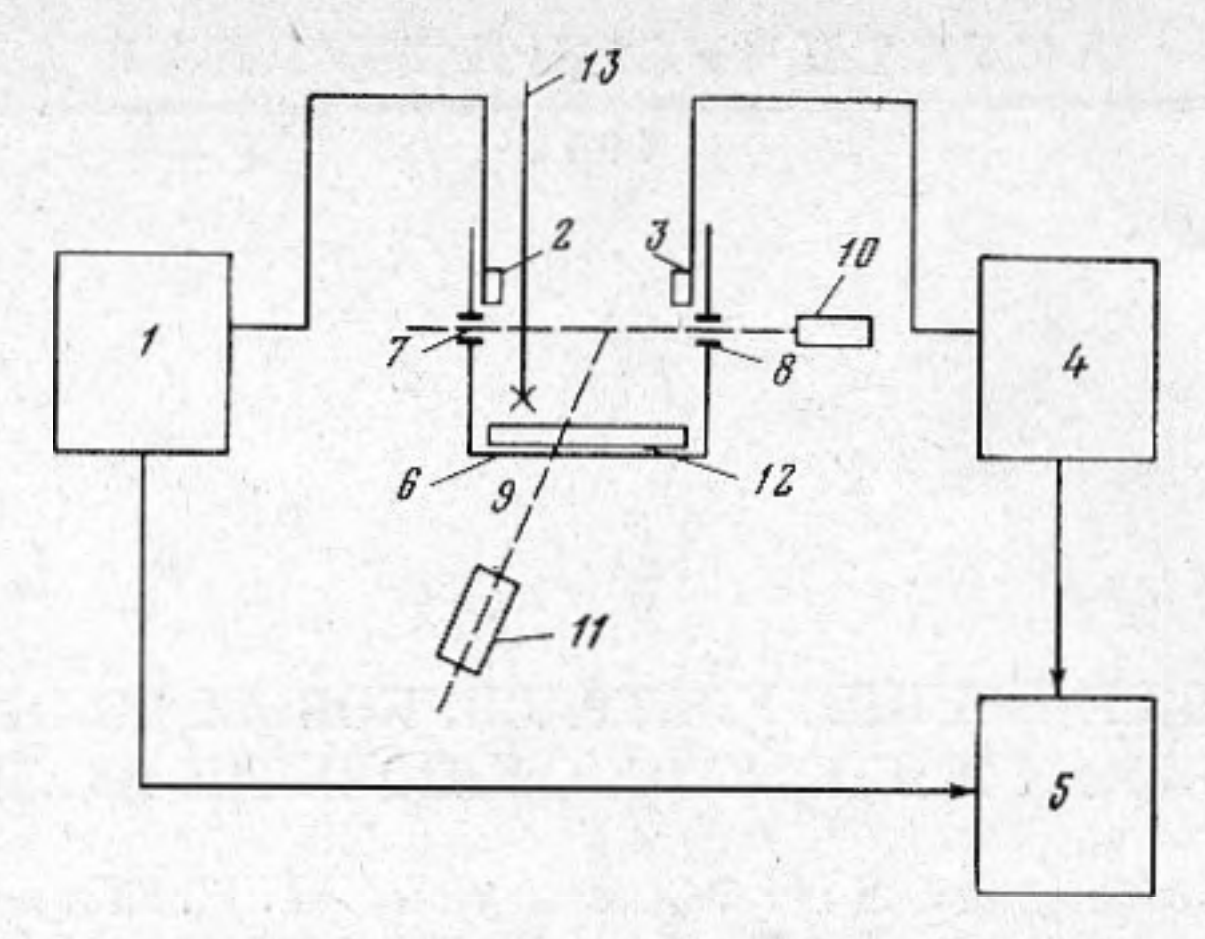
И. С. Кольцова, Л. О. Крынский, И. Г. Михайлов, И. Е. Покровская

Экспериментально исследовано затухание ультразвуковых волн в маловязких жидкостях с газовыми пузырьками радиуса 7–45 мкм, полученными электролитическим методом. При температурах 15, 25° С измерены акустические спектры затухания в диапазоне частот 0,03–30 мГц. Обнаружено, что в области резонанса пузырьков концентрационная зависимость коэффициента дополнительного затухания является функцией частоты; в дорезонансной и зарезонансной областях частот концентрационная зависимость коэффициента дополнительного затухания линейна.

В настоящее время наблюдается большой интерес к изучению распространения ультразвуковых волн в жидкостях с газовыми пузырьками, так как такие двухфазные системы находят все возрастающее применение в различных областях науки и техники. Однако среди публикуемых статей преобладают теоретические работы и сравнительно мало экспериментальных, что объясняется определенными методическими трудностями. Эти трудности связаны с получением в квазиравновесном состоянии воспроизводимой двухфазной системы жидкость — газ, т. е. с генерированием газовых пузырьков; с измерением размеров газовых пузырьков и их объемной концентрации; с измерением коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн. По причине таких методических затруднений результаты экспериментальных работ [1–8] имеют в известной степени качественный характер. Достаточно отметить, что до настоящего времени практически не проводились измерения коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн в жидкости с газовыми пузырьками, не проводились также непосредственные измерения зависимости коэффициента дополнительного затухания от концентрации, не говоря уже о более тонких экспериментах, связанных с исследованием температурной зависимости коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн в двухфазных системах.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению коэффициента дополнительного затухания $\Delta\alpha$ ультразвуковых волн, распространяющихся в маловязких жидкостях с газовыми пузырьками в квазиравновесном состоянии. Измерения проводились в широком диапазоне частот при температурах 15 и 25° С; исследовалась концентрационная зависимость $\Delta\alpha$ в области резонанса пузырьков и зарезонансной области.

Коэффициент затухания ультразвуковых волн измерялся импульсным методом с переменным расстоянием при помощи установки, блок-схема которой показана на фиг. 1. В блоке генерирования *1* создавался импульсный сигнал с частотой от 0,03 до 30 МГц, который подавался на преобразователь *2*, излучающий ультразвуковые волны в жидкость с газовыми пузырьками. С приемного преобразователя *3* сигнал подавался через уси-

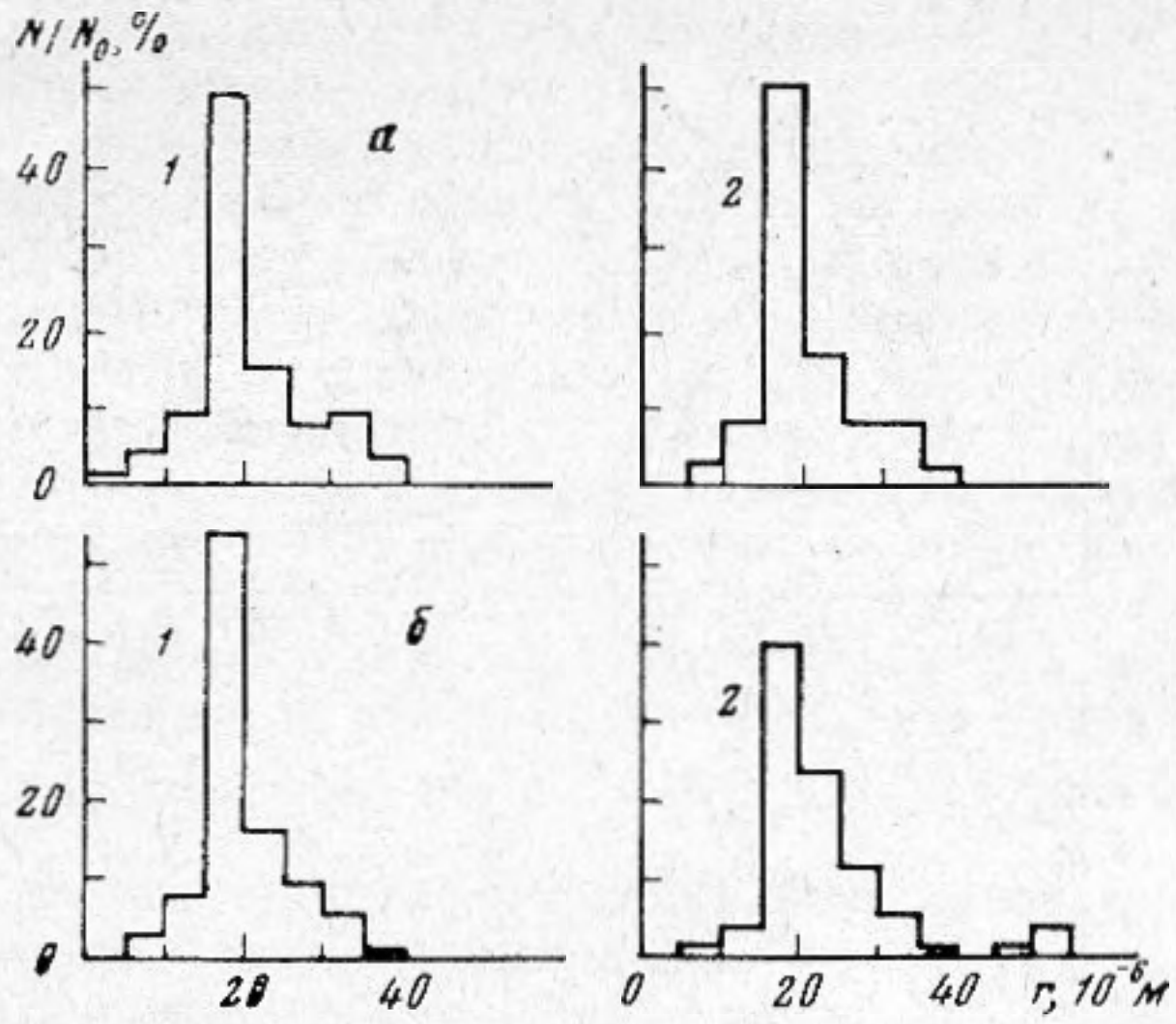


Фиг. 1. Блок-схема установки для измерения коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн в жидкости с газовыми пузырьками: *1* — блок генерирования, *2* — излучатель, *3* — приемный преобразователь, *4* — усилитель, *5* — осциллограф, *6* — кювета, *7*, *8*, *9* — прозрачные окна, *10* — источник света, *11* — микроскоп, *12* — источник газовых пузырьков, *13* — мешалка

литель *4* на осциллограф *5*. Кювета *6* размером 400×250×300 мм³, в которую помещалась исследуемая жидкость, была термостатирована. В боковые стенки кюветы были вмонтированы прозрачные окна *7*, *8*, *9* из оптического стекла, позволяющие фотографировать или визуально наблюдать газовые пузырьки в жидкости. Кювета устанавливалась в центре Т-образной оптической скамьи, на одном плече которой укреплялся источник света *10* — рубиновый лазер или ртутная лампа, а на перпендикулярном плече — фотокамера или длиннофокусный микроскоп *11*. В кювету опускались излучающий *2* и приемный *3* пьезопреобразователи, укрепленные в координатном устройстве, позволяющем производить их юстировку и перемещение. В области низких частот (0,03—3 МГц) для излучения и приема акустических волн использовались пластинки из пьезокерамики диаметром $2R=60$ мм, в области высоких частот — пьезокварцевые пластинки диаметром 20 мм. В процессе измерений излучатель фиксировался в пространстве, а приемник перемещался внутри прожекторной зоны излучателя так, чтобы его ось симметрии совпадала с осью излучателя (ось x). На дне кюветы помещался источник газовых пузырьков *12*, над ним — мешалка *13*, с помощью которой устанавливалось сравнительно равномерное распределение газовых пузырьков по всей кювете.

Протяженность прожекторной зоны $L=R^2/2\lambda$, где λ — длина волны [9], была для частоты 0,03 МГц около 40 мм. С ростом частоты она увеличивалась, соответственно варьировались начальное расстояние между пьезопреобразователями и максимальное перемещение приемника. Коэффициент затухания $\alpha_в$ ультразвуковых волн, распространяющихся во взвеси газовых пузырьков в жидкости, определялся по формуле: $\alpha_в=(\ln p_1-\ln p_2)/(x_2-x_1)$, где p_1 и p_2 — звуковое давление в некоторых точках x_1, x_2, расположенных на оси x. Звуковое давление измерялось приемником ультразвуковых волн в пяти — десяти фиксированных относительно излучателя точках x_n, строился график зависимости $\ln p$ от x и по нему определялись усредненные значения $\alpha_в$. Пьезопреобразователи покрывались специальным лаком, чтобы избежать прилипания газовых пузырьков к их поверхности. Коэффициент затухания $\alpha_в$ на частоте 3 МГц измерялся с помощью двух пар упомянутых пьезопреобразователей, полученные значения совпадали с точностью до 10%.

Двухфазная система создавалась путем электролиза 3%-ного водного раствора соли NaCl. В качестве катода использовалась медная проволока

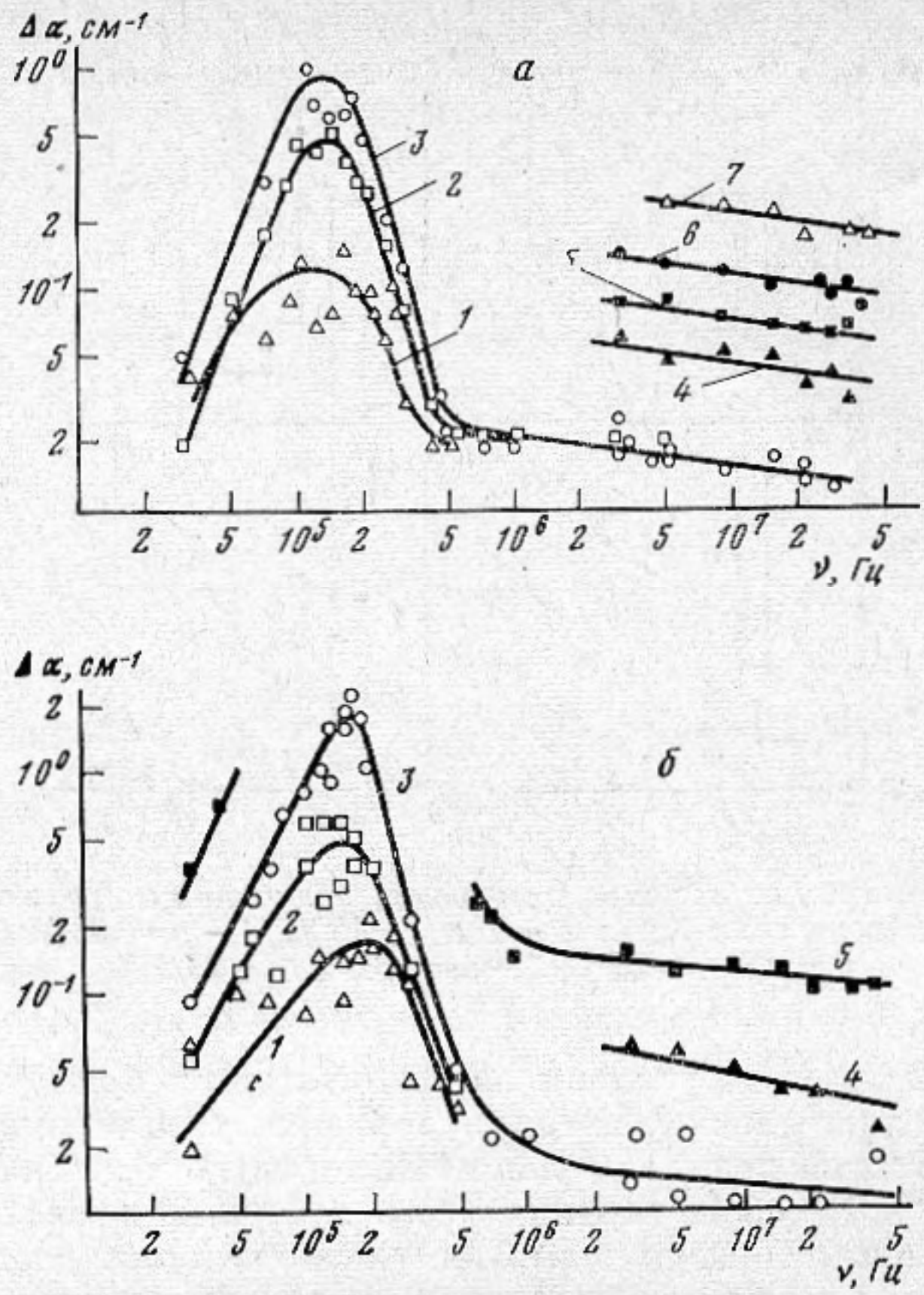


Фиг. 2. Гистограммы газовых пузырьков, полученных при электролизе 3%-ного раствора соли NaCl: *а* – при $T=15°$ С, *1* – $n=0{,}02\%$, *2* – 0,03%; *б* – при $T=25°$ С, *1* – $n=0{,}005\%$, *2* – 0,025%

диаметром 0,02 мм, накрученная на гетинаксовые прямоугольные пластинки с расстоянием между витками 1—3 мм. Эти пластинки собирались вместе, и витки проволоки, выходящие на нижнюю часть набора пластин, соединялись между собой; верхняя часть набора шлифовалась, при этом витки разрывались, образуя штырьки, число которых достигало 40 000. Анод представлял собой платиновую проволоку, натянутую над катодом. Набор пластин с катодами помещался на дно экспериментальной кюветы. На торцах медных проволочек при электролизе образовывались мельчайшие водородные пузырьки, которые довольно равномерно распределялись по всей кювете с помощью мешалки. При изменении тока в электролизере от 0 до 1,8 А менялась концентрация газовых пузырьков.

Определение дисперсного состава и объемной концентрации газовых пузырьков проводилось параллельно с измерением коэффициента затухания ультразвуковых волн. Дисперсный состав определялся путем фотографирования или визуально с помощью длиннофокусного микроскопа. Для построения основных гистограмм измерялись радиусы r 1000—1300 газовых пузырьков при разных температурах и концентрациях. На фиг. 2 видно, что гистограммы несколько асимметричны, радиус пузырьков максимальной фракции составляет 15—20 мкм, минимальный радиус пузырька — 5—10 мкм, максимальный — в большинстве случаев 40—45 мкм. При изменении концентрации газовых пузырьков и температуры взвеси гистограммы остаются подобными.

Для определения объемной концентрации газовых пузырьков n использовался пикнометрический метод. В качестве пикнометра служила сферическая колба со шлифом и притертой пробкой, вдоль образующей конической поверхности которой был сделан паз. Пикнометр заполнялся 3%-ным водным раствором соли NaCl, закрывался пробкой, лишняя жидкость выдавливалась через паз. Поверхность пикнометра просушивалась (одинаково при всех измерениях) и вместе с раствором он взвешивался на аналитических весах с точностью до 0,005 г. На втором этапе измерений пикнометр опускался в исследуемую систему — 3%-ный водный раствор соли NaCl с водородными пузырьками заполнялся ею,— закрывался пробкой, вынимался, высушивался и опять взвешивался. Вес пикнометра с двухфазной системой $P_в$ был меньше, чем вес пикнометра, заполненного чистым раствором соли $P_р$, вследствие вытеснения жидкости водородными



Фиг. 3. Частотная зависимость коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн в 3%-ном водном растворе соли NaCl с водородными пузырьками: *а* – при $T=15°$ С, *1* – $n=0{,}002\%$, *2* – 0,003%, *3* – 0,004%, *4* – 0,007%, *5* – 0,011%, *6* – 0,018%, *7* – 0,037%; *б* – при $T=25°$ С, *1* – $n=0{,}002\%$, *2* – 0,003%, *3* – 0,004%, *4* – 0,02%, *5* – 0,04%

пузырьками. Объемная концентрация свободного газа ввиду пренебрежимо малой плотности газа определялась как

$$n=V_г/V_р\approx(P_р-P_в)/\rho_р V_р,$$

где $\rho_р$ – плотность раствора, $V_р$ – объем пикнометра. Минимальная объемная концентрация n, доступная измерению этим методом, была 0,02%, относительная погрешность измерений не превышала 10%. Концентрация меньше 0,02% определялась путем экстраполяции по кривой зависимости концентрации газовых пузырьков от тока в электролизере.

Коэффициент дополнительного затухания определялся следующим образом. Вначале измерялся коэффициент затухания α_0 ультразвуковых волн, распространяющихся в растворе соли NaCl. Затем измерялся коэффициент затухания $\alpha_в$ в растворе соли с водородными пузырьками, полученными при электролизе. Поскольку путем непрерывного перемешивания не удавалось добиться вполне однородного распределения пузырьков в кювете и полностью исключить флуктуацию акустического сигнала из-за пространственной и временно́й нестабильности системы, при измерениях коэффициента $\alpha_в$ использовались средние значения сигнала. Флуктуация сигналов приводила к добавочной погрешности измерений, увеличивая ее иногда до 30%. Коэффициент дополнительного затухания ультразвуковых волн $\Delta\alpha$ определялся как $\Delta\alpha=\alpha_в-\alpha_0$.

Результаты измерений зависимости коэффициента дополнительного затухания от частоты ν приведены на фиг. 3. Как видно из графиков, в аку-

стических спектрах затухания имеется ярко выраженная полоса резонансного затухания, после которой коэффициент дополнительного затухания слабо уменьшается с ростом частоты.

Полученные экспериментальные данные позволили проанализировать частотную зависимость $\Delta\alpha$ в области частот, лежащей за резонансом пузырьков. Представив в первом приближении частотную зависимость формулой вида $\Delta\alpha=A\nu^b$, где A — некоторый коэффициент, величина которого не зависит от частоты, по наклону кривой $\lg\Delta\alpha=\lg A+b\lg\nu$ из графиков, часть которых представлена на фиг. 3, можно было определить величину параметра b для всех исследованных концентраций при температурах 15 и 25° С. Значения параметра варьировались от −0,09 до −0,20, среднее значение его $b_{ср}=-0{,}15$ при $T=15°$ С и $b_{ср}=-0{,}17$ при $T=25°$ С. Таким образом, с точностью эксперимента характер частотной зависимости в зарезонансной области частот можно было представить в виде

$$\Delta\alpha=A\nu^{-0,16}.$$

Для акустического спектра затухания при температуре 25° С было проведено сравнение частоты, отвечающей максимуму дополнительного затухания при концентрации $n=0{,}004\%$ с резонансной частотой газовых пузырьков, относящихся к максимальной фракции. Резонансная частота вычислялась по корректированной формуле Минерта [10, 11]:

$$\nu_{рез}={}^1/_2\pi r(\gamma P_0 g/\rho_p\beta)^{1/2}, \tag{1}$$

где $\gamma=c_p/c_V$ — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно, P_0 — равновесное давление в системе. Поправки g и β учитывают влияние поверхностного натяжения жидкости и теплообмена между газовым пузырьком и окружающей жидкостью:

$$\beta=[1+3(\gamma-1)/2\Phi_г r\cdot(1+3(\gamma-1)/2\Phi_г r)]^{1/2},$$
$$\Phi_г=\omega\rho_г c_{pг}/2\varkappa_г,$$
$$g=1+2\sigma/P_0 r-2\sigma/3\gamma P_0 r,$$

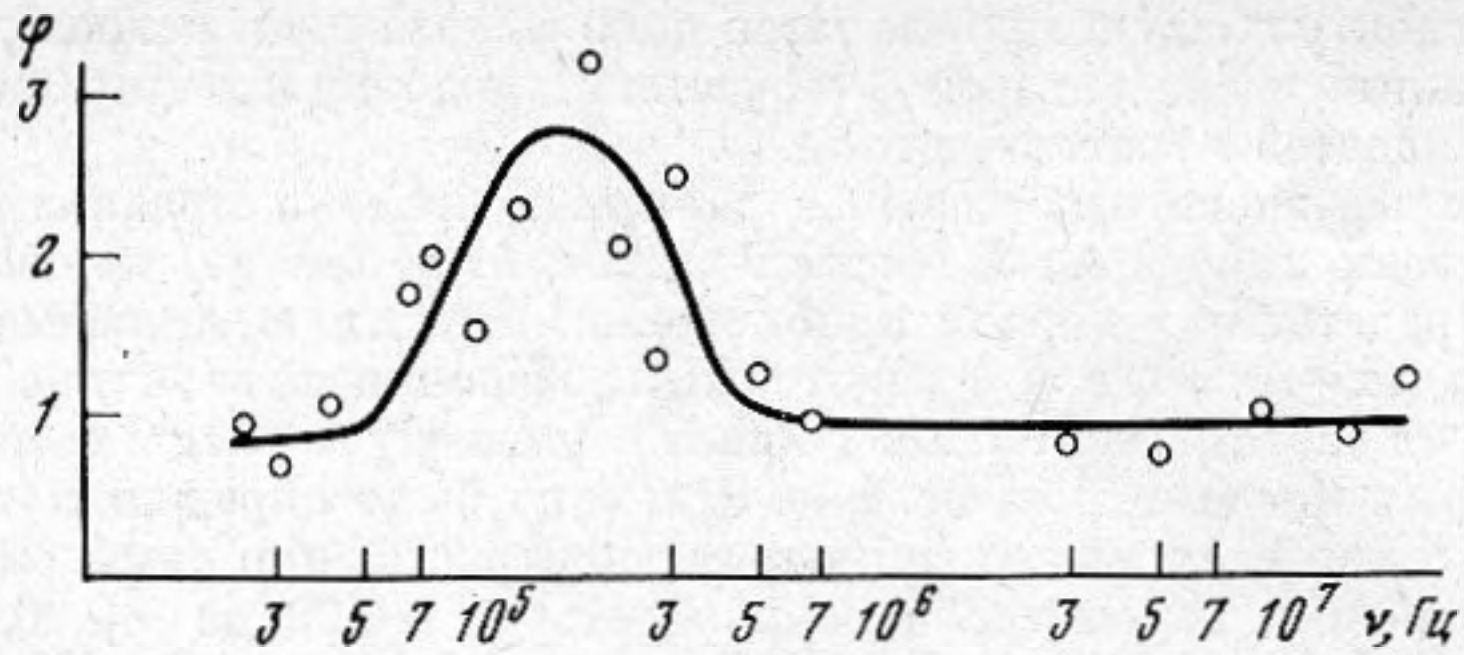
$\varkappa_г$ и $\rho_г$ — коэффициент теплопроводности и плотность газа, ω — циклическая частота распространяющейся ультразвуковой волны, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Резонансная частота 170 кГц, полученная из расчетов по формуле (1) для максимальной фракции газовых пузырьков с $r=17$ мкм при температуре 25° С, совпадала с точностью эксперимента с частотой, при которой наблюдался максимальный коэффициент дополнительного затухания.

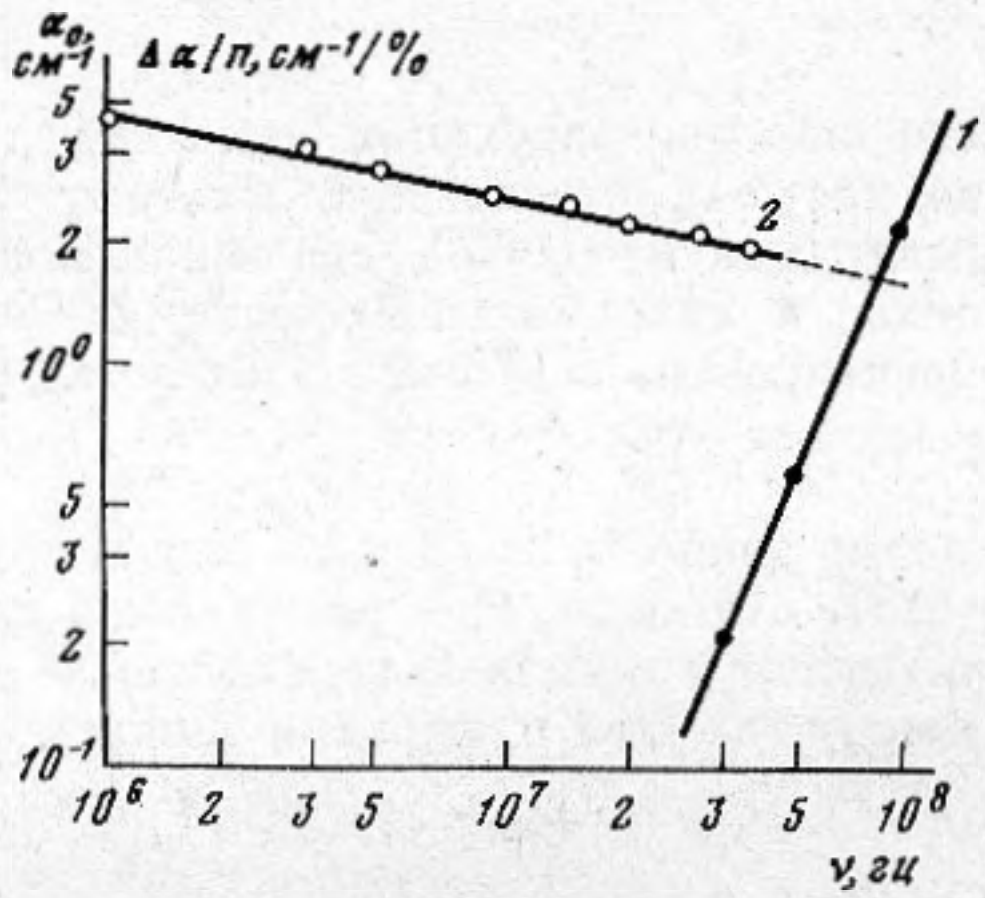
Исследования концентрационной зависимости коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн, распространяющихся в жидкости с газовыми пузырьками, были проведены при изменении концентраций от 0,002 до 0,4% в дорезонансной области частот, в области резонанса и в зарезонансной области.

При фиксированных частотах по экспериментальным данным строились в логарифмическом масштабе графики зависимости $\Delta\alpha$ от n. Характер полученных кривых позволил в первом приближении представить зависимость $\Delta\alpha$ от концентрации в виде $\Delta\alpha=Kn^\varphi$, где K — некоторый коэффициент. По наклону кривых оценивался параметр φ, который определял вид концентрационной зависимости $\Delta\alpha$ при данной частоте. Был построен график (фиг. 4), на котором по оси абсцисс даны частоты, для которых исследовалась концентрационная зависимость $\Delta\alpha$, а по оси ординат — величина соответствующего параметра φ.

На графике видно, что в дорезонансной области $\varphi\approx1$. В этом резонансном диапазоне частот параметр φ является функцией частоты: по мере приближения ее к частоте резонанса пузырьков $\nu_{рез}$ параметр φ увеличивается, при $\nu\approx\nu_{рез}$ достигает своего максимального значения, а затем с ростом частоты начинает уменьшаться. В зарезонансной обла-



Фиг. 4. Значение параметра φ для различных частот в дорезонансной, резонансной и зарезонансной областях при $T=25°$ С



Фиг. 5. Частотная зависимость нормированного на единичную концентрацию коэффициента дополнительного затухания $\Delta\alpha$ ультразвуковых волн в 3%-ном растворе соли NaCl с водородными пузырьками при $T=25°$ С в зарезонансной области (*2*) и частотная зависимость коэффициента затухания α_0 в растворе без газовых пузырьков (*1*)

сти, так же как и в дорезонансной, $\varphi\approx1$, и это означает, что при любой частоте $\nu\gg\nu_{рез}$ коэффициент дополнительного затухания является линейной функцией концентрации. Таким образом было обнаружено, что концентрационная зависимость коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн, распространяющихся в жидкости с газовыми пузырьками, в области резонанса пузырьков является функцией частоты, и этот факт представляется наиболее интересным результатом проведенных исследований. Из полученных данных следует также, что проводить нормировку $\Delta\alpha$ к единичной концентрации можно только вне резонансной области частот в предположении сохранения линейной зависимости коэффициента дополнительного затухания в широком интервале концентраций.

Нормировка полученных экспериментальных данных в зарезонансной области позволила провести некоторые оценки. Так, при отношении $\nu/\nu_{рез}\approx200$, т. е. вдали от резонансной области, отношение $(\Delta\alpha/n)_{ср}/\alpha_0\approx10$, т. е. затухание в жидкости с пузырьками на порядок больше затухания в жидкости без газовых пузырьков. Это означает, что газовые пузырьки могут вносить заметное дополнительное затухание акустических волн и вне резонансной области. Однако до настоящего времени зарезонансная область почти не привлекала внимания исследователей, вероятно, потому, что в этом случае затухание акустических волн мало по срав-

нению с их затуханием в резонансной области. Например, при частоте ультразвуковых волн 5 МГц и концентрации газовых пузырьков 0,004% (см. фиг. 3, кривая *3*) коэффициент дополнительного затухания на два порядка ниже коэффициента дополнительного затухания в резонансной области (в данном случае в области 170 кГц).

Сопоставление частотной зависимости среднего, нормированного на единичную концентрацию, коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн, распространяющихся в растворе соли NaCl с водородными пузырьками $(\Delta\alpha/n)_{ср}$ с частотной зависимостью коэффициента затухания в растворе без газовых пузырьков α_0, представлено на фиг. 5. Это сопоставление позволяет определить границу области частот, при которых затухание ультразвуковых волн, вносимое газовыми пузырьками, соизмеримо с затуханием в самой жидкости. Учитывая, что величина $(\Delta\alpha/n)_{ср}$ в зарезонансной области плавно уменьшается с ростом частоты, а коэффициент поглощения α_0 пропорционален квадрату частоты, можно ожидать, что при некотором значении частоты должно выполняться условие $(\Delta\alpha/n)_{ср}=\alpha_0$. Определив для дисперсионной жидкости отношение $\alpha_0/\nu^2=C$, можно вычислить граничную частоту $\nu_{гр}$, при которой коэффициент поглощения будет соизмерим с коэффициентом дополнительного затухания:

$$\nu_{гр}=[(\Delta\alpha/n)_{ср}/C]^{1/2}. \quad (2)$$

При $\nu>\nu_{гр}$ коэффициент поглощения в жидкости без газовых пузырьков будет превышать нормированный на единичную концентрацию коэффициент дополнительного затухания. С ростом частоты разность $\alpha_0-(\Delta\alpha/n)_{ср}$ будет увеличиваться. Когда эта разность достигнет $0{,}95\alpha_0$, т. е. величина $(\Delta\alpha/n)_{ср}$ будет сравнима с погрешностью измерений коэффициента затухания, которая обычно составляет $0{,}05\alpha_0$, затуханием ультразвуковых волн, связанным с наличием газовых пузырьков, можно пренебречь. С помощью расчетов по такой схеме было установлено, что величина $(\Delta\alpha/n)_{ср}$ для жидкости с газовыми пузырьками, распределение по размерам которых указано выше, соизмерима с коэффициентом поглощения жидкости без газовых пузырьков на частоте порядка 100 МГц, а на частотах выше 500 МГц дополнительным затуханием, связанным с наличием газовых пузырьков, можно пренебречь.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Carstensen E., Foldy L.* Propagation of Sound through a Liquid Containing Bubbles. J. Acoust. Soc. America, 1947, *19*, 3, 481–501.
2. *Laird D., Kendig P.* Attenuation of Sound in Water Containing Air Bubbles. J. Acoust. Soc. America, 1952, *24*, 1, 29–32.
3. *Mayer E., Skudrzyk E.* Über die akustischen Eigenschaften von Gasblasenschleiern in Wasser. Akust. Beih, 1953, 3, 434–440.
4. *Fox F., Curley S.* Phase Velosity and Absorption Measurements in Water Containing Air Bubbles. J. Acoust. Soc. America, 1955, *27*, 2, 534–539.
5. *Exner M. L.* Messung der Dämpfung pulsieren der Luftblasen im Wasser. Akust. Beih, 1951, 1, 25–29.
6. *Maepherson J. D.* The Effect of Gas Bubbles on Sound Propagation in Water. Proc. Phys. Soc., 1957, *70*, part 1, 445B, 85–92.
7. *Silberman E.* Sound Velosity and Attenuation in Bubbly Mixtures Measured in Standing Waves. J. Acoust. Soc. America, 1957, *29*, 8, 925–932.
8. *Васильев В. А., Исаков А. Я.* Непрерывные измерения затухания звука в жидкости, содержащей свободный газ. Прикладная акустика, 1975, вып. 1, 166–171.
9. *Мэзон У.* Физическая акустика. М., «Мир», 1966, т. 1, A IV, 326–397.
10. *Minnaert M.* On Musical Air – Bubbles and the Sounds of Running Water. Phylos. Mag., 1933, *7*, 16, 235–239.
11. *Chapman B. B., Plesset M. S.* Thermal effects in free oscillation of gas bubbles. Trans. ASME, 1971, *93*, DN1, 373–376.

Ленинградский государственный
университет им. А. А. Жданова,
физический факультет
Научно-исследовательский
физический институт

Поступила
12 декабря 1977 г.
После переработки
13 ноября 1978 г.