АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2001, том 47, № 6, с. 843–852

УДК 534.64

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В АКУСТИЧЕСКОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ТРУБЕ

© 2001 г. В. В. Тютекин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail:tyutekin@akin.ur

Поступила в редакцию 25.01.2001 г.

Рассматривается влияние ошибок реализации метода на точность измерений на установке "Акустическая низкочастотная труба" (АНТ), основанной на принципе однонаправленного приема звука. Теоретически рассчитываются погрешности в определении комплексных коэффициентов отражения и прохождения звука измеряемых образцов. Проведен численный анализ этих погрешностей на примере эталонных образцов.

Развитие методов низкочастотной гидролокации (см., например, [1, 2]), потребовало разработки и реализации адекватных методов измерения акустических характеристик материалов и конструкций из них, применяемых в гидроакустике. К последним можно отнести конструкции, выполняющие, например, звукоизолирующие, звукопоглощающие, звукоотражающие и др. функции. Их основными акустическими характеристиками являются комплексные величины импедансов, коэффициентов отражения, коэффициентов звукопрохождения и др.

Применявшиеся ранее для этих целей измерительные методы, например, "импульсная труба" [3] и некоторые другие [4], реально могут обеспечить измерения, начиная с частот в несколько кГц и выше. Понижение диапазона частот до 50–100 Гц потребовало бы увеличения длины установки в десятки раз.

Измерительная установка АНТ, некоторые особенности которой описываются в настоящей статье, достаточно подробно описана в литературе [5–9]. Основным ее качеством является то, что при сравнительно малой длине трубы (на нижней частоте диапазона она составляет 0.2λ), она позволяет измерять указанные акустические характеристики в режиме "бегущей волны". Отметим, что в настоящее время появилась ее модификация, предназначенная для аналогичных измерений в воздушной среде [10].

Для ясности дальнейшего изложения приведем краткое описание метода и установки АНТ, реализующей его (рис. 1). Измерения проводятся в толстостенной разъемной цилиндрической трубе (4) общей длиной 3.5 м, заполненной водой, при различных значениях температуры и статического давления. Измеряемый образец помещается в середину трубы и с помощью подвеса фиксируется на верхнем фланце нижней половины трубы. Звуковое поле, падающее на образец, возбуждается излучателем (6) от генератора (7) на фиксированных частотах в диапазоне 100–5000 Гц (разделенном на два поддиапазона 100–1000 Гц и 1000–5000 Гц) при непрерывном излучении.

Одной их характерных особенностей АНТ является использование так называемого однона-

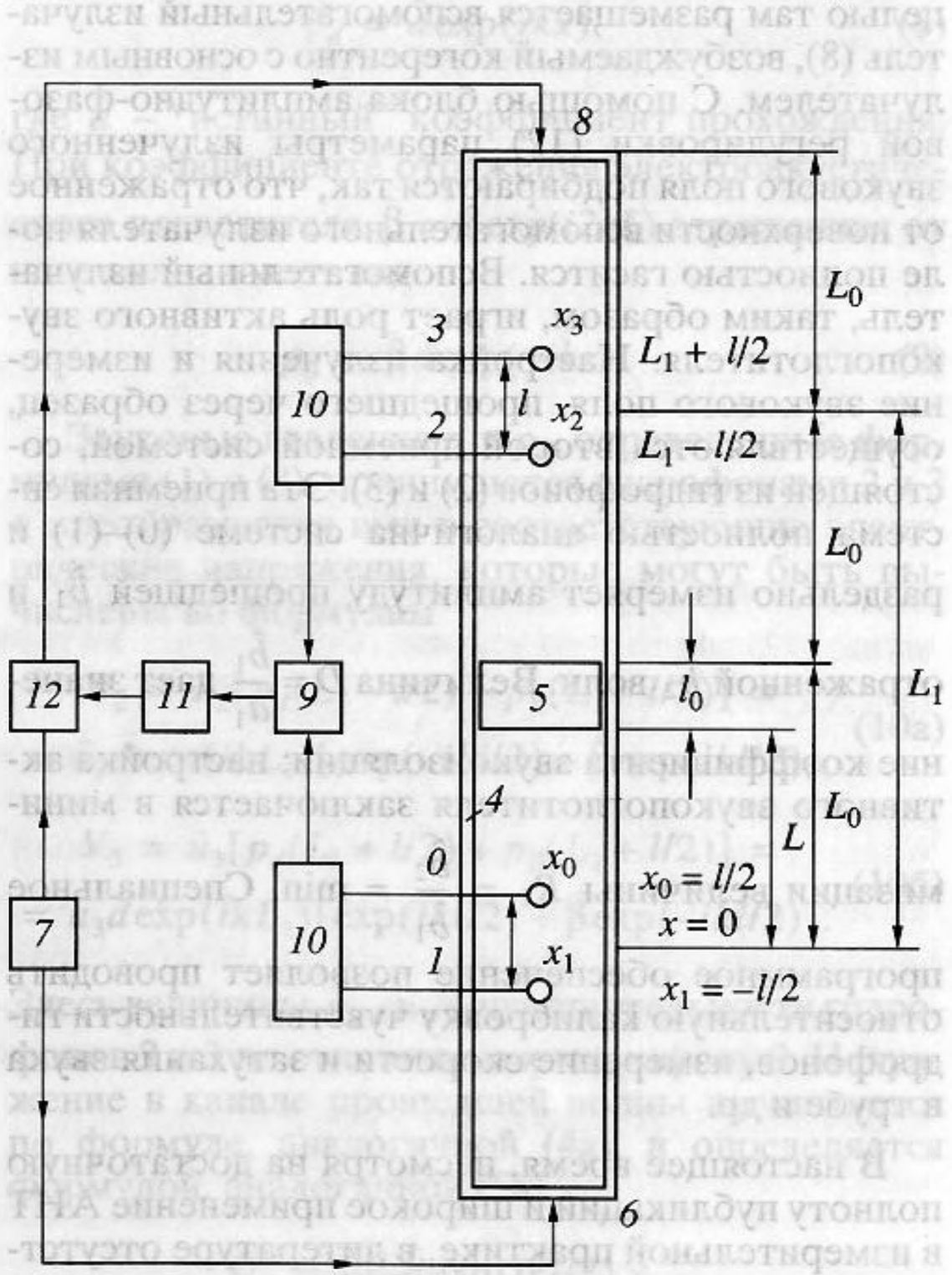

Рис. 1. Блок-схема измерительной установки АНТ.

правленного приема, реализующего приемную поверхность Гюйгенса и широко используемого в одномерных системах гашения звука. В описываемой установке однонаправленный прием падающего и отраженного от образца полей производится приемной системой, состоящей из двух миниатюрных гидрофонов (0) и (1) и попеременно осуществляющей однонаправленный прием. При этом показания каждого из гидрофонов подвергаются совместной обработке путем введения соответствующего фазового сдвига. Это позволяет в отдельности измерить комплексные амплитуды падающей $\hat{a}_1$ и отраженной от образца $\hat{a}_2$ волн; их отношение дает величину комплексного коэффициента отражения $\hat{R} = \dfrac{\hat{a}_2}{\hat{a}_1}$.

Процесс измерения осуществляется аналого-цифровым способом. Излучение и прием производятся аналоговой аппаратурой (генератор, усилители и др.), обработка сигналов, в том числе настройка звукопоглотителя, производится ЭВМ (9) по специально разработанным программам. Взаимная связь осуществляется через АЦП (10) и ЦАП (11).

Величина звукоизоляции измеряется в режиме "бегущей" волны, т.е. прошедшая через образец волна поглощается на верхнем конце трубы. С этой целью там размещается вспомогательный излучатель (8), возбуждаемый когерентно с основным излучателем. С помощью блока амплитудно-фазовой регулировки (12) параметры излученного звукового поля подбираются так, что отраженное от поверхности вспомогательного излучателя поле полностью гасится. Вспомогательный излучатель, таким образом, играет роль активного звукопоглотителя. Настройка излучения и измерение звукового поля, прошедшего через образец, осуществляются второй приемной системой, состоящей из гидрофонов (2) и (3). Эта приемная система полностью аналогична системе (0)–(1) и раздельно измеряет амплитуду прошедшей $\hat{b}_1$ и отраженной $\hat{b}_2$ волн. Величина $D = \dfrac{\hat{b}_1}{a_1}$ дает значение коэффициента звукоизоляции; настройка активного звукопоглотителя заключается в минимизации величины $\hat{R}_1 = \dfrac{\hat{b}_2}{\hat{b}_1} = \min$. Специальное программное обеспечение позволяет проводить относительную калибровку чувствительности гидрофонов, измерение скорости и затухания звука в трубе и др.

В настоящее время, несмотря на достаточную полноту публикаций и широкое применение АНТ в измерительной практике, в литературе отсутствует сколько-нибудь подробный анализ влияния возможных ошибок реализации метода на точность измерений комплексных коэффициентов отражения и прохождения звука. Такой анализ может помочь в выявлении наиболее значащих ошибок, а также максимально увеличить точность измерений за счет их устранения или, по крайней мере, снижения.

В настоящей работе рассмотрено влияние наиболее существенных, с точки зрения автора, возможных ошибок, прежде всего, это неточность калибровки гидрофонов. Эта неточность приводит к несоответствию чувствительности гидрофонов, попарно образующих однонаправленные комбинированные приемники.

Рассмотрим вопрос о влиянии ошибок калибровки гидрофонов на точность измерения, т.е. насколько измеренные комплексные коэффициенты отражения и прохождения звука отличаются от соответствующих "истинных" их величин. На основании полученных результатов можно будет определить величину допустимых ошибок калибровки, исходя из заданной точности определения указанных коэффициентов, опираясь на расчетные и измеренные значения для некоторых эталонных образцов.

На рис. 1 показана блок-схема установки и координатная система, используемая в дальнейших расчетах. Начало координат соответствует половине расстояния между гидрофонами, образующими нижнюю приемную систему и расположенными в точках с координатами $x_0 = \dfrac{l}{2}$, $x_1 = -\dfrac{l}{2}$, где l – расстояние между гидрофонами 0 и 1. Нижняя поверхность образца имеет координату $x = L = L_0 - l_0$, где L_0 – расстояние до середины трубы, l_0 – толщина образца.

Срединная плоскость верхней приемной системы расположена при $x = L_1$, где $L_1 = 2L_0$ – расстояние между срединными плоскостями верхней и нижней систем. Гидрофоны верхней системы номеров 2 и 3 имеют координаты $x_2 = L_1 - \dfrac{l}{2}$, $x_3 = L_1 + \dfrac{l}{2}$. Расстояние от $x = L_1$ до поверхности воды равно L_0.

Давление p_i в падающей плоской волне единичной амплитуды и в отраженной волне p_r можно записать в виде

$$p_i = \exp(ikx), \quad p_r = \hat{r}\exp(-ikx). \qquad (1)$$

Здесь $k = \dfrac{\omega}{c_0}$ – волновое число, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, c_0 – скорость звука, $\hat{r}$ – комплексный коэффициент отражения звука от образца, приведенный к сечению $x = 0$ и определяемый соотношением

$$\hat{r} = r\exp(i2kL), \qquad (2)$$

где $r = r_0\exp(i\varphi)$, r_0 и φ – модуль и фаза собственно коэффициента отражения.

Звуковые давления p_i и p_r, определенные формулой (1), принимаются каждым гидрофоном и преобразуются ими в соответствующие электрические напряжения, которые могут быть вычислены по формулам

$$V_0 = p_i(l/2) + p_r(l/2) = \\ = \exp(ikl/2) + \hat{r}\exp(-ikl/2), \quad (3а)$$

$$V_1 = u[p_i(-l/2) + p_r(-l/2)] = \\ = \hat{u}[\exp(-ikl/2) + \hat{r}\exp(ikl/2)]. \quad (3б)$$

В этих формулах полагается, что гидрофон 0 является опорным и его чувствительность равна 1. При этом чувствительность гидрофона 1 равна $\hat{u} = u\exp(i\varphi_u)$. Далее, в соответствии с алгоритмом, примененным в методе измерений, для создания однонаправленного приема используются следующие операции:

$$U_1 = V_1 + V_0\exp(i(kl + \pi)), \quad (4а)$$

$$U_2 = V_0 + V_1\exp(i(kl + \pi)). \quad (4б)$$

Здесь U_1 – напряжение, соответствующее каналу "падающая волна", U_2 – то же для канала "отраженная волна". В формулах (4а) и (4б) множитель $\exp(ikl)$ описывает линию задержки, вводимую в систему обработки.

Подставляя (3а) и (3б) в формулы (4а) и (4б) и производя необходимые преобразования, получим:

$$U_1 = -\exp(ikl/2)\times \\ \times\langle i2\sin kl - (\hat{u} - 1)[\hat{r} + \exp(-ikl)]\rangle, \quad (5а)$$

$$U_2 = -\exp(ikl/2)\times \\ \times\rangle i\hat{r}2\sin kl + (\hat{u} - 1)[1 + \hat{r}\exp(ikl)]\langle. \quad (5б)$$

Учитывая, что величина $i2\sin kl$ определяет чувствительность комбинированного приемника, и вводя величину относительной расстройки последнего $\Delta\hat{u} = \dfrac{\hat{u} - 1}{i2\sin kl}$, формулу для измеренной величины коэффициента отражения можно записать в виде

$$\hat{R} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\hat{r} + \Delta\hat{u}[1 + \hat{r}\exp(ikl)]}{1 - \Delta\hat{u}[\exp(-ikl) + \hat{r}]}. \quad (6)$$

Здесь $\hat{R} = R\exp(i2kL)$, $R = R_0\exp(i\varphi_0)$, R_0 и φ_0 – модуль и фаза измеренного коэффициента отражения.

Из формулы (6) следует, что при $\Delta\hat{u} = 0$, т.е. при идентичности гидрофонов $\hat{R} = \hat{r}$ и, следовательно, измеренный коэффициент отражения в точности совпадает с истинным. В других случаях соотношение между этими величинами носит сложный функциональный характер. Можно отметить также, что поскольку величина $\Delta\hat{u} \sim (\sin kl)^{-1}$, то на краях каждого частотного поддиапазона расхождения, следует ожидать более значительного в коэффициентах отражения, чем в их центральных частях.

Используя формулу (6), в принципе можно провести коррекцию калибровки гидрофонов. Так, если известны теоретическая и экспериментальная величины коэффициента отражения для какого-нибудь эталонного образца, то из этой формулы можно определить величину расстройки $\Delta\hat{u}$:

$$\Delta\hat{u} = \frac{\hat{r} - \hat{R}}{1 + \hat{r}\exp(ikl) + \hat{R}\exp(-ikl) + \hat{r}\hat{R}}. \quad (7)$$

Затем, на основании этого, можно определить "истинную" величину $\hat{u}$ и ввести ее в программное окно калибровочных коэффициентов.

Вывод формул для комплексного коэффициента прохождения проводится так же, как и в случае комплексного коэффициента отражения. Падающая на образец волна p_i задается формулой (1). Прошедшую волну можно представить в виде

$$p_d = d\exp(ikx), \quad (8)$$

где $\hat{d}$ – "истинный" коэффициент прохождения. При коэффициенте отражения электроакустического поглотителя $\hat{\beta} = \beta\exp(i2kL)$ отраженная от него волна имеет вид:

$$p_\beta = \hat{\beta}\hat{d}\exp(-ikx). \quad (9)$$

Звуковые давления p_i и p_d, определенные формулами (1) и (8), принимаются гидрофонами 2 и 3 и преобразуются ими в соответствующие электрические напряжения, которые могут быть вычислены по формулам

$$V_2 = \hat{u}_2[p_d(L_1 - l/2) + p_\beta(L_1 - l/2)] = \\ = \hat{u}_2\hat{d}\exp(ikL_1)[\exp(-ikl/2) + \hat{\beta}\exp(ikl/2)], \quad (10а)$$

$$V_3 = \hat{u}_3[p_d(L_1 + l/2) + p_\beta(L_1 + l/2)] = \\ = \hat{u}_3\hat{d}\exp(ikL_1)[\exp(ikl/2) + \hat{\beta}\exp(-ikl/2)]. \quad (10б)$$

Здесь величины $\hat{u}_2$, $\hat{u}_3$ – чувствительности гидрофонов 2 и 3 по отношению к гидрофону 0. Напряжение в канале прошедшей волны вычисляется по формуле, аналогичной (4а), и определяется формулой, аналогичной (5а)

$$U_3 = -\hat{u}_3\hat{d}\exp(ikl/2)\times \\ \times\rangle i2\sin kl - (\hat{u}_d - 1)[\exp(-ikl) + \hat{\beta}]\langle, \quad (11)$$

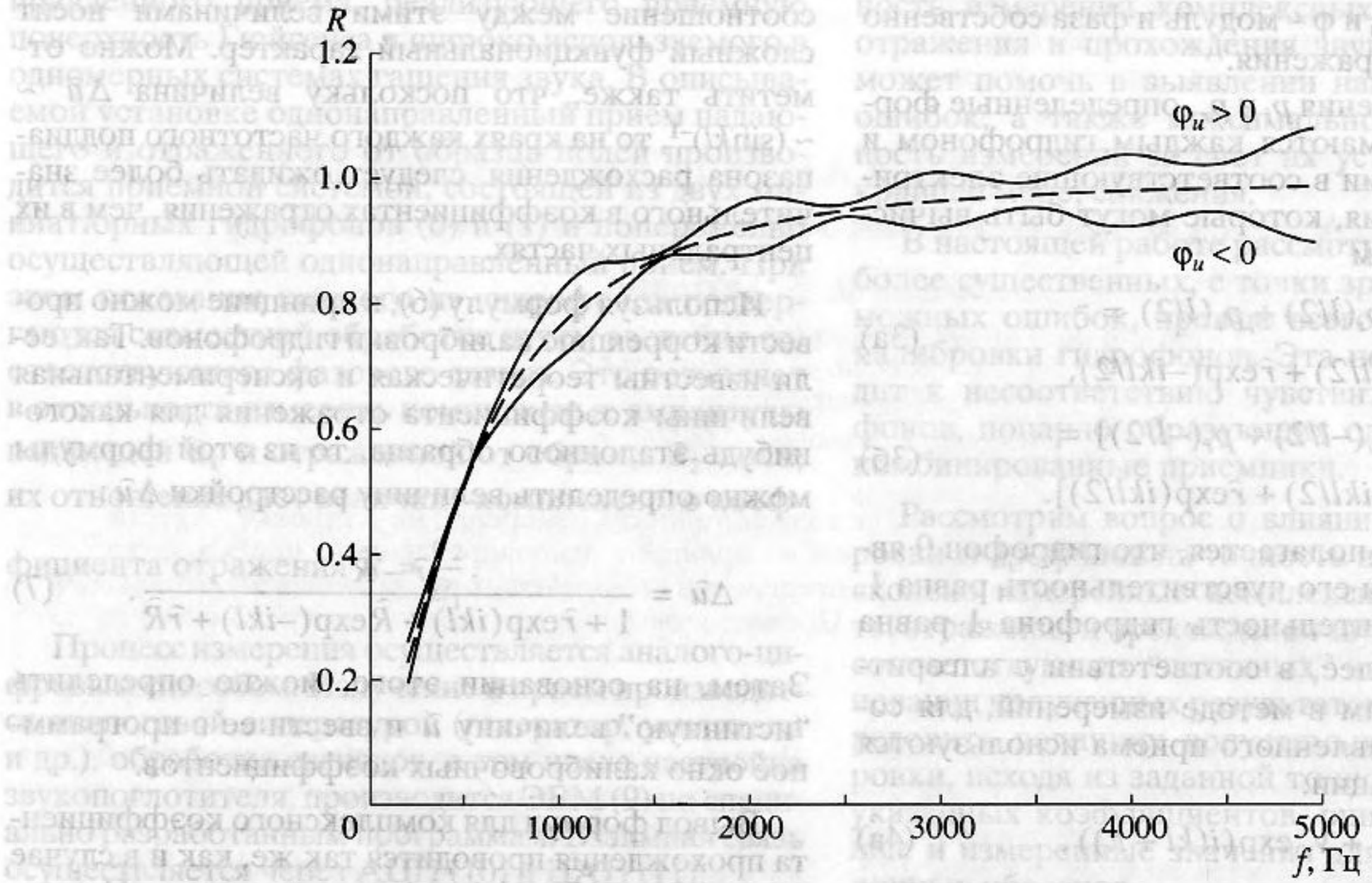

Рис. 2. Влияние фазовой расстройки $\varphi_u = \pm 0.015$ на модуль коэффициента отражения для эталонного образца.

где $\hat{u}_d = \dfrac{\hat{u}_2}{\hat{u}_3}$. В формуле (11) множитель $\exp(ikL_1)$ отсутствует, поскольку он входит в обе части формулы. Из формул (5а) и (11) получим измеренную величину комплексного коэффициента прохождения

$$\hat{D} = \frac{U_3}{U_1} = \hat{d}\hat{u}_3 \frac{1 - \Delta\hat{u}_d[\exp(-ikl) + \hat{\beta}]}{1 - \Delta\hat{u}[\exp(-ikl) + \hat{r}]}. \qquad (12)$$

Здесь $\Delta\hat{u}_d = \dfrac{\hat{u}_d - 1}{i2\sin kl}$ – относительная расстройка верхнего комбинированного приемника. Из формулы (12) видно, что условие $\hat{D} = \hat{d}$ выполняется при $\Delta\hat{u}_d = \Delta\hat{u} = 0$ и $\hat{u}_3 = 1$.

Поскольку формула (6) справедлива также и для верхней приемной системы (с заменой величины $\hat{u}$ на $\hat{u}_d$), то можно получить "истинный" коэффициент отражения от электроакустического поглотителя $\hat{\beta}$. Поскольку последний настраивается по заданной величине модуля β_0, измеряемой в процессе настройки, то интересующая нас величина $\hat{\beta}$ определяется формулой

$$\hat{\beta} = \frac{\beta_0 - \Delta\hat{u}_d[1 + \beta_0\exp(-ikl)]}{1 + \Delta\hat{u}_d[\beta_0 + \exp(ikl)]}. \qquad (13)$$

Рассчитать ошибку измерения в любом случае можно только на примере конкретных измеряемых образцов, акустические характеристики которых можно определить теоретическим путем. В качестве таких эталонных образцов обычно используются металлические (чаще стальные) диски различной толщины, малой по сравнению с длиной волны, так что их импеданс можно считать чисто инерционным. Ниже приведен расчет комплексных коэффициентов отражения и прохождения для таких образцов, нагруженных на столб воды (имитирующий верхнюю половину трубы), на конце которого размещен идеальный поглотитель звука (формулы (18)). Для расчета выбран эталонный стальный образец толщиной 7 см.

Результаты расчета по формулам (6) и (18б), носящего иллюстративный характер, представлены на рис. 2 и 3 для модуля и фазы коэффициентов отражения, соответственно. Расстройка однонаправленности задается величинами $u = 1 \pm 0.05$ и $\varphi_u = \pm 0.015$ ($\approx \pm 1°$). Пунктирные линии отображают случай $u = 0$ и $\varphi_u = 0$. При этом значения R в первом случае и φ_R – во втором здесь не приводятся, поскольку влияние соответствующих расстроек на эти величины весьма мало. Из рисунков видно, что расстройки превращают гладкие (теоретические) кривые в осциллирующие. Существенно отметить, что все наблюдаемые частотные осцилляции являются почти периодическими с периодом $\Delta f \approx 1000$ Гц, соответствующим соотношению $\Delta(kL) = \pi$, где L – расстояние от середины нижней приемной системы до нижней поверхности образца. Кроме того, можно отметить, что

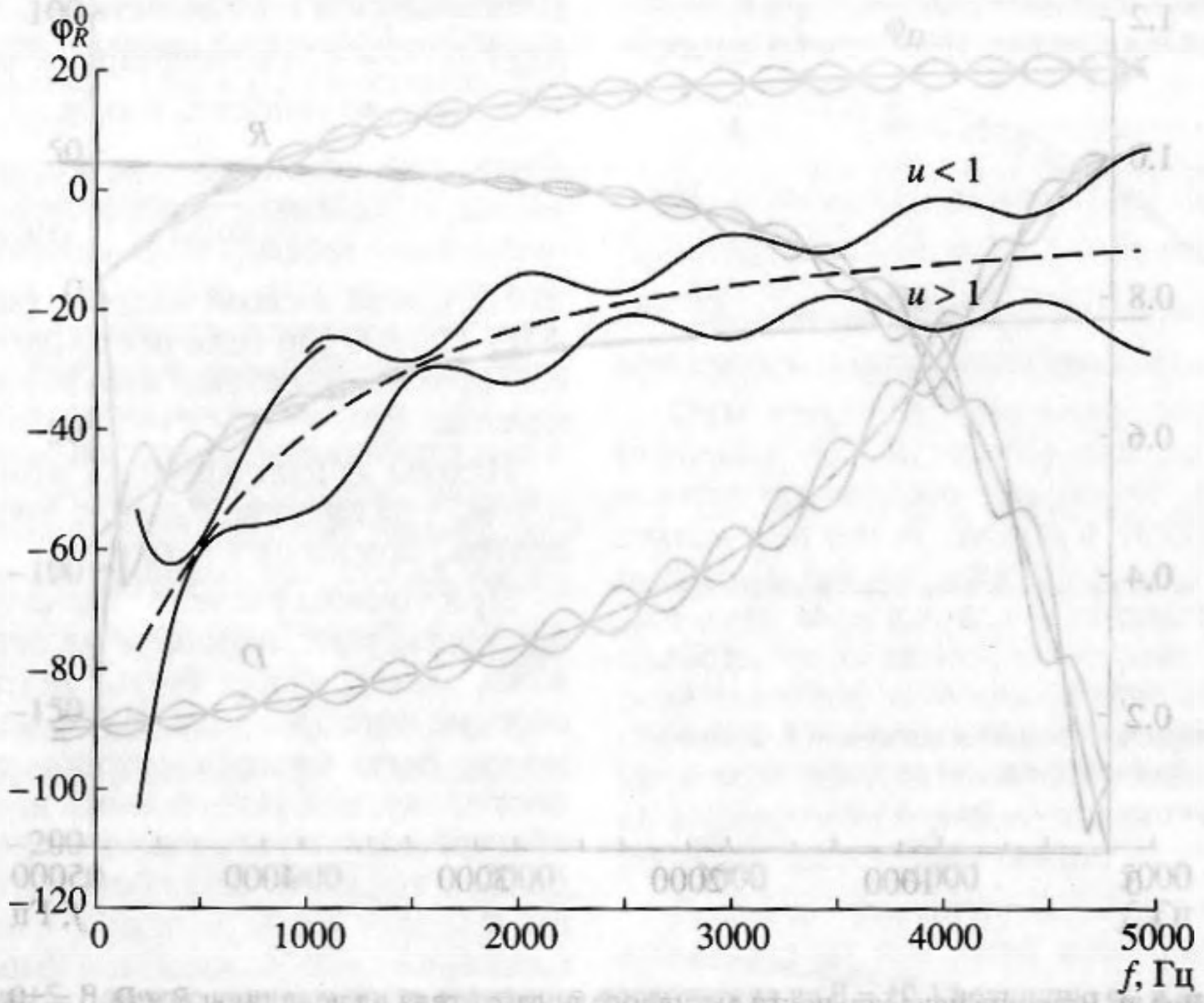

Рис. 3. Влияние амплитудной расстройки $u = 1 \pm 0.05$ на фазу коэффициента отражения.

расстройка u существенно сказывается на величине фазы, а расстройка φ_u – на величине модуля.

Аналогичные результаты имеют место для коэффициента прохождения.

Рассмотрим теперь влияние эффективности активного звукопоглотителя. Другой причиной возможных ошибок измерения комплексных величин коэффициентов отражения и прохождения может являться недостаточная эффективность активного звукопоглотителя, обеспечивающего в АНТ режим "бегущей волны". Так, при обычно задаваемом пороговом значении коэффициента отражения $\beta_0 = 0.05$ реальная эффективность поглотителя может быть ниже из-за недостаточной однонаправленности верхней приемной системы Реальный коэффициент отражения от поглотителя $\hat{\beta}$ дается формулой (13).

Так же, как и выше, для оценки влияния этого фактора используем описанные эталонные образцы, и проведем расчет комплексных коэффициентов отражения и прохождения таких образцов, нагруженных на столб воды, на конце которых размещен поглотитель звука с коэффициентом отражения $\hat{\beta}$. (При $\beta = 0$ осуществляется режим "бегущей волны").

Параметрами эталонного образца являются плотность ρ и толщина l. Предполагается, что на его цилиндрической боковой поверхности выполняются условия идеальной "смазки" (см. ниже).

Звуковое поле в области перед образцом можно представить в виде:

звуковое давление –

$$P_1 = \exp(ikx) + \hat{R}\exp(-ikx), \tag{14а}$$

колебательная скорость –

$$V_1 = \frac{1}{\rho_0 c_0}(\exp(ikx) - \hat{R}\exp(-ikx)), \tag{14б}$$

где $\hat{R}$ – комплексный коэффициент отражения образца.

Для звукового поля в области за образцом имеем, соответственно.

$$P_2 = \hat{D}(\exp(ikx) + \hat{\beta}\exp(-ikx)), \tag{15а}$$

$$V_2 = \frac{\hat{D}}{\rho_0 c_0}(\exp(ikx) - \hat{\beta}\exp(-ikx)), \tag{15б}$$

где $\hat{D}$ – комплексный коэффициент прохождения образца, $\hat{\beta} = \beta_0\exp(i2kL)$ – коэффициент отражения поглотителя, приведенный к сечению $x = 0$.

Для определения неизвестных величин $\hat{R}$ и $\hat{D}$ запишем совместно граничные условия на границах $x = 0$ и $x = l$.

$P_2(l) - P_1(0) = -i\omega\rho l V_1(0)$ – условие на границах массовой нагрузки; $V_1(0) = V_2(l)$ – условие равенства колебательных скоростей.

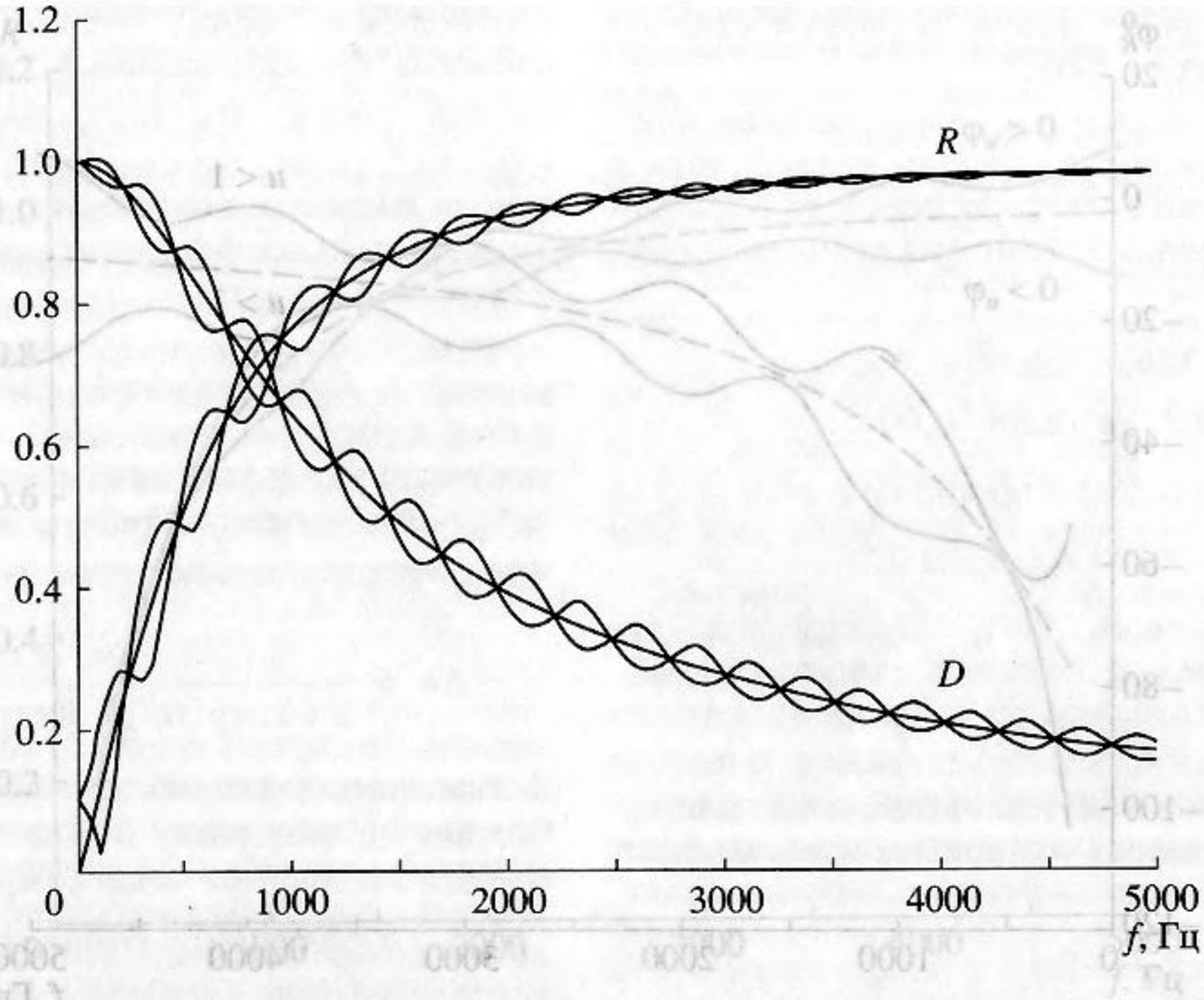

Рис. 4. Влияние неидеальности активного поглотителя на величины R и D, $\beta = \pm 0.1$.

Подставляя формулы (14) и (15) в эти равенства, получим следующую систему уравнений:

$$\alpha^+ \hat{D}_1 - \hat{R}(1 + iX) = 1 - iX, \qquad (16а)$$

$$\alpha^- \hat{D}_1 + \hat{R} = 1, \qquad (16б)$$

где $\hat{D}_1 = \hat{D}\exp(ikl)$, $\alpha^{\pm} = 1 \pm \beta_0 \exp(i2k(L - l))$, $X = \dfrac{\omega\rho l}{\rho_0 c_0}$ – безразмерный инерционный импеданс образца.

Из системы (16) получим:

$$\hat{D}_1 = \frac{2}{\alpha^+ + \alpha^-(1 + iX)} = \frac{2}{2 + i\alpha^- X}; \qquad (17а)$$

$$\hat{R} = 1 - \alpha^- \hat{D}_1. \qquad (17б)$$

Для идеального поглотителя $\beta_0 = 0$ величина $\alpha^- = 1$ и, следовательно,

$$\hat{D}_1 = \frac{2}{2 + iX}, \qquad (18а)$$

$$\hat{R} = \frac{iX}{2 + iX}. \qquad (18б)$$

Влияние величины β_0 на измеряемые характеристики эталонных образцов иллюстрируют рисунки. На рис. 4 и 5 приведены графики частотных зависимостей R и D_1 и соответствующих фаз φ_R и φ_D для эталонного стального образца толщиной $l = 7$ см при значениях $\beta = 0$ и ± 0.1.

На основе анализа этих рисунков можно сделать следующие выводы:

– для величины $\beta \neq 0$ все кривые имеют осциллирующий характер; при этом период осцилляций составляет $\Delta f \cong 500$ Гц, что соответствует соотношению $\Delta(kL_1) = \pi$, где L_1 – расстояние от образца до поверхности поглотителя;

– перемена знака β приводит к "перебросу" фазы осцилляции;

– при возрастании $|\beta|$ амплитуда осцилляции возрастает;

– наибольшее отклонение наблюдается как по модулю, так и по фазе для малых величин R (на низких частотах).

Отметим, что применение активного поглотителя звука позволяет проводить измерения не только в режиме "бегущей волны", но и создавать практически любую комплексную нагрузку на образец для измерения комплексного коэффициента отражения. Поскольку $\hat{\beta} = \hat{\beta}_0 \exp(i2kL_1)$ – коэффициент отражения поглотителя, приведенный к сечению $x = L_0$ (верхняя поверхность образца), то по заданному импедансу нагрузки Z_0 можно определить комплексный коэффициент отражения поглотителя $\hat{\beta}_0$:

$$\hat{\beta}_0 = \frac{Z_0 - 1}{Z_0 + 1}\exp(-i2kL_1),$$

обеспечивающий заданную величину Z_0.

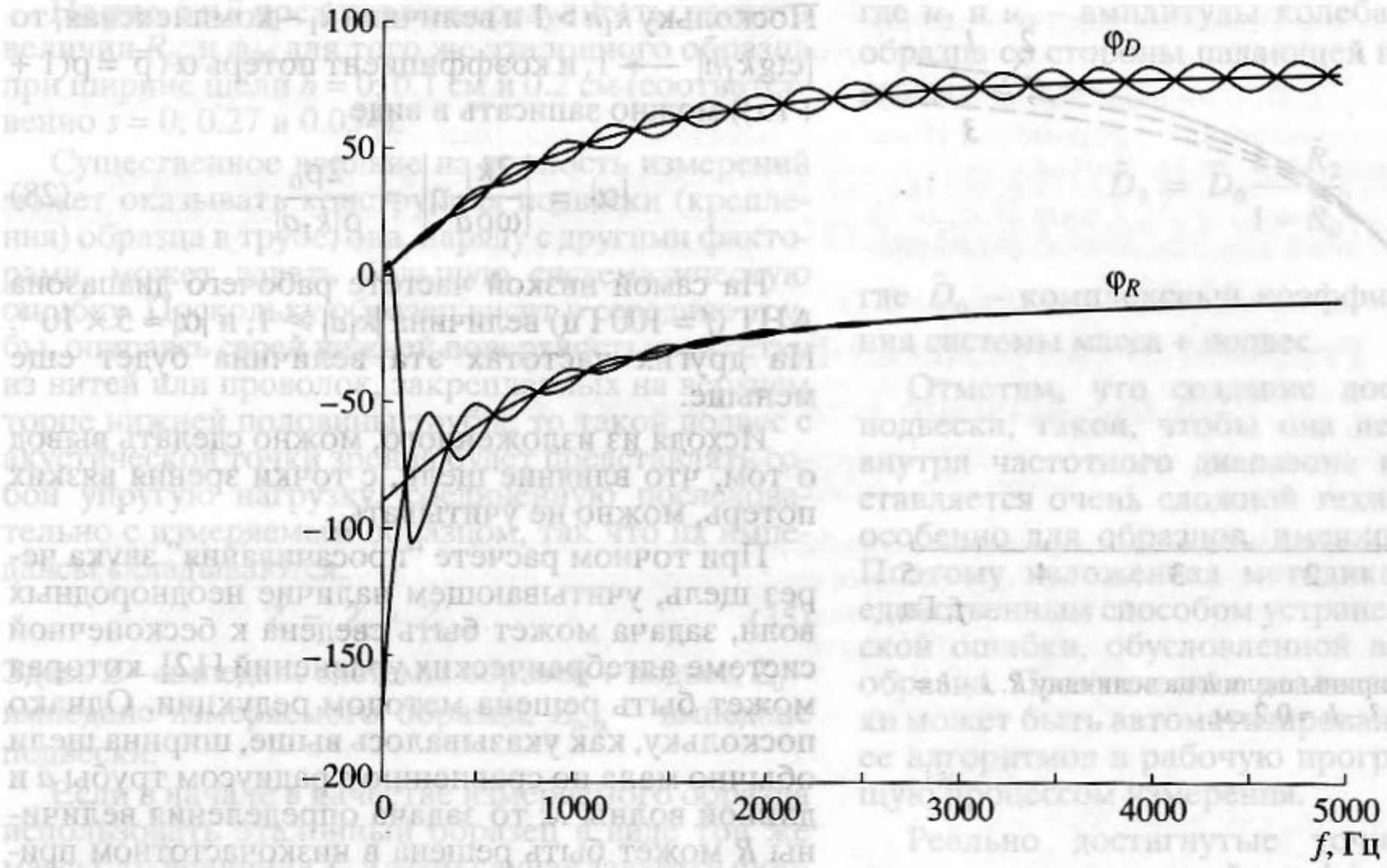

Рис. 5. Влияние неидеальности активного поглотителя на $\beta = \pm 0.1$ величины φ_R и φ_D.

Еще одним из источников ошибок измерений может служить цилиндрическая щель между боковой поверхностью образца и стенкой трубы. Из очевидных физических факторов можно выделить следующие:

– возможные вязкие потери;

– "просачивание" звука через щель.

Первый механизм будет рассмотрен ниже, применительно к упомянутым выше эталонным образцам в виде металлических дисков. Обычно величина щели h мала по сравнению с радиусом трубы a и длиной волны λ ($h/a \equiv 0.01$–0.02, $h/\lambda \le 0.003$).

Для эталонного образца уравнения движения можно записать в виде

$$-i\omega m V_0 = F_2 - F_1 + \sigma, \qquad (19)$$

где V_0 – колебательная скорость, $m = \rho l S$ – масса образца; $F_1 = p_1 S$, $F_2 = p_2 S$ – суммарные силы, обусловленные звуковым давлением и действующие на лицевую и тыльную поверхности образца $S = \pi a^2$; $\sigma = \sigma_0 S_1$ – суммарная сила вязкости, действующая на боковую поверхность образца $S_1 = 2\pi a l$; σ_0 – вязкое напряжение. С учетом этих обозначений, уравнение (19) можно переписать в виде

$$-i\omega\rho l V_0 = p_2 - p_1 + \frac{2l}{a}\sigma_0. \qquad (20)$$

Для расчета величины вязкого напряжения σ_0 используем уравнение Навье–Стокса для несжимаемой жидкости [11]

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}, \qquad (21)$$

где V – колебательная скорость в вязкой волне, ν – коэффициент вязкости воды, y – радиальная координата (т.к. $h/a \ll 1$, задачу можно решать в декартовой системе координат). Поскольку $V = V(y)\exp(-i\omega t)$, то уравнение (21) переходит в уравнение Гельмгольца для вязких волн.

$$\frac{d^2 V(y)}{dy^2} + k_1^2 V(y) = 0, \qquad (22)$$

где $k_1^2 = \dfrac{i\omega}{\nu}$ – квадрат волнового числа.

Решение уравнения (22) и граничные условия можно записать в виде

$$V(y) = A\cos k_1 y + B\sin k_1 y, \qquad (23)$$

$$V(0) = V_0; \quad V(h) = 0. \qquad (24)$$

Подставляя (23) в (24), получим решение

$$V(y) = V_0 \frac{\sin k_1 (h - y)}{\sin k_1 h}.$$

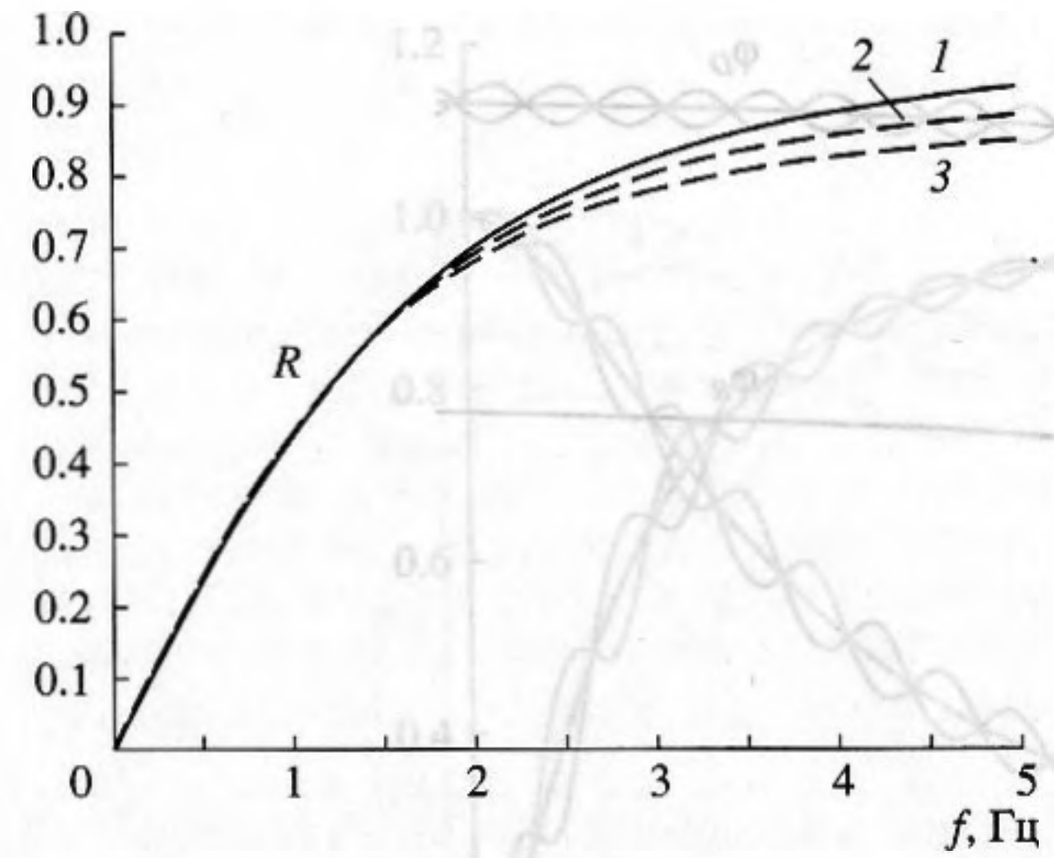

Рис. 6. Влияние ширины щели h на величину R. *1* – h = = 0; *2* – h = 0.1 см; *3* – h = 0.2 см.

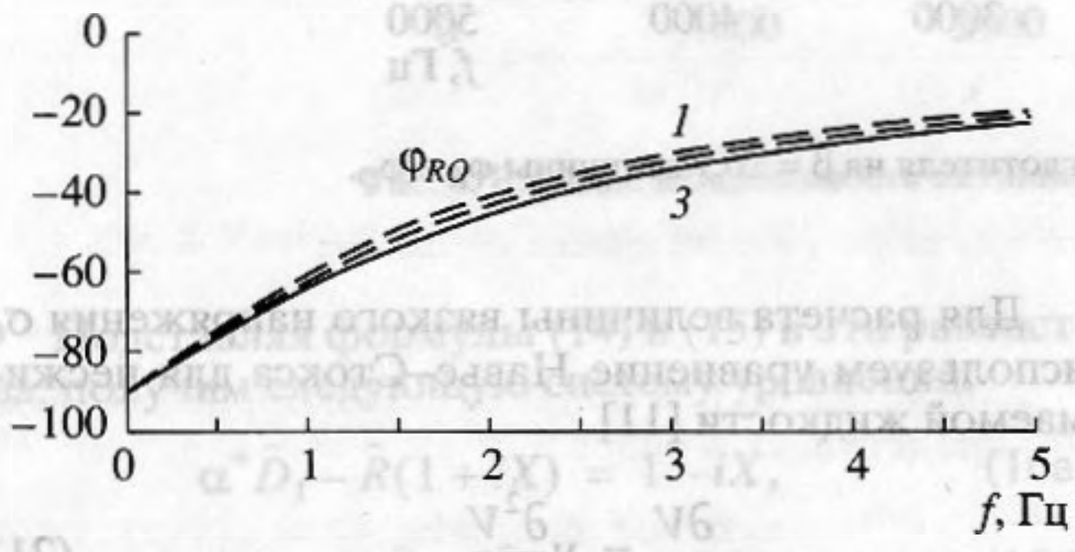

Рис. 7. Влияние ширины щели h на *1* – h = 0; *2* – h = = 0.1 см; *3* – h = 0.2 см.

Вязкое напряжение $\sigma = \eta \dfrac{dV}{dy}$, где $\eta = \nu\rho_0$ – кинетическая вязкость, ρ_0 – плотность воды. Отсюда искомая величина

$$\sigma_0 = \sigma(0) = -k_1 \eta V_0 \operatorname{ctg} k_1 h. \qquad (25)$$

Подставляя (25) в (20), получим

$$-i\omega\rho l V_0 = p_2 - p_1 - \frac{2k_1 l}{a}\eta V_0 \operatorname{ctg} k_1 h$$

или

$$-i\omega l\left(\rho + i\frac{2k_1}{\omega a}\eta \operatorname{ctg} k_1 h\right) = p_2 - p_1. \qquad (26)$$

Отсюда следует, что эталонный образец можно описать комплексной плотностью

$$\bar{\rho} = \rho + i\frac{2k_1}{\omega a}\eta \operatorname{ctg} k_1 h. \qquad (27)$$

Поскольку $k_1 h > 1$ и величина k_1 – комплексная, то $|\operatorname{ctg} k_1 h| \longrightarrow 1$, и коэффициент потерь α ($\bar{\rho} = \rho(1 + i\alpha)$) можно записать в виде

$$|\alpha| = \left|\frac{2k_1}{\omega\rho a}\eta\right| = \frac{2\rho_0}{\rho|k_1 a|}. \qquad (28)$$

На самой низкой частоте рабочего диапазона АНТ (f = 100 Гц) величина $|k_1 a| \gg 1$, и $|\alpha| \approx 5 \times 10^{-5}$. На других частотах эта величина будет еще меньше.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод о том, что влияние щели, с точки зрения вязких потерь, можно не учитывать.

При точном расчете "просачивания" звука через щель, учитывающем наличие неоднородных волн, задача может быть сведена к бесконечной системе алгебраических уравнений [12], которая может быть решена методом редукции. Однако поскольку, как указывалось выше, ширина щели обычно мала по сравнению с радиусом трубы a и длиной волны λ, то задача определения величины R может быть решена в низкочастотном приближении с использованием импедансного метода.

Пренебрегая вязкостью, удельную безразмерную (в единицах волновой проводимости воды) проводимость щели можно записать в виде

$$g_0 = s, \qquad (29)$$

где $s = 2h/a$ – относительная площадь, занимаемая щелью. Удельная проводимость измеряемого образца в этом случае будет выражаться формулой

$$g = (1 - s)g_{об}, \qquad (30)$$

где $g_{об}$ – импеданс измеряемого образца.

Суммарная безразмерная проводимость

$$G = s + (1 - s)g_{об} \qquad (31)$$

связана с измеренным коэффициентом отражения известным соотношением

$$\hat{R} = \frac{1 - G}{1 + G}, \qquad (32)$$

которое, с учетом (31), приводит к формуле

$$\hat{R} = \frac{1 - g_{об}}{a + g_{об}}, \qquad (33)$$

где параметр $a = \dfrac{1 + s}{1 - s}$.

Из формулы (33) можно определить величину $g_{об}$ и "истинный" коэффициент отражения $\hat{R}_0$, выраженный через $\hat{R}$:

$$\hat{R}_0 = \frac{(1 + a)\hat{R}}{2 + (1 - a)\hat{R}}. \qquad (34)$$

На рис. 6 и 7 представлены результаты расчета величин R_0: и φ_{R0} для того же эталонного образца при ширине щели $h = 0$; 0.1 см и 0.2 см (соответственно $s = 0$; 0.27 и 0.054).

Существенное влияние на точность измерений может оказывать конструкция подвески (крепления) образца в трубе; она, наряду с другими факторами, может давать большую систематическую ошибку. Поскольку образец висит в середине трубы, опираясь своей нижней поверхностью на сетку из нитей или проволок, закрепленных на верхнем торце нижней половины трубы, то такой подвес с акустической точки зрения будет представлять собой упругую нагрузку, соединенную последовательно с измеряемым образцом, так что их импедансы складываются:

$$Z = Z_0 + Z_{\text{под}}. \qquad (35)$$

Здесь Z – импеданс системы образец + подвес, Z_0 – импеданс измеряемого образца, $Z_{\text{под}}$ – импеданс подвески.

Если в начале в качестве измеряемого образца использовать эталонный образец в виде той же массы, то величина Z_0 в этом случае задается формулой

$$Z_0 = iX + 1. \qquad (36)$$

Здесь X – безразмерный импеданс эталонного образца, единица (1) соответствует волновому сопротивлению воды за образцом (для "идеального" поглотителя). Измерив комплексный коэффициент отражения $\hat{R}_0$ системы масса + подвес, с учетом формул (35)–(36) можно найти искомую величину $Z_{\text{под}}$:

$$Z_{\text{под}} = \frac{1+\hat{R}_0}{1+\hat{R}_0} - (1+iX). \qquad (37)$$

С другой стороны, обозначив через $\hat{R}_2$ коэффициент отражения от интересующего нас образца (с той же подвеской), на основании (35) и (37), получим:

$$Z_0 = \frac{1+\bar{R}_2}{1-\bar{R}_2} - Z_{\text{под}}. \qquad (38)$$

Здесь Z_0 – "истинный" импеданс измеряемого образца, на основании которого может быть определен "истинный" комплексный коэффициент отражения

$$\hat{R}_2 = \frac{Z_0 - 1}{Z_0 + 1}. \qquad (39)$$

Расчет "истинного" комплексного коэффициента прохождения $\hat{D}_2$ основывается на условии пропорциональности

$$\frac{\hat{D}_2}{\hat{D}_0} = \frac{u_2}{u_0} = \frac{1-\hat{R}_2}{1-\hat{R}_0}, \qquad (40)$$

где u_2 и u_0 – амплитуды колебаний поверхности образца со стороны падающей волны. Таким образом,

$$\hat{D}_2 = \hat{D}_0 \frac{1-\hat{R}_2}{1-\hat{R}_0}, \qquad (41)$$

где $\hat{D}_0$ – комплексный коэффициент прохождения системы масса + подвес.

Отметим, что создание достаточно мягкой подвески, такой, чтобы она не проявляла себя внутри частотного диапазона измерений, представляется очень сложной технической задачей, особенно для образцов, имеющих большой вес. Поэтому изложенная методика представляется единственным способом устранения систематической ошибки, обусловленной влиянием подвеса образца. Практическая реализация этой методики может быть автоматизирована путем введения ее алгоритмов в рабочую программу, управляющую процессом измерения.

Реально достигнутые точности измерений комплексных значений коэффициентов отражения и прохождения составляют:

– по модулю в области низких частот – ≈±2 дБ,
в области высоких частот – ≈±1 дБ;
– по фазе в области низких частот – ≈±2°–3°,
в области высоких частот – ≈±1.5°–2°.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forum Acusticum 1999, TU Berlin, March 14–19, 1999, Program. Acustica – acta acustica, V. 85 (1999). Suppl. 1.
2. EC Proceedings of the fifth European Conference on Underwater Acoustics ECUA 2000, 10–13 July 2000. V. 1.
3. *Агеева Н.С.* Измерение акустических параметров материалов на ультразвуковых частотах при помощи импульсной трубы // Акуст. журн. 1955. Т. 1. № 2. С. 110–120.
4. *Боббер Р.* Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974. 362 с.
5. *Тютекин В.В., Вовк А.Е., Степанов Д.В., Климов С.П.* Авторское свидетельство на изобретение № 480973 с приоритетом от 10 мая 1971 г. "Способ измерения коэффициентов отражения звука от акустических материалов".
6. *Тютекин В.В., Вовк А.Е., Климов С.П.* Авторское свидетельство на изобретение № 602988 с приоритетом от 18 февраля 1974 г. "Устройство для измерения звукоизоляции образцов материалов".
7. *Вовк А.Е., 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.
8. *Вовк А.Е., Климов С.П., Тютекин В.В.* Применение однонаправленного приема в акустических из-

мерительных трубах. IX Всесоюзная Акуст. конф. 0IVB-5, М., 1977. С. 53–56.

9. *Вовк А.Е., Климов С.П., Тютекин В.В.* Автоматизированный акустический интерферометр // Измерительная техника. 1989. № 12. С. 41–43.

10. *Горенберг А.Я., Коменец Ф.Ф., Сизов И.И. и др.* Автоматизированный аэроакустический интерферометр. Сборник трудов X сессии Российского Акустического Общества. Т. 2. М., 2000.

11. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. М.: Наука, 1965. 796 с.

12. *Гринченко В.Т., Вовк И.В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. Киев: Наукова думка, 1986. 796 с.

Precision of the Material Parameter Measurements in the Acoustic Low-Frequency Pipe

V. V. Tyutekin

The effect of errors in the technique implementation on the precision of measurements using the "Acoustic low-frequency pipe" system that is based on the principle of unidirectional sound reception is considered. Errors in determination of the complex reflection and transmission coefficients of sound for samples under test are calculated theoretically. A numerical analysis of these errors is performed using standard samples as examples.