

УДК 534.231.1

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСНОГО МОДУЛЯ СДВИГА ТКАНЕЙ ЖИВОТНЫХ

*Л. И. Лебедева*

Описывается метод определения динамического комплексного модуля сдвига тканей животных, заключающийся в возбуждении плоской сдвиговой волны в тонком плоском образце ткани и измерении фазы и амплитуды колебания на поверхности образца, параллельной фронту сдвиговой волны. Измерен динамический комплексный модуль сдвига  $\mu = \mu_0(1 - i\eta)$  для различных образцов мышечной ткани; приведены результаты экспериментов.

При решении самых разнообразных биоакустических задач часто возникает необходимость исследования упругих свойств тканей различных животных. По некоторым характеристикам ткани животных близки к резиноподобным материалам; однако большинство методов, применяемых для измерения комплексных модулей упругости резиноподобных материалов, оказывается по различным причинам непригодно для измерения параметров тканей животных.

В настоящей работе использован метод определения динамического комплексного модуля сдвига тканей животных\*, основанный на возбуждении плоской сдвиговой волны в тонком плоском образце ткани и измерении фазы и амплитуды колебаний на поверхности образца, параллельной фронту сдвиговой волны. Для возбуждения и приема сдвиговых колебаний в образце последний помещается между боковыми поверхностями продольно колеблющихся металлических стержней. Для исключения неопределенности граничных условий в местах контакта образца с металлическими поверхностями проводится измерение амплитуды и фазы колебания для трех толщин образца  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$ .

Рассмотрим колебания образца, заключенного между массивными металлическими стенками, предполагая, что в образце распространяется плоская сдвиговая волна. Расположим систему координат так, чтобы ось  $x$  (фиг. 1) была направлена по толщине образца вдоль направления распространения сдвиговой волны.

Пусть сдвиговое напряжение на верхней стороне образца  $l$  равно  $\sigma_1 e^{i\varphi_1}$  для толщины  $l_1$  и, соответственно,  $\sigma_2 e^{i\varphi_2}$  и  $\sigma_3 e^{i\varphi_3}$  для толщины  $l_2$  и  $l_3$ . Представим сдвиговое напряжение в образце в форме

$$\bar{\sigma} = A \cos kx + B \sin kx, \quad (1)$$

где  $k = \omega \sqrt{\rho / \mu_0(1 - i\eta)}$ ,  $\mu_0$  — модуль сдвига,  $\eta$  — коэффициент потерь при сдвиге. Для удобства расчета выберем следующие соотношения между толщинами образцов:

$$2(l_2 - l_1) = l_3 - l_1.$$

\* Идея метода была предложена Н. С. Агеевой.

Подставляя в выражение (1) значения напряжения на границе образца  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  и введя следующие обозначения

$$F = \frac{\sigma_1}{2\sigma_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{\sigma_3}{2\sigma_2} \cos(\varphi_3 - \varphi_2),$$

$$G = \frac{\sigma_1}{2\sigma_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{\sigma_3}{2\sigma_2} \sin(\varphi_3 - \varphi_2),$$

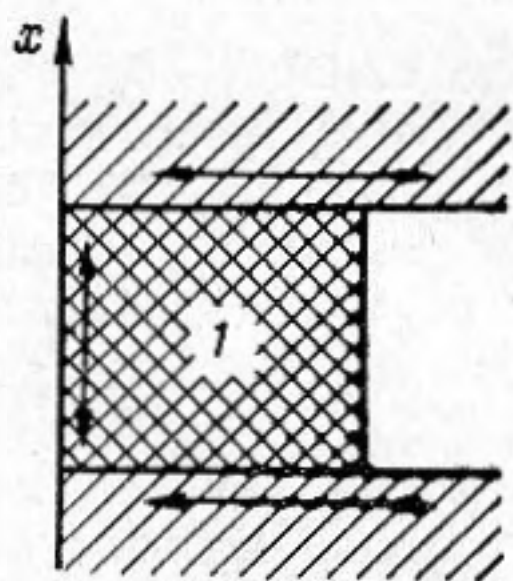
$$\beta = \operatorname{arc sh} \sqrt{\frac{F^2 + G^2 - 1}{2}} + \sqrt{\frac{(F^2 + G^2 - 1)^2}{4} + G^2},$$

$$\alpha = \operatorname{arc cos}(\pm \sqrt{F^2 + G^2 - \operatorname{sh}^2 \beta}),$$

мы получаем для определения  $\mu_0$  и  $\eta$  следующие формулы

$$\mu_0 = \frac{\omega^2(l_2 - l_1)^2 \rho}{(\alpha^2 - \beta^2)(1 + \eta^2)}; \quad \eta = \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 - \beta^2}.$$

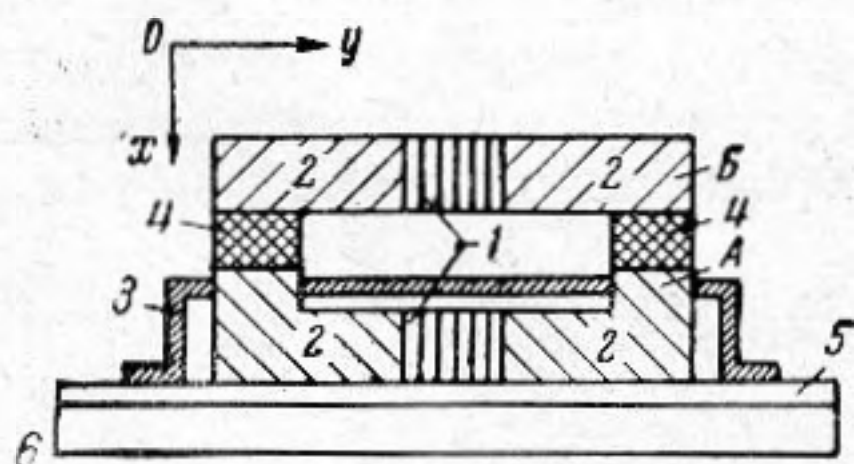
Измерительная установка состоит из двух составных симметричных стержней *A* и *B* прямоугольного сечения (см. фиг. 2, где приведена схема механической части экспериментальной установки). Один из стержней является излучающим, а другой — приемным. Каждый стержень включает в себя



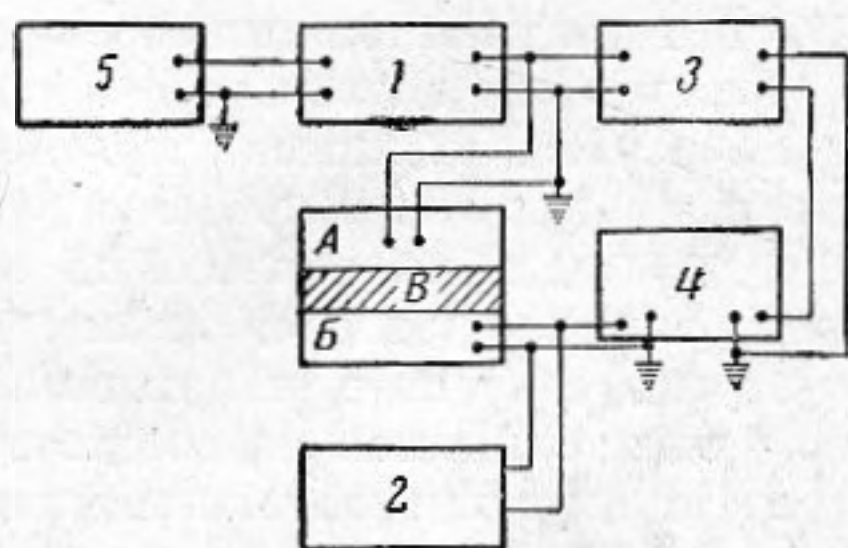
Фиг. 1

пакет пластин сегнетовой соли 1, вклеенный между двумя латунными стержнями 2. Стержень *A* свободно лежит на массивной стальной плите 6. Вибрационная изоляция от плиты осуществляется с помощью пенопластовой прокладки 5. На верхние поверхности стержня кладутся два одинаковых измеряемых образца 4, которые сверху прижимаются свободно лежащим приемным стержнем *B*. Для устранения прохождения звука от стержня *A* к стержню *B* по воздушному пути стержень *A* защищен металлическим экраном 3; экран имеет два окна, в которые входят выступы рабочей поверхности стержня *A*. Толщины образцов измерялись толщиномером со стрелочным индикатором, жестко укрепленным при помощи кронштейна на плите 6. Для улучшения сцепления колеблющихся поверхностей стержня с образцом на рабочие поверхности стержня наносилось мелкое рифление.

Толщины образцов измерялись толщиномером со стрелочным индикатором, жестко укрепленным при помощи кронштейна на плите 6. Для улучшения сцепления колеблющихся поверхностей стержня с образцом на рабочие поверхности стержня наносилось мелкое рифление.



Фиг. 2



Фиг. 3

Блок-схема электрической части установки представлена на фиг. 3. Синусоидальное напряжение с генератора ЗГ-1 (1) подается на пьезоэлектрический пакет стержня *A*. Продольные колебания стержня *A* преобразуются в сдвиговые колебания образца *B*, а затем — опять в продольные колебания стержня *B*.

Амплитуда напряжения, развиваемого пьезоэлектрическим пакетом стержня *B*, измеряется вольтметром ЛВ-9 (2), а фаза измеряется при

помощи фазовращателя 3 и осциллографа ЭО-7 (4) по фигурам Лиссажу. Частота колебаний контролируется измерителем частоты ИЧ-6 (5).

Процесс измерения сводится к следующей процедуре. Между стержнями *A* и *B* закладываются два идентичных образца толщиной  $l_1$ . С генератора подается напряжение частоты  $f$ , измеряется напряжение  $V_1$  и фаза  $\varphi_1$  на приемном стержне *B*. Далее проводятся аналогичные измерения с парами образцов двух других толщин  $l_2$  и  $l_3$ , причем толщины выбираются таким образом, чтобы удовлетворялось соотношение  $2(l_2 - l_1) = l_3 - l_1$ . Измеряются соответственно  $V_2$  и  $\varphi_2'$  и  $V_3$  и  $\varphi_3'$ . Измеряемое напряжение  $V_i e^{i\varphi_i'}$  на приемном стержне для  $i$ -го образца пропорционально сдвиговому напряжению  $\sigma_i e^{i(\alpha + \varphi_i)}$  на поверхности образца. Тогда в выражении для определения  $\mu_0$  и  $\eta$  войдут вместо  $\sigma_1/2\sigma_2$  и  $\sigma_3/2\sigma_2$  равные им непосредственно измеряемые соответственные величины  $V_1/2V_2$  и  $V_3/2V_2$ . Непосредственно измеряемые величины фаз  $\varphi_1' = \alpha + \varphi_1$ ,  $\varphi_2' = \alpha + \varphi_2$ ,  $\varphi_3' = \alpha + \varphi_3$  (где  $\alpha$  — постоянная величина) позволяет получить входящие в расчет значения разности фаз  $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1' - \varphi_2'$  и  $\varphi_3 - \varphi_2 = \varphi_3' - \varphi_2'$ .

На описанной экспериментальной установке был измерен комплексный динамический модуль сдвига мышечной бычьей ткани и тканей различных морских рыб.

Измерения модуля сдвига бычьей ткани проводились на частоте 14,3 кгц. Образцы вырезались различным образом: например, волокна располагались вдоль оси  $x$  (см. фиг. 2); при этом направление волокон совпадало с направлением распространения сдвиговых волн. Такие образцы мы назовем условно «продольными». Далее, использовались образцы, в которых волокна ориентировались вдоль оси  $y$  или  $z$ , т. е. перпендикулярно направлению распространения сдвиговых волн. («Поперечные» образцы.) Наконец, использовались образцы произвольной ориентации волокон.

В табл. 1 приведены результаты измерений, причем строка «поперечные 1» относится к ориентации волокон вдоль оси  $y$ , строка «поперечные 2» — к ориентации вдоль оси  $z$ .

Таблица 1

Образцы	$\mu_0 \cdot 10^{-6}$ , дин/см <sup>2</sup>	$\eta$
Произвольное направление волокон	5,3	0,12
Продольные	6,4	0,31
Поперечные 1	3,2	0,28
Поперечные 2	2,8	0,40

Измерения модуля сдвига бычьей ткани проводились на частоте 14,3 кгц. Образцы вырезались различным образом: например, волокна располагались вдоль оси  $x$  (см. фиг. 2); при этом направление волокон совпадало с направлением распространения сдвиговых волн. Такие образцы мы назовем условно «продольными». Далее, использовались образцы, в которых волокна ориентировались вдоль оси  $y$  или  $z$ , т. е. перпендикулярно направлению распространения сдвиговых волн. («Поперечные» образцы.) Наконец, использовались образцы произвольной ориентации волокон.

В табл. 1 приведены результаты измерений, причем строка «поперечные 1» относится к ориентации волокон вдоль оси  $y$ , строка «поперечные 2» — к ориентации вдоль оси  $z$ .

Таблица 2

Название рыбы	Частота, кгц	$\mu_0 \cdot 10^{-6}$ , дин/см <sup>2</sup>	$\eta$	Название рыбы	Частота, кгц	$\mu_0 \cdot 10^{-6}$ , дин/см <sup>2</sup>	$\eta$
Камбала, ткань мышечн. с кожей	11,8	3,9	0,23	Ставрида, ткань мышечн. с кожей	9,68	0,76	0,18
То же	11,4	3,6	0,23	То же	3,70	0,09	0,25
» »	8	1,1	0,24	Горбыль, мышечная ткань	11,6	1,5	0,26
» »	1,58	0,12	0,30	То же	9,72	0,65	0,27
Ставрида, ткань мышечн. с кожей	11,4	1,3	0,17	» »	3,68	0,12	0,31
То же	9,8	0,80	0,17	» »	3,53	0,10	0,30

Анализ результатов, полученных в опытах с бычьей тканью, показывает, что существует зависимость величины модуля сдвига от направления волокон ткани по отношению к направлению распространения сдвиговых колебаний: модуль сдвига для поперечных образцов вдвое больше модуля сдвига продольных образцов. Это объясняется, по-видимому, тем, что связь между волокнами слабее связи между отдельными структурными элементами волокна.

Серия опытов была проведена также с тканями различных морских рыб. Измерения проводились на различных частотах с целью выяснения зависимости модуля сдвига от частоты. Результаты сведены в табл. 2; данные относятся к произвольной ориентации волокон в образце.

Опыты проводились с тканями только что уснувших рыб.

Из таблицы видно, что частотный ход изменения сдвигового модуля тканей различных рыб очень близок и зависимость от частоты сильно выражена.

В заключение автор выражает благодарность Н. С. Агеевой за постоянное внимание к работе и И. П. Жукову за большую помощь в разработке и наладке измерительной установки.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступила в редакцию  
28 июня 1963 г.