АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том II 1956 Вып. 2

ИМПУЛЬСНАЯ МЕТОДИКА ФИКСИРОВАННЫХ РАССТОЯНИЙ, ЕЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

Н. И. Кошкин, В. Ф. Повдрев, В. Д. Соболев, М. Г. Ширкевич, В. Ф. Яковлев

В работе дается обоснование новой разработанной методики импульсных измерений поглощения ультразвука. В отличие от широко применяемой методики, когда необходимо перемещать излучатель и отражатель относительно друг друга, в предлагаемом методе излучатель и отражатель остаются неподвижными. Это обстоятельство не только в значительной степени упрощает конструкцию измерительной камеры и ускоряет процесс измерения, но и позволяет более успешно использовать импульсный метод для измерения поглощения при высоких температурах и давлениях, а также при различного рода фазовых переходах.

В статье приводятся результаты по измерению коэффициента поглощения ультразвука, проведенного методом фиксированных расстояний; экспериментальные данные сравниваются с результатами, полученными другими методами; указывается на возможность применения импульсного метода фиксированных расстояний как средство контроля в промышленности.

В имеющихся работах по исследованию поглощения ультразвука в жидких средах импульсным методом, методика обычно предлагается однотипной: измерение производится при изменениях расстояния между отражателем и кварцевым излучателем. Исследования свойств вещества в критической области и области отвердевания является актуальной экспериментальной проблемой. Использование обычной импульсной методики для исследования поглощения в критической области встречает много технических трудностей, а в области отвердевания вещества эта методика принципиально не может быть применена. Ниже обсуждается исследование распространения ультразвука импульсным методом при фиксированных значениях акустического пути.

Исходя из общей теории преобразователей и анализа ультразвуковых задерживающих линий [1], можно создать эквивалентную схему передачи энергии через среду. Схема передачи импульса энергии от генератора к приемнику может быть изображена электрической схемой (фиг. 1); при расчетах по этой схеме следует ввести экспоненциальный множитель, учитывающий рассеяние энергии в среде. На фиг. 1: I — кварц, соединенный с генератором, II — кварц, соединенный с приемником, U_0— напряжение генератора, R_t— выходное сопротивление генератора, R_r — входное сопротивление приемника, R_1, R_2— акустические сопротивления сред с двух сторон кварца, выраженные в электрических единицах, U_r— напряжение на входе приемника, III — передающая среда, эквивалентная электрической линии с экспоненциальным затуханием. В соответствии со схемой потери при передаче импульса определяются следующим образом:

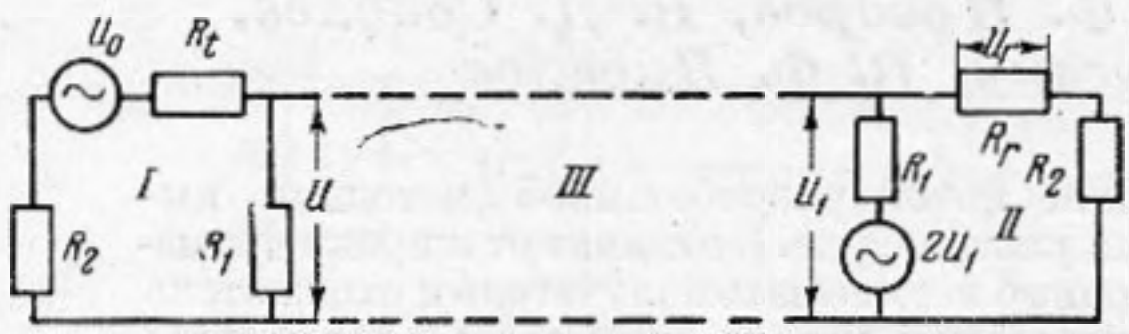
$$\frac{U_r}{U_0}=\frac{2kR_1R_r}{(R_1+R_2+R_t)(R_1+R_2+R_r)}\cdot e^{-\alpha l}, \qquad (1)$$

где l — длина акустического пути, k—коэффициент отражения по амплитуде на границе между средой и рефлектором.

Соотношение (1) послужило основой для решения проблемы измерений при фиксированных значениях акустического пути. Для случая симметричной нагрузки на кварц ($R_1=R_2$) при условии $R_r \ll R_1$ и $R_t \ll R_1$ (что обычно имеет место при эксперименте) выражение (1) может быть записано в виде

$$\frac{U_r}{U_0} = \frac{kR_r}{2R_1} e^{-\alpha l}. \tag{2}$$

При определении относительного изменения коэффициента затухания исключается необходимость в измерении значения напряжения генератора и напряжения на входе приемника. Начальная величина коэффициента затухания может быть определена в обычных условиях при переменном значении акустического пути. Дальнейшее исследование изменения коэффициента поглощения можно вести в замкнутой системе при фиксированном акустическом пути в широком интервале температур и давлений, включая критическую область и область затвердевания вещества.



Фиг. 1

В предлагаемой методике измеряется изменение затухания ультразвука ΔA (в *дб*) при фиксированном акустическом пути. Это изменение может быть обусловлено изменением температуры, концентрации, давления и т. п.

Практически величина ΔA определяется при помощи делителя напряжения, стоящего на входе приемника. Тогда изменение коэффициента затухания ($\alpha_2-\alpha_1$) для случая симметричной или односторонней нагрузки кварца средой будет равно

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{\Delta A}{20 \cdot l \cdot \lg e} + \frac{1}{l \cdot \lg e} \lg \frac{k'' R_1'}{k' R_1''}, \tag{3}$$

где k''/k' — относительное изменение отражения (по амплитуде) на границе раздела рефлектора со средой (k' — начальное отражение), R_1'/R_1''— относительное изменение акустического сопротивления среды (R_1'—начальное акустическое сопротивление).

При наличии стального рефлектора и при изменении акустического сопротивления среды в 1,8 раза, имеет место пренебрежительно малое изменение в отражении энергии. В этом случае можно пренебречь вторым членом выражения (3). Влияние изменения температуры на параметры кварца может быть учтено при расчетах изменения акустического сопротивления среды, выраженного в электрических единицах (эта поправка пренебрежительно мала в интервале $\pm 50°$).

Экспериментальная проверка описанной методики была проведена при измерении температурного коэффициента поглощения ультразвуковых волн в бромбензоле. Измерения проводились на частоте 17,9 *мггц* при импульсах длительностью 2 *мксек* в интервале температур от —27,5 до 43° Значение скорости ультразвука в бромбензоле в данном интервале температур были определены по данным диффракционного метода [2], значения плотности для температур выше нуля взяты из таблиц [3], а для температур ниже нуля рассчитаны путем экстраполяции.

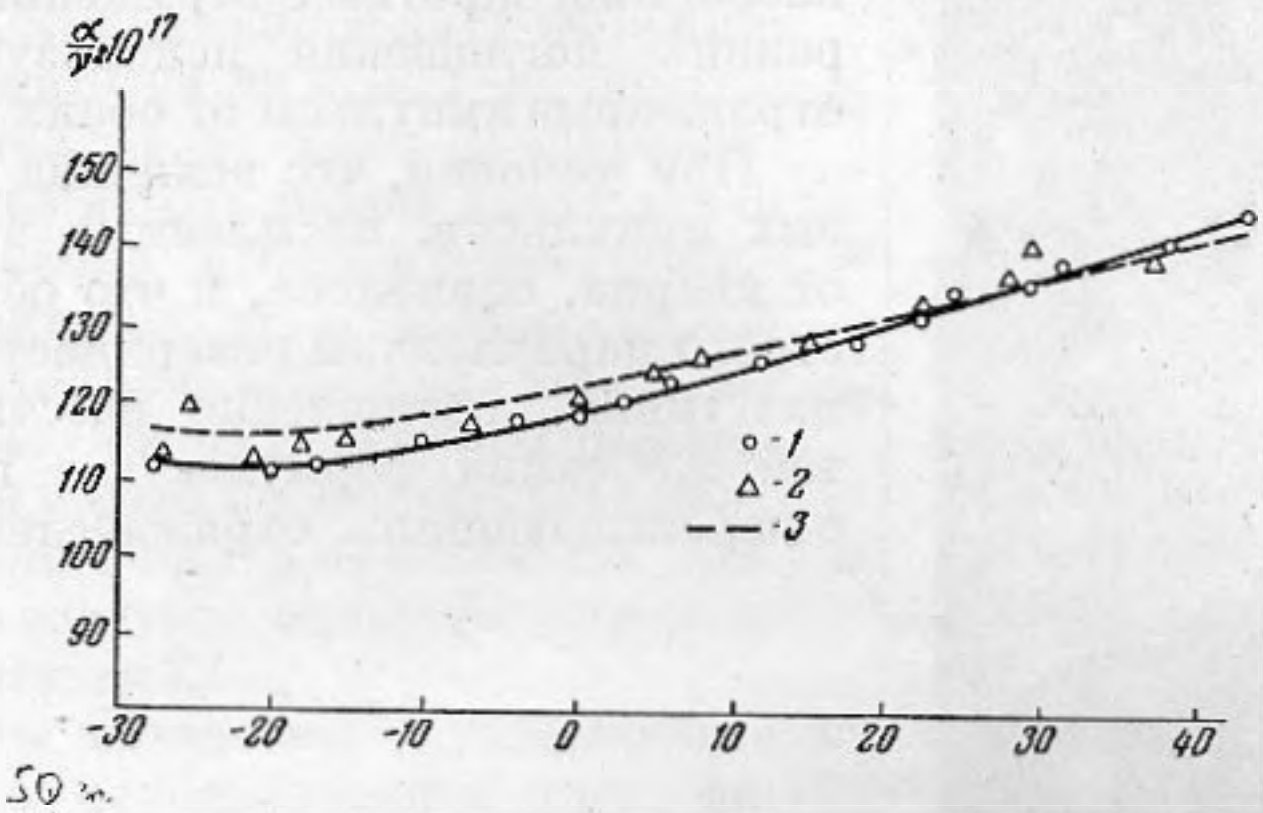
В исследованном нами интервале температур наибольшее относительное изменение акустического сопротивления среды составляло 1,2; в этом случае наибольшая поправка на изменение отражения при вычислении коэффициента затухания равна 0,03%. Поэтому мы пренебрегли влиянием изменения отражения и пользовались для расчетов изменения коэффициен-

та затухания упрощенной формулой:

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{\Delta A}{20 \cdot l \cdot \lg e} + \frac{1}{l \cdot \lg e} \lg \frac{R_1'}{R_1''}. \qquad (4)$$

Слагаемое $\frac{1}{l \cdot \lg e} \lg \frac{R_1'}{R_1''}$ является поправкой на изменение акустического сопротивления среды. Начальное значение коэффициента поглощения было определено нами (с точностью до одного процента) обычной методикой при комнатной температуре ($\alpha = 0{,}4305$).

На фиг. 2 показан график зависимости коэффициента поглощения ультразвука в бромбензоле, построенный по результатам измерений при фи-

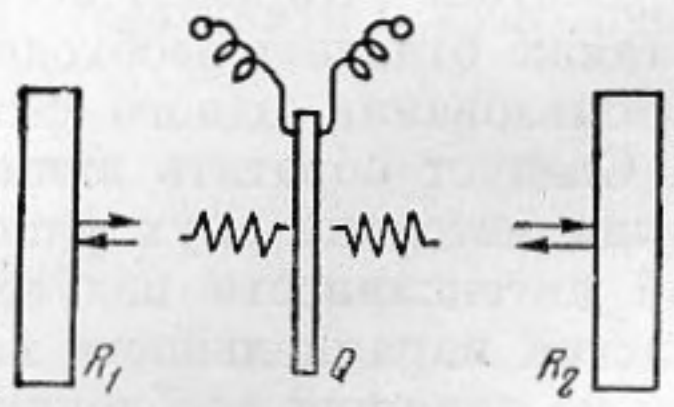


Фиг. 2. Бромбензол (частота $\nu_{ср} = 17{,}9$ *мггц*): *1*—методика фиксированного расстояния, *2* — методика переменного расстояния, *3* — методика фиксированного расстояния без поправок

ксированном значении акустического пути и соответствующих расчетов (пунктиром обозначены данные без поправок на изменение акустического сопротивления среды). На этой же фигуре нанесены точки по результатам измерений обычной методикой. Расположение на этом графике точек при том и другом способе измерения позволяет сделать следующее заключение:

1. Оба метода дают одинаковую картину изменения поглощения в зависимости от температуры.

2. Метод фиксированных расстояний дает меньший разброс точек (в пределах одного процента).



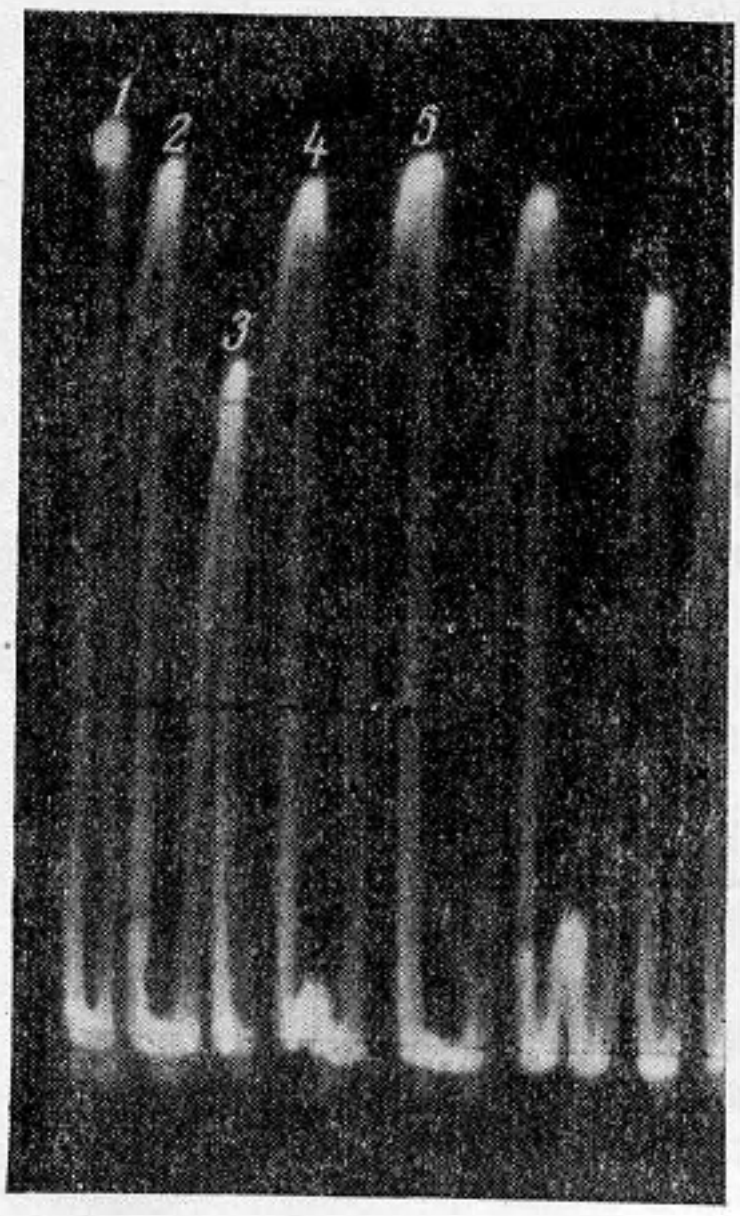
Фиг. 3

Этим подтверждается принципиальная равнозначимость обоих способов измерения и практическое преимущество, в смысле точности, метода фиксированных расстояний.

Дальнейшее развитие импульсного метода измерения поглощения ультразвука завершилось разработкой методики с двумя фиксированными отражателями. При этом способе измерений кварцевый излучатель Q (фиг. 3) возбуждается импульсным генератором и излучает ультразвуковые импульсы, которые распространяются в обе стороны от поверхностей кварцевой пластинки. Достигнув отражателей R_1 и R_2, расположенных на различных расстояниях от излучателя, ультразвуковые импульсы возвращаются к кварцу, который преобразует их в импульсы электрические. Последние после усиления подаются на пластины y электронно-луче-

вой трубки, в результате чего на экране осциллографической трубки появляется система выбросов, соответствующих отраженным импульсам от обоих отражателей.

На фиг. 4 приводится одна из осциллограмм. Выброс *1* соответствует основному импульсу, подаваемому от генератора на кварцевый излучатель *Q*, выбросы *2* и *3* соответствуют первому и второму отраженным импульсам от отражателя, расположенного к излучателю на более близком расстоянии; выброс *4* соответствует первому отраженному импульсу от второго отражателя; выброс *5* соответствует одновременному воздействию на вход приемника двух отраженных импульсов от различных отражателей, поэтому его амплитуда больше, чем амплитуда импульса *4*; далее следует система выбросов, соответствующая импульсам, получающимся после многократных отражений. При измерениях поглощения используются первые отраженные импульсы от обоих отражателей.



Фиг. 4

При условии, что величина ультразвуковых импульсов, посылаемых в обе стороны от кварца, одинакова, и что оба отражателя строго параллельны поверхностям кварцевой пластинки, поглощение рассчитывается по той же самой формуле, что при методике с перемещающимся отражателем:

$$\alpha = \frac{\Delta A}{40 \cdot \lg e \cdot \Delta x}, \qquad (5)$$

где ΔA — разность амплитуд в *дб* двух первых отраженных импульсов от различных отражателей.

Δx—разность расстояний отражателей от кварцевого излучателя.

Методика двух фиксированных отражателей является, по существу, синтезом двух ранее используемых; при этом устраняются отрицательные и сохраняются положительные стороны ранее применявшихся способов.

Действительно, в этом случае устранена необходимость перемещения отражателя (что имеет место при использовании подвижного отражателя), а также отпадает необходимость в поправках, которые надо вводить при использовании одного фиксированного отражателя.

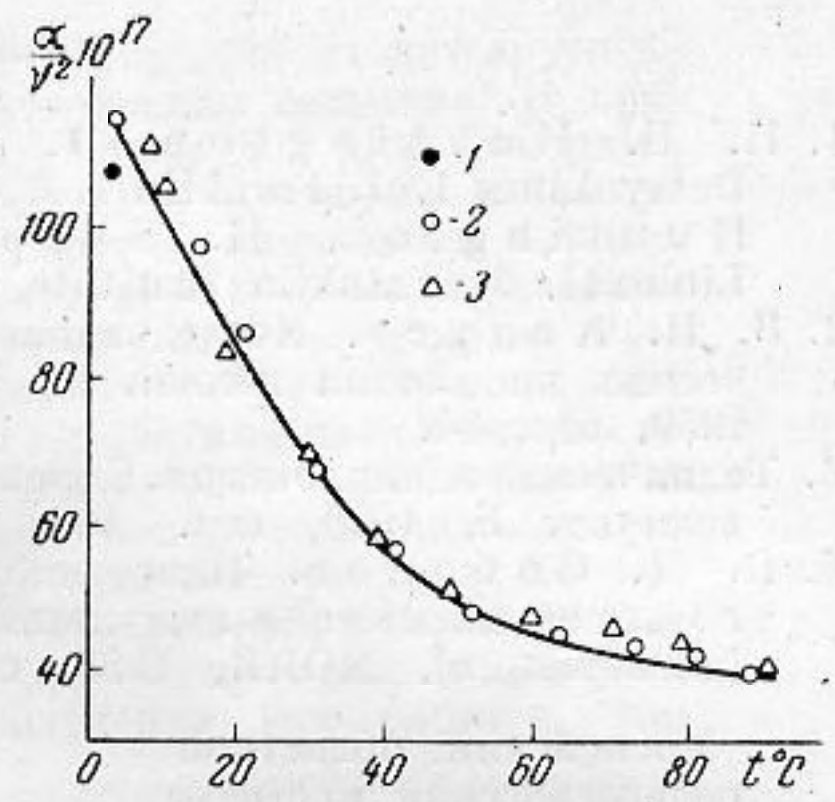
Следует обратить внимание на то обстоятельство, что при использовании методики двух фиксированных отражателей обеспечение одинаковой интенсивности излучения кварцевого излучателя в обе стороны и строгой параллельности поверхностей кварцевой пластинки и отражателей не является необходимым условием. Пусть кварцевый излучатель излучает в одну сторону интенсивность I_1, в другую I_2; пусть при отражении от первого отражателя потеря по интенсивности составляет k_1, от второго — k_2. Тогда интенсивность первого отраженного импульса от первого отражателя у поверхности кварца будет $I_1 k_1 e^{-\alpha l_2}$, где l_1—длина акустического пути первого импульса; соответственно для первого отраженного импульса от второго отражателя интенсивность будет $I_2 k_2 e^{-\alpha l^2}$. Здесь коэффициенты k_1 и k_2 характеризуют потери интенсивности не только за счет отражения, но и за счет непараллельности отражателей.

Тогда

$$\alpha = \frac{\Delta A - 10 \lg \frac{I_1 k_1}{I_2 k_2}}{20 \cdot \lg e \Delta l}, \qquad (6)$$

где $\Delta A = 20 \lg \frac{V_1}{V_2}$ — разность амплитуд в *дб* двух первых отраженных импульсов от различных отражателей, Δl — разность акустических путей ультразвуковых импульсов.

Отсюда видно, что в этом случае необходимо вводить поправку $\Delta A_1 = 10 \lg \frac{l_1 k_1}{l_2 k_2}$. Величина этой поправки при данной конструкции кварцедержателя и установке отражателей не будет зависеть от других факторов, изменяющихся в течение опыта (например, от изменений температуры, давления, от изменения интенсивности излучения в связи с изменением акустических свойств среды). Величина этой поправки может быть определена по измерениям величины ΔA в стандартной жидкости, для которой α измерена с большой степенью точности. Заметим также, что методика двух фиксированных отражателей не может полностью заменить методику с одним фиксированным расстоянием. Это может иметь место при исследовании коэффициента поглощения в критической и закритической областях состояния вещества, когда отраженный импульс от дальнего отражателя становится малым по амплитуде (в силу большого поглощения) и практически приходится пользоваться одним фиксированным отражателем.



Фиг. 5. *1*—методика переменного расстояния, *2* — методика двух фиксированных расстояний, *3*—оптический метод

Результаты измерений коэффициента поглощения с использованием двух фиксированных отражателей находятся в хорошем согласии с результатами, полученными другими методами. На фиг. 5 приводятся результаты измерений коэффициента поглощения в *n*-бутиловом спирте, полученные методом двух фиксированных отражателей, методом подвижного отражателя и оптическим методом с использованием фотоэлемента. Максимальное отклонение результатов составляет менее 5%, что лежит в пределах точности проведенных измерений.

Методика одного и двух фиксированных отражателей была успешно использована одним из авторов этой статьи [4] для исследования поглощения ультразвука по линии насыщения с переходом через критическую точку.

Таблица

Этилацетат (частота 5,1 *мггц*)

$t°$ C	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17} \frac{сек^2}{см}$	$t°$ C	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17} \frac{сек^2}{см}$	$t°$ C	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17} \frac{сек^2}{см}$	$t°$ C	$\frac{\alpha}{\nu^2} \cdot 10^{17} \frac{сек^2}{см}$
60	261	140	558	230	2170	260	2645 перегретые пары
70	281	150	632	240	2581	264,5	2449 то же
80	305	170	800	245	2852	270	2279 то же
90	332	180	908	248	3646		
100	359	190	1050	249	4095		
110	392	200	1250	250	критическая температура		
120	435	210	1500	253	3302 перегретые пары		
130	493	220	1801	256	2917 то же		

В таблице приводятся некоторые результаты измерений в этилацетате на частоте 5,1 *мггц*. Как видно из этой таблицы, новые способы измерений позволяют непрерывным образом исследовать поглощения ультразвука в критической области перехода жидкость — пар.

Несомненно, что импульсная методика одного и двух фиксированных отражателей найдет широкое применение в научно-исследовательской практике, когда необходимо вести исследования в герметически закрытых объемах среды, а также может быть использована в ряде практических задач по определению физико-химических характеристик среды. В частности, можно указать на возможность использования методики фиксированных отражателей для определения количества растворенных газов в нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. B. Huntington, A. G. Emslie, V. W. Hugnes. Ultrasonic Delay Lines I. J. Franklin Institute, 1948, **245**, I, 1—24; A. G. Emslie, H. B. Huntington, H. Shapiro, A. E. Benfield. Ultrasonic Delay Linies II. J. Franklin Institute, 1948, **245**, 2, 101—115.
2. З. И. Авдусь. Исследование распространения ультразвуковых волн в органических жидкостях вблизи их температур замерзания (диссертация). МОПИ, 1950, стр. 84.
3. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин, 5, 1930, стр. 160.
4. В. Д. Соболев. Измерение поглощения ультразвуковых волн в этилацетате по линии насыщения импульсным методом двойного фиксированного расстояния (диссертация). МОПИ, 1955, стр. 88—92.

Московский областной
педагогический институт

Поступила в редакцию
15 февраля 1956 г.