АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 1, с. 123–126

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.232

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКУСТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ ИЗ РЕЗИНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ

© 2003 г. А. И. Бойко, В. Е. Глазанов*, А. В. Михайлов*, В. В. Тютекин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
** Центральный научно-исследовательский институт Морфизприбор*
197376 Санкт-Петербург, Чкаловский просп. 46
E-mail: eugenia @ dg 3409.spb.edu

Поступила в редакцию 14.05.2001 г.

Приведены полученные на установке "Акустическая низкочастотная труба" результаты измерений коэффициентов отражения и прохождения образцов экранов, содержащих слой стали и набор слоев из резины с цилиндрическими каналами (РЦК). Показано удовлетворительное совпадение эксперимента с расчетом, проведенным на основе теории больших деформаций РЦК.

При создании акустических экранов для широкополосных приемных антенн, удовлетворяющих широкому набору требований, включая работу при высоких гидростатических давлениях, предпочтительным является применение слоистой системы "масса–упругость" [1], где в качестве массы используется металлическая пластина, а упругостью обычно служит набор плоских слоев из резины с цилиндрическими каналами (РЦК), склеенных между собой через тонкие металлические прокладки той же площади. Теории расчета акустических и упругих характеристик среды с цилиндрическими каналами, впервые описанной в статье [2], посвящено большое число работ, наиболее полно обобщенных в книгах [1, 3]. Применение экранов, выполненных из эластомеров, исследовано также в статье [4]. В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований образцов из РЦК. Измерения коэффициентов отражения и прохождения образцов были проведены на установке Акустического института им. Н.Н. Андреева "Акустическая низкочастотная труба" (АНТ) [5, 6] при гидростатических давлениях до 6×10^6 Па.

Образец № 1 содержал следующие 4 элемента: а) слой из стали толщиной d = 7см; б) два элемента, каждый из которых состоял из 4 слоев РЦК с наружными титановыми накладками толщиной Δ_1= 0.5 см и промежуточными пластинами из титана толщиной Δ_2= 0.1 см; в) один элемент, состоящий из 3 слоев РЦК с такими же, как в п. б), пластинами Δ_1и Δ_2. Общее число слоев РЦК N = 11, диаметр цилиндрического канала $2a$ = 1.1 см, число каналов в слое n = 55, диаметр образца D = 14.8 см. При определении коэффициента перфорации РЦК следует исходить из того, что продольное статическое сжатие слоя из резины с цилиндрическими каналами, а также импеданс образца с диаметром, ограниченным стенками цилиндрической трубы, для плоской волны – при достаточной жесткости наружных титановых пластин – определяется усредненным коэффициентом перфорации, вычисляемым как отношение суммарной площади поперечного сечения всех цилиндрических каналов к площади помещенного в трубу образца. Определенный таким образом коэффициент перфорации равен: $\varepsilon^2 = \dfrac{n\pi a^2}{\pi D^2/4} = 0.29$. Высота отдельного слоя РЦК h_0 = 1.3 см, отношение h_0/b = 1.6, где b – наружный радиус трубки, являющейся моделью среды с цилиндрическими каналами. Общая толщина набора из РЦК L_0 = 18 см, суммарная толщина образца $L_0 + d$ = 25 см.

Образец № 2 содержал следующие 5 элементов: а) слой из стали толщиной d = 7 см; б) три элемента, каждый из которых состоял из 3 слоев РЦК с наружными титановыми накладками толщиной Δ_1= 0.4 см и промежуточными пластинами из титана толщиной Δ_2= 0.1 см; в) один элемент, состоящий из 2 слоев РЦК с такими же, как в п. б), накладками Δ_1 и промежуточной пластиной Δ_2. Общее число слоев РЦК N = 11. Цилиндрические каналы были двух типов: 1) $2a_1$ = 1.6 см, n_1 = 31; 2) $2a_2$ = 1.0 см, n_2 = 10. Усредненный по площади коэффициент перфорации $\varepsilon^2 = \dfrac{n_1\pi a_1^2 + n_2\pi a_2^2}{\pi D^2/4} = 0.39$; h_0 = 1.6 см; h_0/b = 1.5; L_0 = 21 см; $L_0 + d$ = 28 см. Накладки и промежуточные пластины в образцах

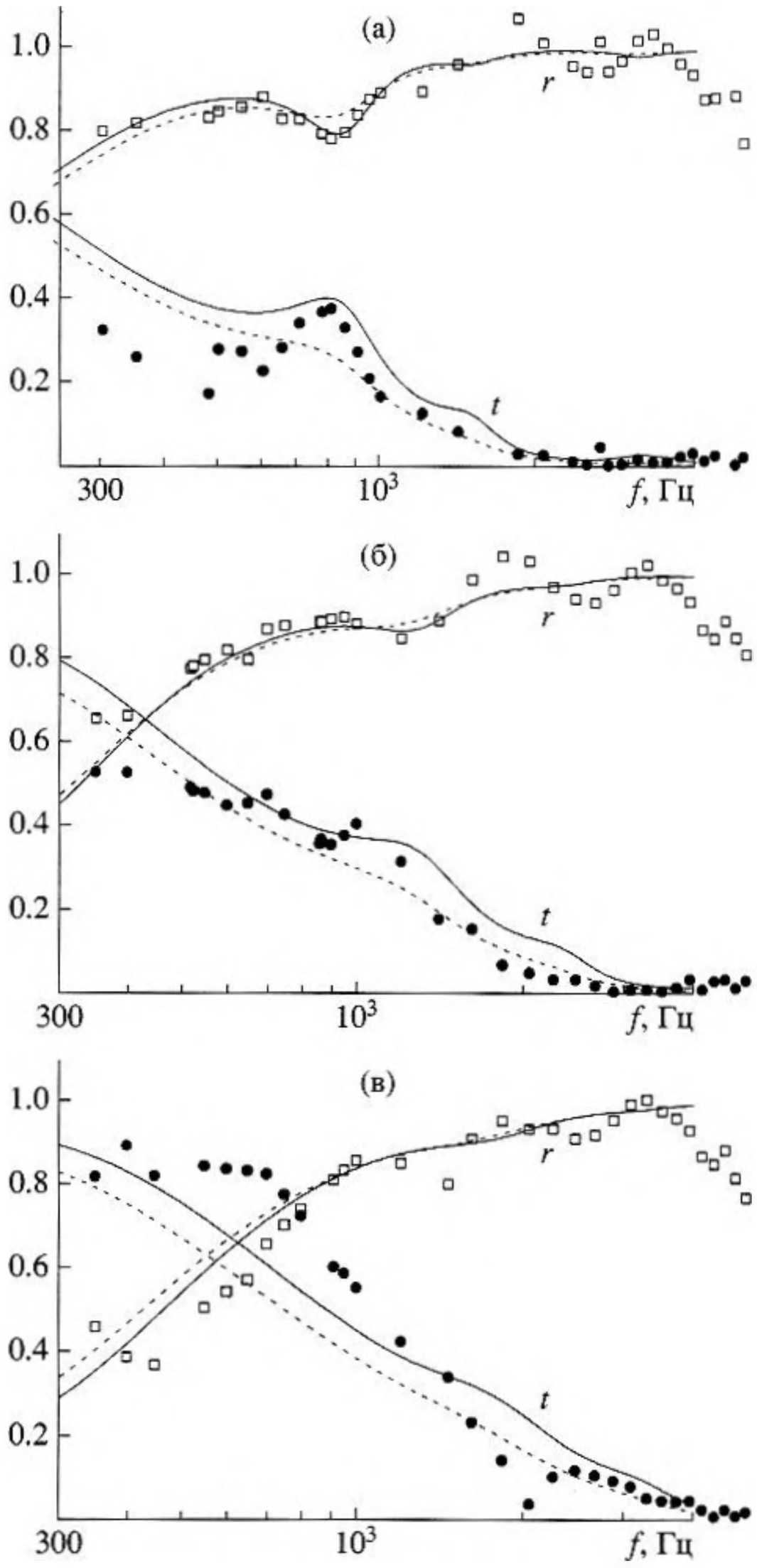

Рис. 1. Частотные зависимости модулей коэффициента отражения r и прохождения t для образца № 1. $\eta_c = 0.1$ – сплошные линии; $\eta_c = 0.2$ – пунктирные линии; а – $P = 2 \times 10^6$ Па; б – $P = 4 \times 10^6$ Па; в – $P = 6 \times 10^6$ Па.

были скреплены по плоскости со слоями из РЦК при помощи вулканизации.

Измерения проводились отдельно в частотных диапазонах (300–1000) Гц и (1000–4000) Гц при гидростатических давлениях P от 1×10^6 Па до 6×10^6 Па. Погрешность установки АНТ была определена при измерениях коэффициентов отражения r и прохождения t стального образца диаметром 14.8 см и толщиной 7 см. В результате этих измерений и их последующей статистической обработки установлено, что случайная погрешность измерений r и t не превосходит 1.5 дБ.

Результаты измерений образцов № 1 и № 2 для трех значений гидростатического давления приведены на рис. 1 и 2. Там же нанесены теоретические зависимости модулей коэффициентов отражения r и прохождения t от частоты, рассчитанные по теории слоев [7] для нескольких значений коэффициентов потерь ($\eta_c = 0.1$ – сплошные линии, $\eta_c = 0.2$ – пунктирные линии). В программе расчета многослойная система представлена в виде каскадного включения четырехполюсников. Параметры РЦК для измеряемых образцов рассчитаны, исходя из соотношений работы [1], полученных для случая больших деформаций слоев из резин с цилиндрическими каналами. Отметим, что расчет проводился без учета динамической поправки, аналогичной поправке Рэлея для резины с цилиндрическими каналами [8], поскольку на частотах ниже 1000 Гц ее влияние на скорость упругих волн несущественно, а на частотах выше 1000 Гц она практически не проявляется – из-за высокой звукоизоляции массивной стальной пластины. Упругие характеристики резины-основы при расчете принимались следующими: статический модуль сдвига, измеренный на статическом прессе по методике работы [9], $\mu_{\tilde{n}0} = 15$ кГ/см^2; скорость сдвиговых волн, определенная при помощи прибора 3930 фирмы "Брюэль и Кьер" для измерения комплексного модуля Юнга $\bar{E} = E_0(1 - i\eta_E)$ [10], равна $c_t = \sqrt{E_0/3\rho} = 0.7 \times 10^4$ см/с.

Анализ результатов измерений коэффициентов отражения r и прохождения t показывает следующее:

1. В диапазоне частот (300–1000) Гц экспериментальные значения r при гидростатических давлениях до $P = 6 \times 10^6$ Па практически совпадают с расчетными характеристиками. Из-за особенностей измерительной установки для образца с высокой звукоизоляцией (при давлениях до $P \leq \leq 4 \times 10^6$ Па) измеренные величины t существенно отличаются от расчетных. Однако при $P = 6.0 \times \times 10^6$ Па, когда коэффициент прохождения образцов увеличивается – за счет сжатия слоев из РЦК, т.е. роста относительного волнового сопротивления m и уменьшения толщины h_P, – расчет вновь приближается к эксперименту.

2. В области частот выше 1000 Гц измеренные значения r вне зависимости от величины гидростатического давления осциллируют вблизи расчетных характеристик с практически постоянным периодом. Это указывает на наличие систематической ошибки, вносимой измерительной установкой, которая, однако, не превышает величину случайной погрешности.

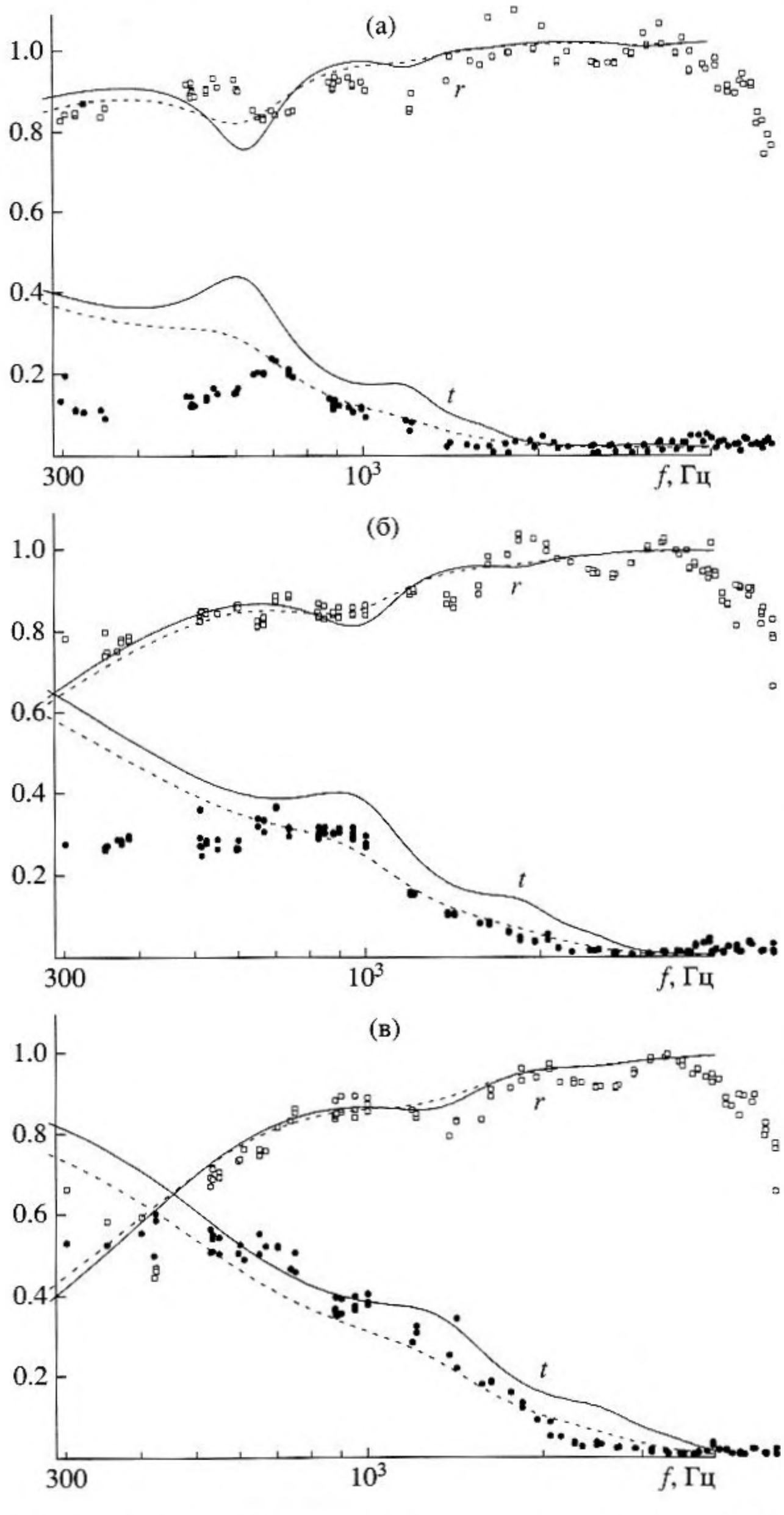

Рис. 2. Частотные зависимости модулей коэффициента отражения r и прохождения t для образца № 2. (Обозначения – те же, что на рис. 1).

3. В области частот до 1000 Гц более предпочтительно принять коэффициент потерь в резине $\eta_c = 0.1$. С увеличением частоты лучшее соответствие эксперименту дают значения $\eta_c = 0.2$, особенно для наиболее чувствительной к этому параметру характеристики t.

Для образца № 2 – в отличие от образца № 1 – был проведен цикл измерений, осуществленных в разное время с выемкой и новой установкой образца в трубу. Видно хорошее совпадение между собой результатов этих измерений, что говорит об их достоверности.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Э.В. Лабецкому – за большую работу, проведенную по метрологической аттестации измерительной установки, Н.С. Исаеву и И.И. Андрееву, обеспечившим наладку и эффективную работу "Акустической низкочастотной трубы" и участвовавшим в измерениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глазанов В.Е.* Экранирование гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1986.
2. *Тютекин В.В.* Распространение упругих волн в среде с цилиндрическими каналами // Акуст. журн. 1956. Т. 2. № 3. С. 291–301.
3. *Ляпунов В.Т., Лавендел Э.Э., Шляпочников С.А.* Резиновые виброизоляторы. Л.: Судостроение, 1988.
4. *Sung H.Ko.* Reduction of structure–born noise using an air-voided elastomer // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 6. P. 3306–3312.
5. *Вовк А.В., Климов С.П., Тютекин В.В.* Измерение коэффициента отражения звука в акустических трубах с применением однонаправленной системы приема // Измерительная техника. 1975. № 7. С. 76–77.
6. *Тютекин В.В.* О точности измерений характеристик материалов в акустической низкочастотной трубе // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 843–852.
7. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. 2-е изд. М.: Наука, 1973.
8. *Глазанов В.Е., Михайлов А.В.* О расчете скорости звука в резине с цилиндрическими каналами с учетом динамической поправки // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 835–840.
9. *Тарасов Л.А., Тютекин В.В.* Метод измерения модулей сдвига и сжатия резины при малых деформациях // Каучук и резина. 1960. № 9. С. 38–41.
10. Каталог приборов для анализа звука, вибраций и обработки данных. Дания, Брюэль и Кьер. 1978–1981.

Experimental Study of the Elements of Acoustic Screens Made of Rubber with Cylindrical Voids

A. I. Boiko, V. E. Glazanov*, A. V. Mikhailov*, and V. V. Tyutekin

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia

** Morfizpribor Central Research Institute, Chkalovskii pr. 46, St. Petersburg, 197376 Russia*

e-mail: eugenia@dg3409.spb.edu

Abstract—For samples of screens made in the form of a steel layer with an overlying stack of rubber layers with cylindrical voids, the reflection and transmission coefficients are measured using the Low-Frequency Acoustic Pipe system. The experimental data are shown to agree well with the calculations performed on the basis of the theory of large deformations of rubber with cylindrical voids.