

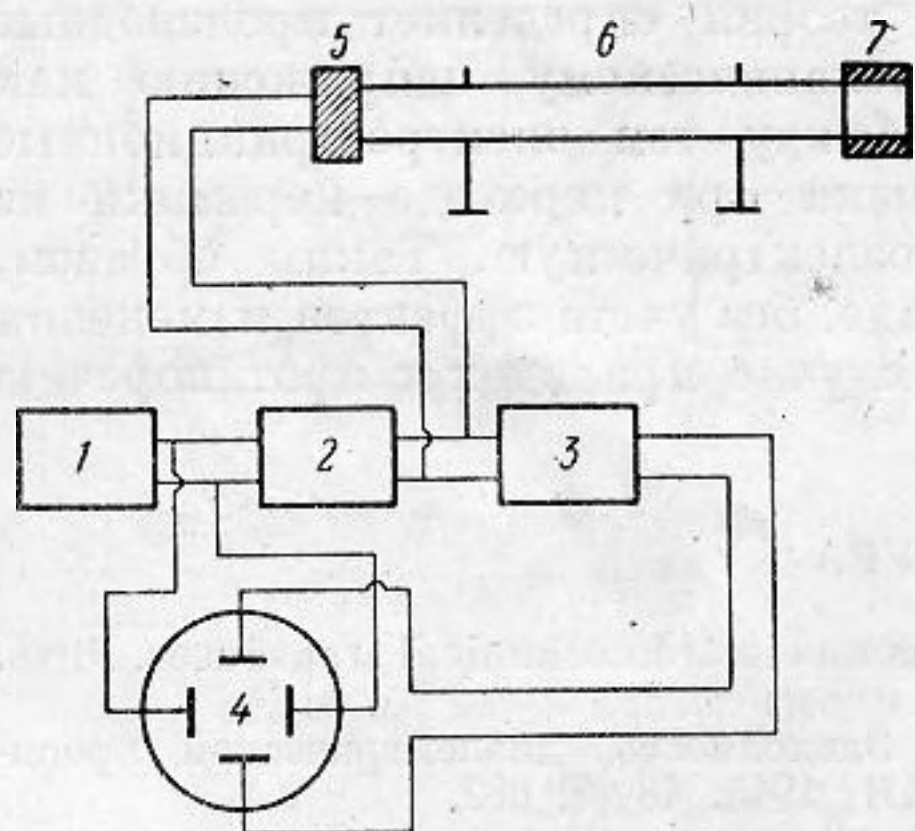
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИНЫ НА ЗВУКОВЫХ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ

В. В. Тютюкин

Описывается метод определения механических параметров резины в непрерывном диапазоне частот, позволяющий измерять модуль упругости и коэффициент потерь при сдвиговых деформациях для частот от 4 до 50 кгц.

Теория метода

В данной работе метод, описанный в работе [1], видоизменен таким образом, чтобы получить возможность измерения сдвиговых упругих параметров резины в непрерывном диапазоне частот и без посредства такой сложной механической установки, как импульсная труба. Для



Фиг. 1. Общая схема установки:

1 — генератор, 2 — датчик импульсов, 3 — фазовращатель, 4 — осциллограф, 5 — излучатель, 6 — акустическая длинная линия, 7 — образец испытываемого материала

этого была использована акустическая длинная линия, представляющая собой дюралюминиевую трубку, на одном конце которой укреплен излучатель, посылающий акустические импульсы (дуго продольных волн) (фиг. 1). В перерывах между посылками излучатель работает в качестве приемника импульсов, отраженных от противоположного конца трубки. На внешнюю поверхность трубки у свободного ее конца наклеивается измеряемый образец резины в виде охватывающего трубку кольца. Возбуждаемые излучателем продольные колебания в стенке трубки преобразовываются в сдвиговые колебания в резиновом образце, распространяющиеся по его

толщине. Рассматривая оклеенную образцом резины часть трубки как нагрузку акустической длинной линии и измеряя импеданс этой нагрузки, можно определить искомые величины  $\mu_0$  и  $\eta$ . В свою очередь импеданс определяется на основании измерения комплексного коэффициента отражения от нагрузки  $\bar{\beta} = |\beta| e^{-i\varphi}$ .

Модуль коэффициента отражения выражается формулой  $|\beta| = \frac{a_1}{a_2}$ , где  $a_1$  — амплитуда импульса, отраженного от нагрузки,  $a_2$  — амплитуда импульса, отраженного от свободного конца линии при снятой нагрузке, т. е. при удалении образца с поверхности трубки. Фаза коэффициента отражения вычисляется по формуле

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + \pi - 2kl, \tag{1}$$

где  $k = \frac{\omega}{c}$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — фазы отражения тех же импульсов соответственно,  $l$  — длина части трубки, оклеенной резиной,  $\omega$  — круговая частота,

$c$  — скорость продольных звуковых волн в стенке трубки. Последний член выражения (1) учитывает дополнительный двойной набег фазы на длине  $l$ , возникающий при удалении образца. Добавление к суммарной фазе величины  $\pi$  обусловлено тем, что при отражении импульса от свободного конца линии происходит опрокидывание фазы.

Импеданс нагрузки  $Z_H = \rho c (R_H + iX_H)$  выражается через комплексный коэффициент отражения  $\beta$  следующим образом [1]:

$$R_H = \frac{1 - |\beta|^2}{1 + |\beta|^2 - 2|\beta| \cos \varphi}, \quad X_H = \frac{2|\beta| \sin \varphi}{1 + |\beta|^2 - 2|\beta| \cos \varphi}.$$

Здесь  $\rho c$  — волновое сопротивление линии. Из импеданца нагрузки  $Z_H$  при помощи номограммы, приведенной в работе [1], можно определить механический импеданц образца на единицу поверхности  $Z_0 = R_0 + iX_0$ . В этой номограмме по координатным осям откладываются значения  $R = klR_H$  и  $X = klX_H$ , а по криволинейным сеткам определяются вспомогательные величины  $L_1$  и  $\eta_{11}$ , посредством которых вычисляются значения  $R_0$  и  $X_0$ :

$$R_0 = \rho \omega d' \eta_{11} \left( \frac{L_1}{kl} \right)^2, \quad X_0 = \rho \omega d' \left[ \left( \frac{L_1}{kl} \right)^2 - 1 \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  — плотность материала трубки, а величина  $d'$  определяется через толщину стенки трубки  $d$  и внешний радиус трубки  $R$ :

$$d' = d \left( 1 - \frac{d}{2R} \right).$$

Отметим, что в отличие от работы [1] импеданц образца можно определять не на отдельной частоте (резонансной частоте стержня), а в весьма широком и непрерывном диапазоне частот. Определение комплексного модуля сдвига  $\mu = \mu_0 (1 - i\eta)$  по известному значению импеданца образца  $Z_0 = R_0 + iX_0$  описано в работе [2].

### Экспериментальные результаты

В процессе разработки данного метода были произведены измерения механических параметров различных сортов резины в диапазоне частот от 4 до 50 кгц при температуре  $t = 20^\circ \text{C}$ . Можно показать, что чувствительность метода зависит от величины  $Z_0/\rho \omega d$ ; чем больше эта величина, тем больше отличается импеданц отрезка трубки, оклеенного образцом резины, от импеданца самого отрезка трубки  $Z_{\text{тр}} = -i\rho c \operatorname{tg} kl$ . Таким образом, для получения большой чувствительности необходимо иметь:

- 1) малую толщину стенки трубки;
- 2) малую плотность материала трубки (поэтому в качестве материала выбран дюралюминий);
- 3) по возможности большие значения  $Z_0$ , что достигается при толщинах образца

$$l_0 \approx 0,25 \lambda_0, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  — длина сдвиговой волны в резине.

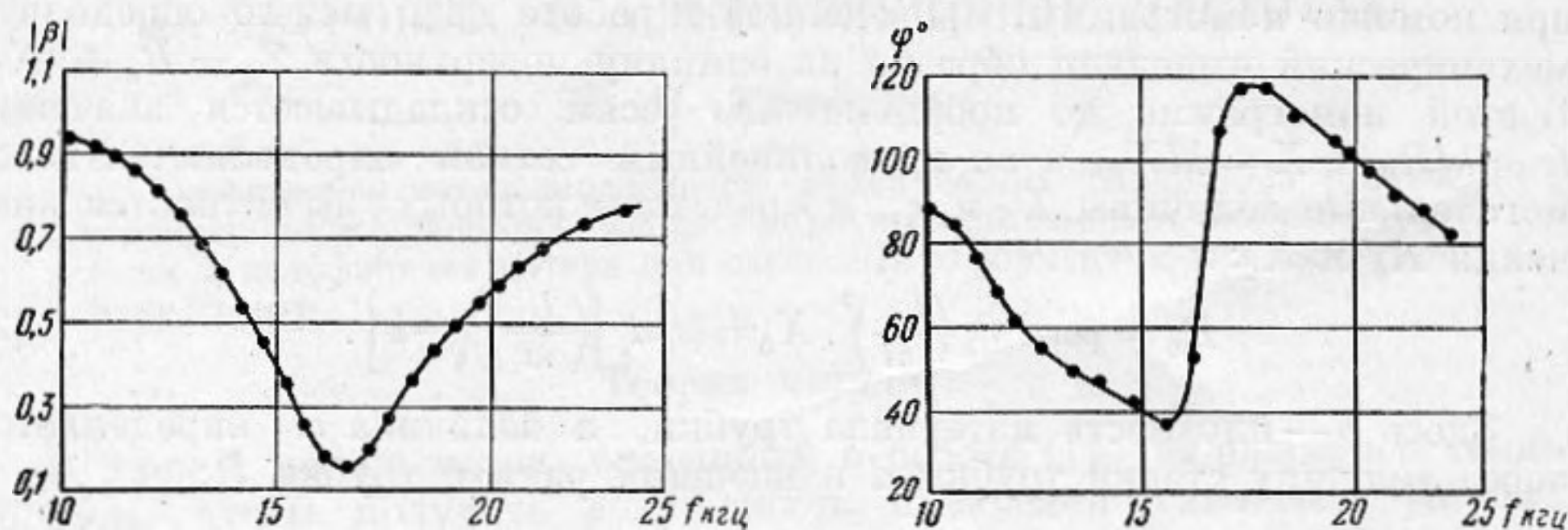
Опыт показывает, что с одним и тем же образцом можно получить достаточную чувствительность только в пределах примерно одной октавы; поэтому для измерения в широком диапазоне частот следует использовать несколько образцов различной толщины.

Нижняя граничная частота  $f_H$  диапазона измерений определяется из условия, что толщина образца должна быть в несколько раз меньше радиуса трубки (условие, при котором сдвиговую волну в резиновом образце можно считать плоской) и вместе с тем удовлетворять условию (3). Кроме того, нижняя граничная частота определяется длиной

трубки. Для обеспечения достаточной монохроматичности импульса он должен содержать по крайней мере несколько колебаний, что определяет минимальную пространственную длину импульса. Длина трубки должна быть больше половины длины импульса, чтобы отраженный импульс не накладывался на прямой.

Верхняя граничная частота рабочего диапазона  $f_B$  лимитируется поперечным резонансом трубки, который наступает при  $2\pi R = \lambda = c/f_B$  [3]. Так как  $f_B$  должна быть меньше  $f_D$ , то  $f_B < c/2\pi R$ .

Исходя из выбранных значений  $f_H$  и  $f_B$ , а также с целью получения наибольшей чувствительности, были подобраны оптимальные размеры трубок. При этом в двух частотных диапазонах применялись различные



Фиг. 2. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения  $|\beta|$  и фазы отражения  $\varphi$  для образца резины

их размеры. В диапазоне 4—15 кгц применялись трубки длиной 5 м, внешним диаметром 40 мм и толщиной стенки 2 мм; в диапазоне 10—50 кгц применялись трубки длиной 2—3,5 м, внешним диаметром 28 мм и толщиной стенки 1 и 2,5 мм. С одного конца трубки впрессовывается металлическая пластинка толщиной 2 мм, а затем поверхность торца трубки шлифуется. К этому торцу плотно прижимается своей излучающей поверхностью излучатель, представляющий собой пластинчатый пакет сегнетовой соли. Излучатель помещается в плексигласовом корпусе, навинчиваемом на конец трубки, и прижимается к торцу трубки при помощи поршня с пружиной. Трубка крепится при помощи опорных винтов в двух кольцах, поддерживаемых металлическими стойками. Отражения импульсов от опорных винтов практически отсутствуют, так как концы винтов, соприкасающиеся с трубкой, остро заточены. Схема установки изображена на фиг. 1. Электрическая часть ее полностью совпадает с описанной в [1].

В качестве проверки возможности использования метода были измерены частотные характеристики  $\mu_0$  и  $\eta$  для различных сортов резины. Для исключения случайных ошибок эксперимента применялось графическое сглаживание измеренных и вычисленных величин. В качестве примера на фиг. 2 представлены точками измеренные, а кривыми сглаженные частотные зависимости модуля коэффициента отражения  $|\beta|$  и фазы отражения  $\varphi$  для образца одной резины. Подобным же образом сглаживались и все промежуточные вычисленные из номограмм величины. Полученные значения  $\mu_0$  и  $\eta$  в условных единицах для различных частот приведены на фиг. 3. При этом на фигуре дополнительно показаны значения  $\mu_0$  и  $\eta$ , полученные методом импульсной трубы [1] и методом электромеханического Ку-метра [2]. Разница в значениях, полученных различными методами, не превышает ошибки измерений каждого метода. Из графиков фиг. 3 видно, что  $\mu_0$  и  $\eta$  растут с частотой. Это находится в согласии с теорией релаксационных процессов в резине при периодических сдвиговых напряжениях (см., например, [4] и [5]).

Наряду с частотной зависимостью  $\mu_0$  и  $\eta$  была измерена температурная зависимость этих величин для различных сортов резины. Для измерения температурной зависимости механических параметров резины конец трубки с наклеенным образцом помещается в термостат. Для измерения фазы и амплитуды отражения был применен метод сравнения со второй, эталонной, трубкой, находящейся точно в таких же температурных условиях. Длина эталонной трубки была меньше длины трубки с измеряемым образцом резины на величину наклейки  $l$ . Фаза вычислялась по формуле  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + \pi$ . Измерения проводились в диапазоне температур от  $+5^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$ , хотя принципиально возможно проводить измерения и в более широком температурном диапазоне.

Наряду с измерениями  $\mu_0(t^\circ)$  и  $\eta(t^\circ)$  данным методом измерялась та же зависимость для той же частоты методом электромеханического Ку-метра. Как показал опыт, результаты, полученные двумя методами, хорошо согласуются. Характер зависимости  $\mu_0$  и  $\eta$  от температуры также хорошо согласуется с выводами релаксационной теории.

Достоинствами описанного метода измерения механических параметров резины являются: 1) возможность измерения в широком (около 3,5 октавы) и непрерывном диапазоне частот; 2) сравнительная простота механической части установки и несложность самих измерений; 3) возможность измерения образцов с большой площадью; 4) возможность измерения в широком диапазоне температур.

Недостатками метода являются трудно контролируемое влияние слоя клея на измеряемые величины, а также сложный и громоздкий расчет, что снижает точность определения  $\mu_0$  и  $\eta$  по измеренным величинам  $|\beta|$  и  $\varphi$  и ведет к значительному разбросу в окончательных результатах, достигающему  $\pm 10-12\%$ . Однако приведенные выше результаты измерений описанным методом и их хорошее совпадение с результатами измерений другими методами показывают, что этот метод измерения механических параметров резины вполне пригоден для практических целей.

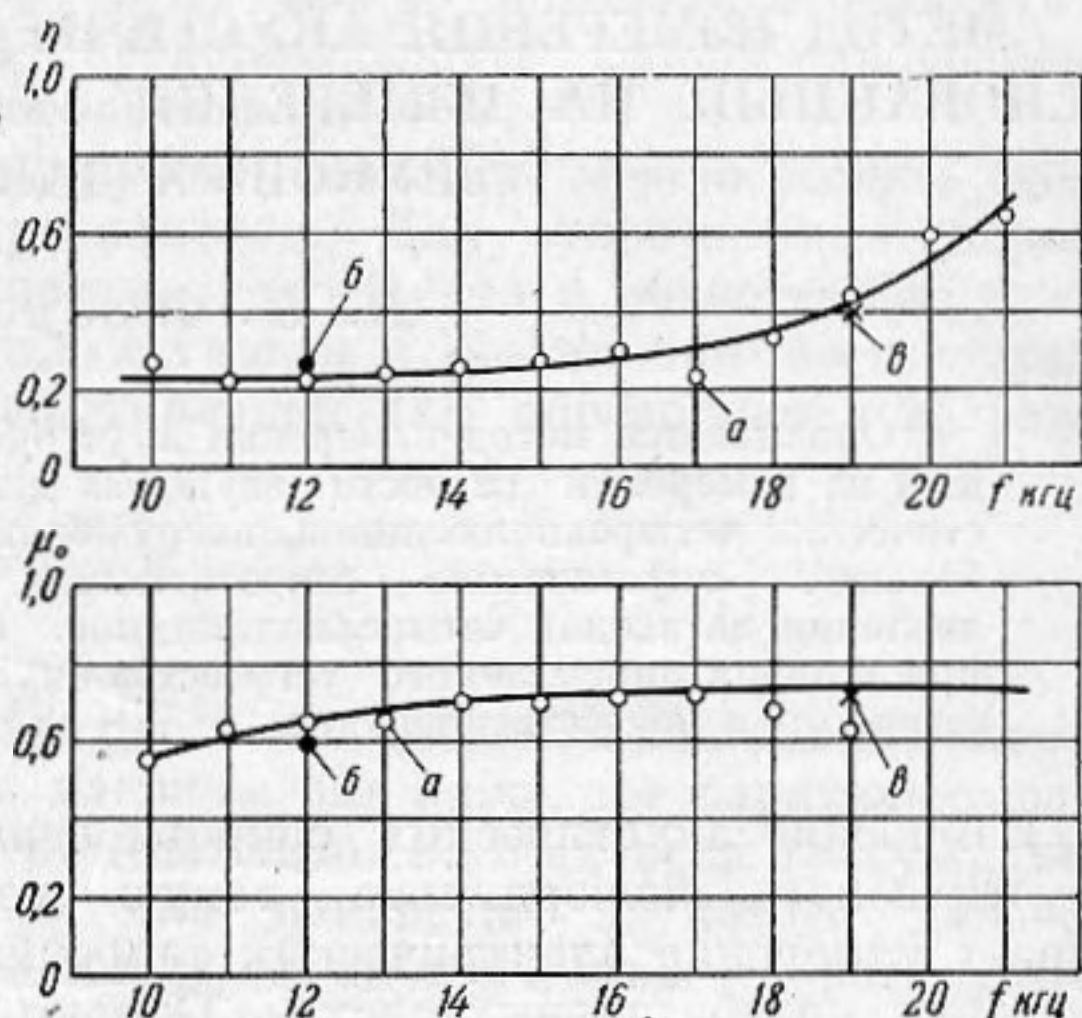
В заключение автор выражает глубокую благодарность Ю. М. Сухаревскому и Н. С. Агеевой за помощь в работе, И. А. Викторову, В. И. Капиной и И. С. Кисленко за проведение измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Агеева. Измерение упругих параметров материалов методом импульсной трубы. Акустический журнал, 1955, 1, 2, 110.
2. Н. С. Агеева, И. П. Жуков, М. А. Исакович, А. Л. Соседова, Ю. М. Сухаревский. Электромеханический Ку-метр — установка для измерения модуля упругости и потерь в материалах на ультразвуке. ЖТФ, 1952, 22, 6, 1029.
3. Рэлей. Теория звука, т. I., ГИТТЛ, 1955.
4. А. П. Александров и Ю. С. Лазуркин. Изучение полимеров. ЖТФ, 1939, 9, 14, 1249.
5. Т. Алфрей. Механические свойства высокополимеров, ИЛ, 1953.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступила в редакцию  
20 апреля 1955 г.



Фиг. 3. Частотная зависимость модуля сдвига  $\mu_0$  и коэффициента потерь  $\eta$  (в условных единицах); а — данный метод, б — метод импульсной трубы, в — метод Ку-метра