

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ,
ОСНОВАННЫЙ НА ИЗМЕРЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗНОСТИ
ЗВУКОВЫХ ДАВЛЕНИЙ**

В. Н. Федорович

Описывается метод измерения акустических сопротивлений, основанный на измерении разности звуковых давлений на выходах двух акустических четырехполюсников, нагруженных на измеряемое и бесконечно большое акустические сопротивления при одинаковом звуковом давлении на входах четырехполюсников. Приводится пример измерения при помощи описываемого устройства акустического сопротивления естественного и искусственного уха.

Измерение акустических сопротивлений должно играть в практике акустического эксперимента такую же значительную роль, какую играет измерение электрических сопротивлений при исследовании электрических колебательных систем. Однако, в силу громоздкости и сложности существующих методов измерения акустических сопротивлений, эти методы не получили широкого применения. Поэтому всякая попытка разработки нового метода измерения акустического сопротивления, обладающего новыми возможностями, представляет определенный интерес для акустической метрологии.

Настоящая статья посвящена рассмотрению нового метода измерения акустического сопротивления, который во многих случаях может оказаться удобнее предложенных ранее.

Общая теория метода

Рассматриваемый ниже метод измерения акустических сопротивлений относится по терминологии Беранека к группе «измерений у поверхности объекта» (под термином «объект» понимается акустический материал или элемент колебательной системы, сопротивление которого требуется измерить) и состоит в раздельном измерении давления и скорости. При этом определение скорости производится путем измерения геометрической разности давлений, действующих на выходе двух одинаковых акустических четырехполюсников (см. ниже фиг. 1), из которых один (1) имеет нагрузку в виде акустического сопротивления z_x измеряемого объекта, а другой (2) в виде достаточно жесткой стенки ($z = \infty$) при одинаковом по модулю и фазе звуковом давлении на входах обоих четырехполюсников.

Обозначив через A, B параметры акустических четырехполюсников, z_x — измеряемое акустическое сопротивление, p_1 — давление на входе обоих четырехполюсников, p_2 — давление на выходе четырехполюсника 2 (у поверхности измеряемого объекта), p'_2 — давление на выходе четырехполюсника 1 (у поверхности бесконечно жесткой стенки), v_2 — скорость на выходе четырехполюсника 1 (скорость измеряемого объекта), можно написать следующие соотношения:

$$p_1 = Ap_2 + Bv_2, \quad p_1 = Ap'_2 \quad (1)$$

На основании этих соотношений имеем

$$Ap'_2 = Ap_2 + Bv_2 \text{ и } v_2 = \frac{A}{B} (p'_2 - p_2). \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что, измерив геометрическую разность между давлениями p'_2 и p_2 и помножив ее на известное отношение параметров четырехполюсников A/B , можно определить скорость на выходе четырехполюсника I , представляющую собой одновременно искомую входную скорость измеряемого объекта.

Располагая возможностью измерения скорости, можно создать способ измерения акустического сопротивления. Для этого помимо скорости нужно измерить давление у поверхности объекта и разность фаз между давлением и скоростью. Тогда активная и реактивная составляющие измеряемого акустического сопротивления (z_x) определяются из равенства

$$z_x = \frac{p_2}{v_2} = \frac{B}{A} \times \frac{p_2}{p'_2 - p_2}. \quad (3)$$

Отношение B/A , входящее в это равенство, является постоянной измерительной установки и может быть, как показано ниже, предварительно определено теоретически или экспериментально. Во всех этих рассуждениях предполагается, что устройства для измерения звукового давления обладают бесконечно большим входным акустическим сопротивлением и не нарушают конфигурации поля. Кроме того, предполагается, что оба акустических четырехполюсника тождественны, и что звуковая волна у поверхности объекта является плоской.

Исходя из первой предпосылки, следует отдать предпочтение, для измерения давлений, акустическому зонду, так как измерительные микрофоны имеют относительно большие размеры и потому существенно искажают конфигурацию поля. Однако акустический зонд обладает конечным входным сопротивлением, поэтому необходимо дополнить приведенные выше соотношения поправкой на шунтирующее влияние входного сопротивления зонда.

В этом случае соотношение (1) принимает следующий вид:

$$p_1 = Ap_2 + Bv_2, \quad p_1 = Ap'_2 + Bv'_2, \quad (4)$$

где v'_2 — скорость на выходе четырехполюсника I . Обозначив через z_3 входные сопротивления зондов, измеряющих давления p_2 и p'_2 , можно написать

$$p_1 = Ap_2 + Bv_2 = p_2 \left(A + B \frac{z_x + z_3}{z_3 \cdot z_x} \right) \text{ и } p_1 = Ap'_2 + Bv'_2 = p'_2 \left(A + \frac{B}{z_3} \right), \quad (5)$$

откуда

$$Ap_2 + \frac{B}{z_3} p_2 + \frac{B}{z_x} p_2 = Ap'_2 + \frac{B}{z_3} p'_2$$

или

$$p_2 \left(A + \frac{B}{z_3} \right) + p_2 \frac{B}{z_x} = p'_2 \left(A + \frac{B}{z_3} \right)$$

и

$$z_x = \frac{B}{A + \frac{B}{z_3}} \cdot \frac{p_2}{p'_2 - p_2}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что входное сопротивление зондов при условии их идентичности не вносит каких-либо ошибок в результат измерения.

Необходимо лишь учесть шунтирующее влияние z_3 при определении постоянной прибора, которая будет иметь вид

$$\left(\frac{B}{A + \frac{B}{z_3}} \right).$$

Зонды, измеряющие звуковые давления, являются электроакустическими приборами, содержащими помимо акустической части также и электрическую. Этим обстоятельством можно воспользоваться для устранения необходимости соблюдения практически трудноосуществимых требований относительно тождества акустических четырехполюсников 1 и 2 и равенства входных акустических сопротивлений зондов.

Для доказательства этого положения обратимся к выражениям

$$p_1 = A_1 p_2 + B_1 v_2, \quad p'_1 = A_2 p'_2 + B_2 v'_2, \quad (7)$$

причем допустим, что все коэффициенты различны, а также к дополнительным равенствам

$$e_2 = \frac{1}{A_4} p_2, \quad v_2 = \frac{p_2}{z_{3H}}, \quad e'_2 = \frac{1}{A_3} p'_2 \quad (8)$$

и

$$v'_2 = \frac{p'_2}{z'_3}, \quad (9)$$

где e'_2 и e_2 — напряжения, развиваемые зондами при давлениях p'_2 и p_2 , $1/A_3$ и $1/A_4$ — комплексные чувствительности зондов.

$$z_{3H} = \frac{z_3 \cdot z_x}{z_3 + z_x},$$

где z_2 и z'_3 — входные сопротивления зондов, z_x — измеряемое сопротивление, v'_2 и v_2 — скорости на выходе четырехполюсников 1 и 2.

На основании (7) имеет место следующее соотношение:

$$A_4 \left[A_1 + B_1 \left(\frac{1}{z_3} + \frac{1}{z_x} \right) \right] e_2 = A_3 \left(A_2 + \frac{B_2}{z'_3} \right) e'_2$$

или

$$A_4 \left(A_1 + \frac{B_1}{z_3} \right) e_2 + \frac{A_4 \cdot B_1}{z_x} e_2 = A_3 \left(A_2 + \frac{B_2}{z'_3} \right) e'_2. \quad (10)$$

Путем регулировки комплексных чувствительностей ($1/A_4$ и $1/A_3$) зондов можно добиться соблюдения равенства

$$A_4 \left(A_1 + \frac{B_1}{z_3} \right) = A_3 \left(A_2 + \frac{B_2}{z'_3} \right). \quad (11)$$

В этом случае

$$A_4 \left(A_1 + \frac{B_1}{z_3} \right) \cdot (e'_2 - e_2) = \frac{A_4 \cdot B_1}{z_x} e_2 \quad (12)$$

и

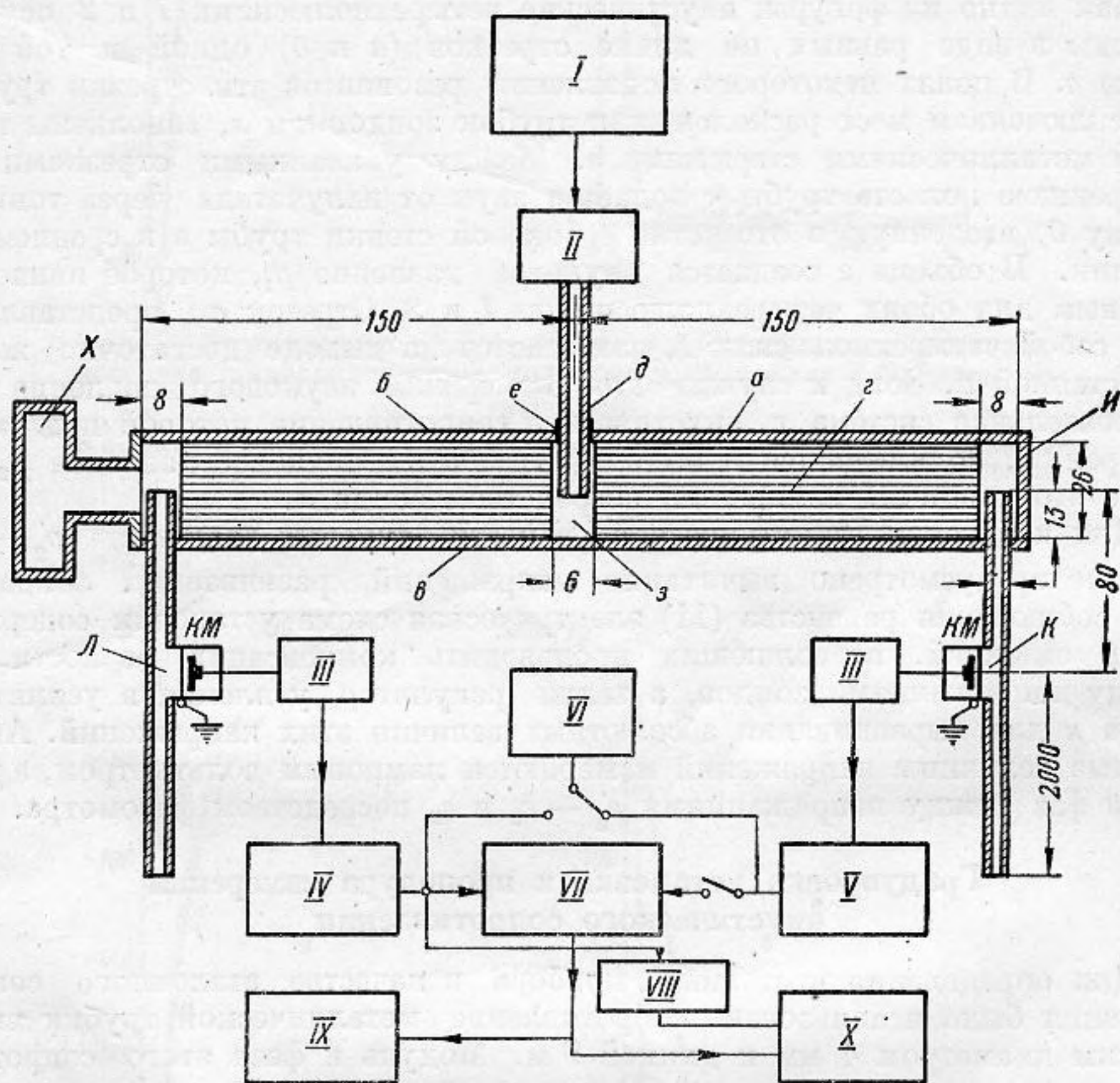
$$z_x = \frac{B_1}{A_1 + \frac{B_1}{z_3}} \cdot \frac{e_2}{e'_2 - e_2}. \quad (13)$$

Из равенства (13) следует, что для определения сопротивления объекта должны быть измерены напряжение e_2 , развиваемое зондом, измеряющим давление p_2 у поверхности объекта, геометрическая разность между на-

пряжениями e_2 и e'_2 , развиваемыми двумя зондами, из которых один измеряет давление p_2 у поверхности объекта, а другой p'_2 у поверхности достаточно жесткой стенки (на выходе четырехполюсника 2), и разность фаз между напряжением e_2 и разностью $(e'_2 - e_2)$. Кроме того, должна быть предварительно определена постоянная прибора, согласно выражению

$$\frac{B_1}{A_1 + B_1/z_3}$$

Как показано в описании экспериментальной части работы, условие (11) сравнительно просто может быть выполнено путем соответствующего



Фиг. 1. Блок-схема установки для измерения акустического сопротивления:

I — звуковой генератор, II — источник звука, III — входной каскад, IV — усилитель с поворотом фазы на 180° , V — усилитель, VI — компенсация фазы, VII — суммирующий каскад с регулировкой усиления, VIII — фазовращатель на 180° , IX — ламповый вольтметр, X — фазометр

подбора электрических параметров в цепях зондов. Критерием соблюдения условия (11) может служить нулевое значение геометрической разности напряжений $(e'_2 - e_2)$ во всем диапазоне измеряемых частот при равных нагрузках на обоих концах четырехполюсников 1 и 2 (например, абсолютно жесткие стенки).

Для определения постоянной прибора можно поступить следующим образом: к выходу четырехполюсника 1 вместо искомого сопротивления подключается заранее известное (эталонное) сопротивление $z_{эт}$, производится измерение величин e_2 и $(e'_2 - e_2)$ и согласно (13) вычисляется по-

стоянная прибора

$$\frac{B_1}{A_1 + B_1/z_3} = z_{\text{эт}} \frac{e'_2 - e_2}{e_2}. \quad (14)$$

В качестве эталона можно воспользоваться регулируемым акустическим сопротивлением, описанным в работе [1]. Характеристики этого сопротивления рассчитываются с достаточной точностью по ее размерам и, если не учитывать температурной зависимости, остаются неизменными с течением времени.

Описание измерительной установки

На фиг. 1 изображена блок-схема измерительной установки, разработанной в соответствии с изложенной выше теорией.

Как видно из фигуры, акустические четырехполюсники 1 и 2 осуществлены в виде равных по длине отрезков (a и b) одной и той же трубы v . В целях некоторого подавления резонансов эти отрезки трубы, за исключением мест расположения трубок зондов k и $л$, заполнены тонкими металлическими стержнями z . Между указанными отрезками во внутреннюю полость трубы v подается звук от излучателя через тонкую трубку d , введенную в отверстие e боковой стенки трубы v в среднем ее сечении. В объеме z создается звуковое давление p_1 , которое является входным для обоих четырехполюсников 1 и 2. Отрезок a , представляющий собой четырехполюсник 1, замыкается на выходе достаточно жесткой стенкой $и$. Зонд k служит для измерения звукового давления p_2 . Колебательная система x , акустическое сопротивление которой подлежит измерению, подключается к выходу отрезка b . Звуковое давление p_2 на входе этой системы измеряется посредством зонда $л$.

Для измерения геометрической разности звуковых давлений ($p'_2 - p_2$) в схеме предусмотрено вычитание напряжений, развиваемых зондами. Для соблюдения равенства (11) электрическая схема установки содержит набор емкостей, позволяющих производить компенсацию разности фаз между напряжениями зондов, а также регулятор усиления в усилителе зонда k для выравнивания абсолютных величин этих напряжений. Абсолютные величины напряжений измеряются ламповым вольтметром, а разности фаз между напряжениями $e'_2 - e_2$ и e_2 посредством фазометра.

Градуировка установки и процедура измерения акустического сопротивления

Для определения постоянной прибора в качестве эталонного сопротивления было использовано сопротивление металлической трубки внутренним диаметром 4 мм и длиной 9 м. Модуль и фаза этого сопротивления определялись расчетным путем по следующим формулам:

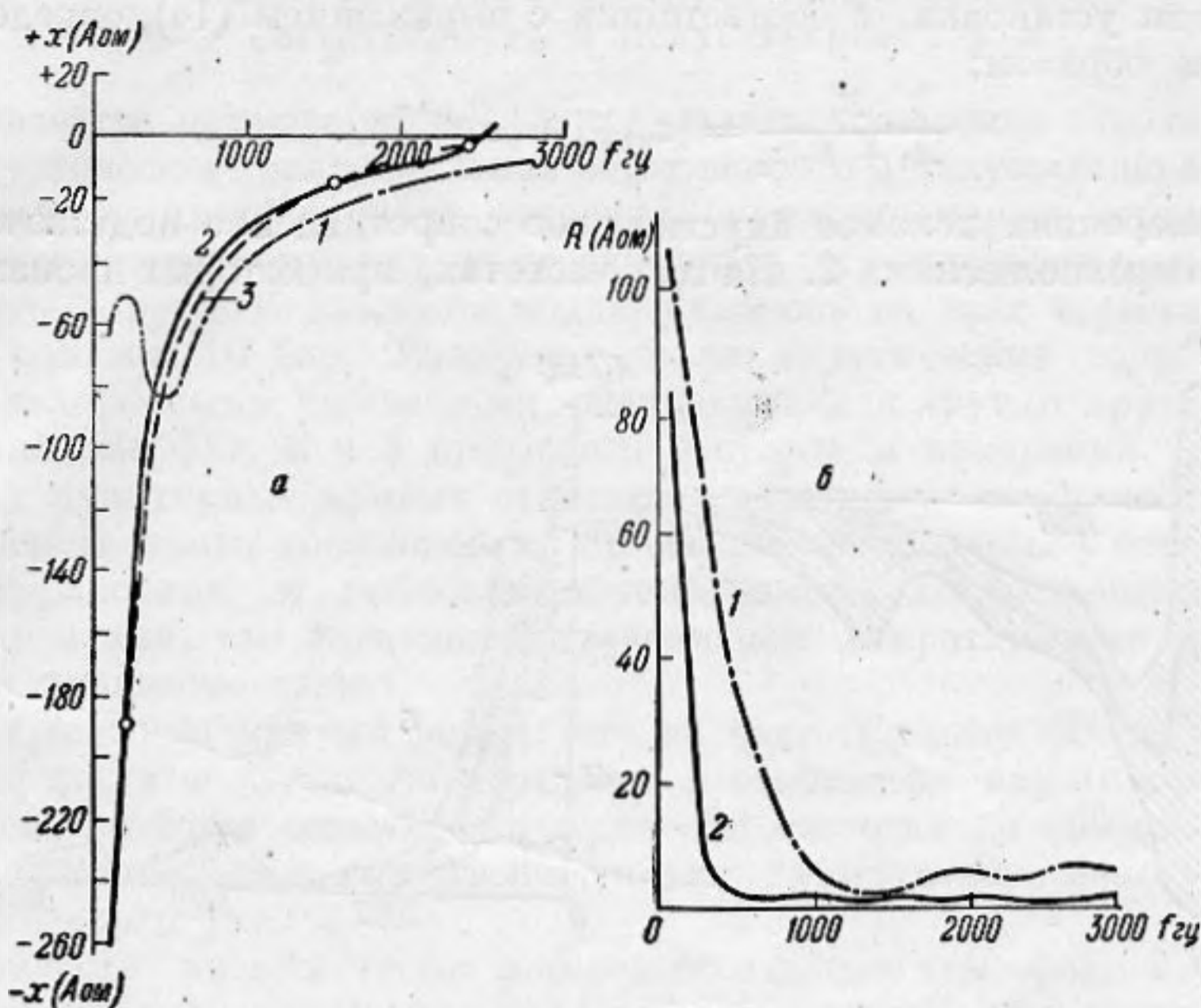
$$|z_{\text{эт}}| = \frac{\rho c}{S} \sqrt{1 + 3 \frac{\alpha}{k} + \frac{\alpha^2}{k^2}}, \quad (15)$$

$$\varphi_{\text{эт}} = \arctg \frac{\frac{\alpha}{k}}{1 + \frac{\alpha}{k}}, \quad (16)$$

где коэффициент затухания $\left(\alpha = \frac{2,8 \cdot 10^{-5} \sqrt{f}}{r}\right)$, $k = \frac{\omega}{c}$, r — радиус трубы.

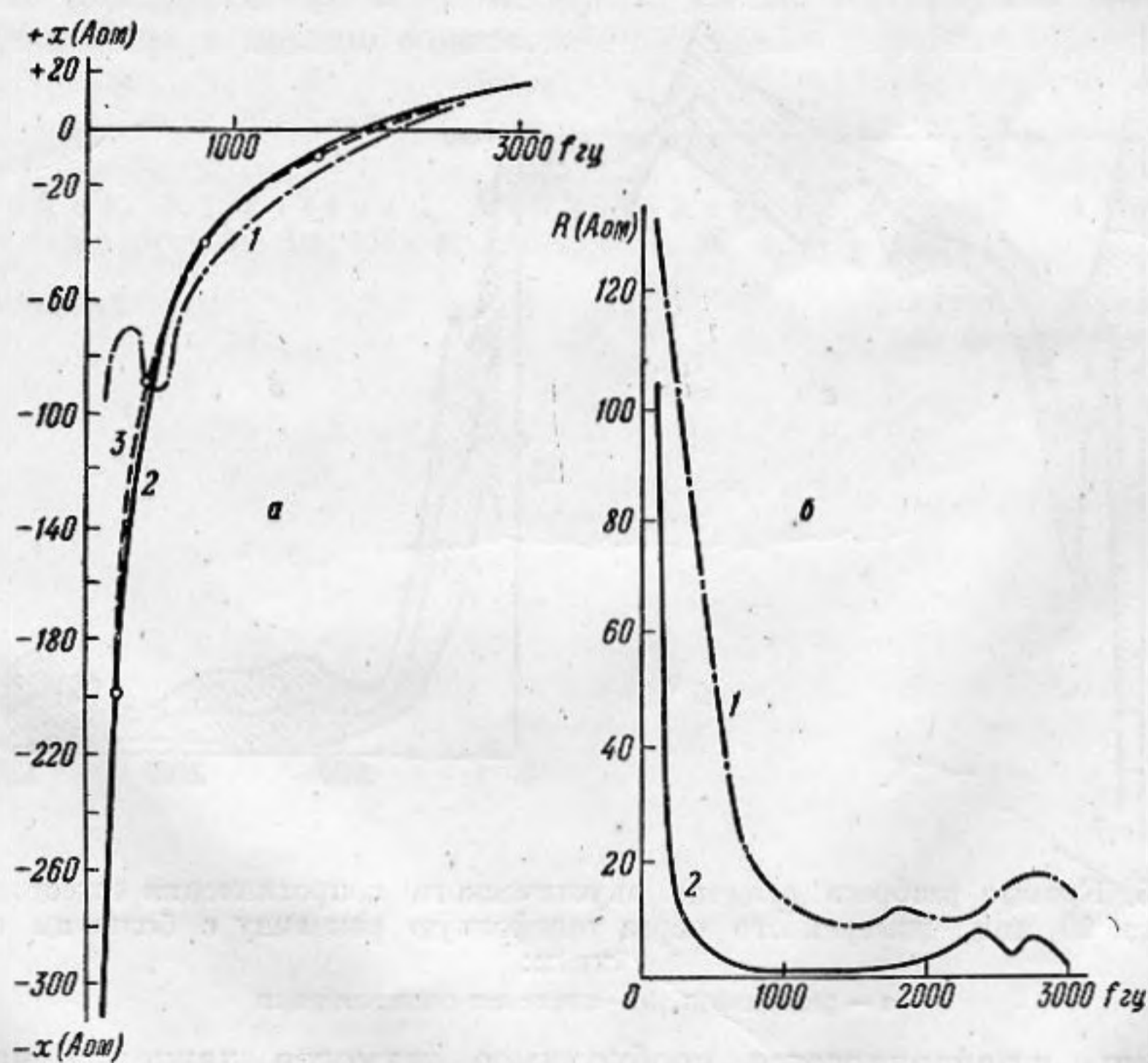
Процедура градуировки заключалась в том, что при подключении к установке эталонного сопротивления измерялись модуль и фаза отношения

$$\left(\frac{e'_2 - e_2}{e_2}\right)_{\text{гр}} = |K| e^{j\psi}$$



Фиг. 2. Акустическое сопротивление искусственного и естественного уха, измеренное через телефонную раковину с большим отверстием:

a — реактивная, b — активная составляющая сопротивления: 1 — естественное ухо (средняя кривая для 10 лиц), 2 — искусственное ухо, 3 — расчетная кривая



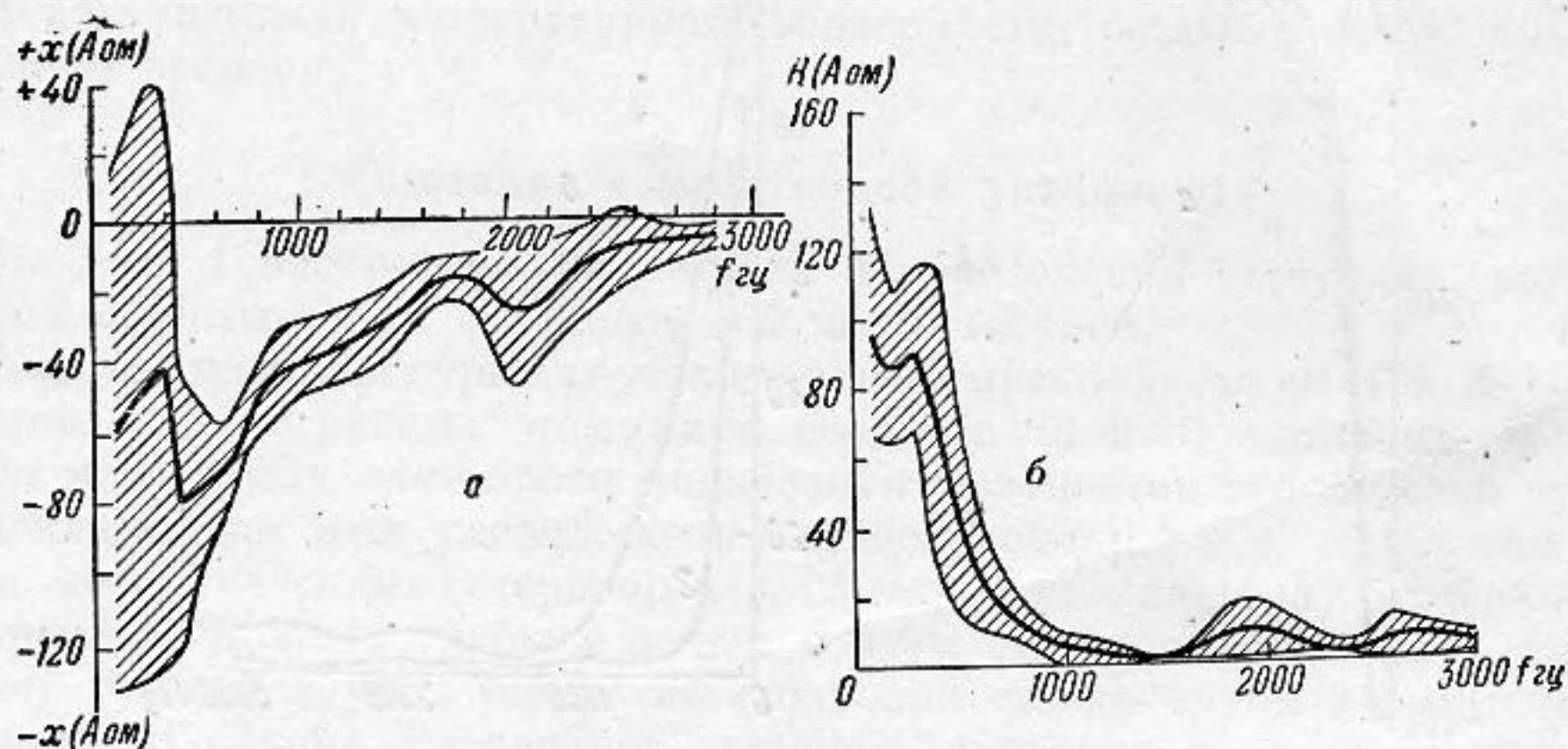
Фиг. 3. Акустическое сопротивление искусственного и естественного уха, измеренное через телефонную раковину с малыми отверстиями:

a — реактивная, b — активная составляющая сопротивления: 1 — естественное ухо (средняя кривая для 10 лиц), 2 — искусственное ухо, 3 — расчетная кривая

и постоянная установки, в соответствии с выражением (14), определялась следующим образом:

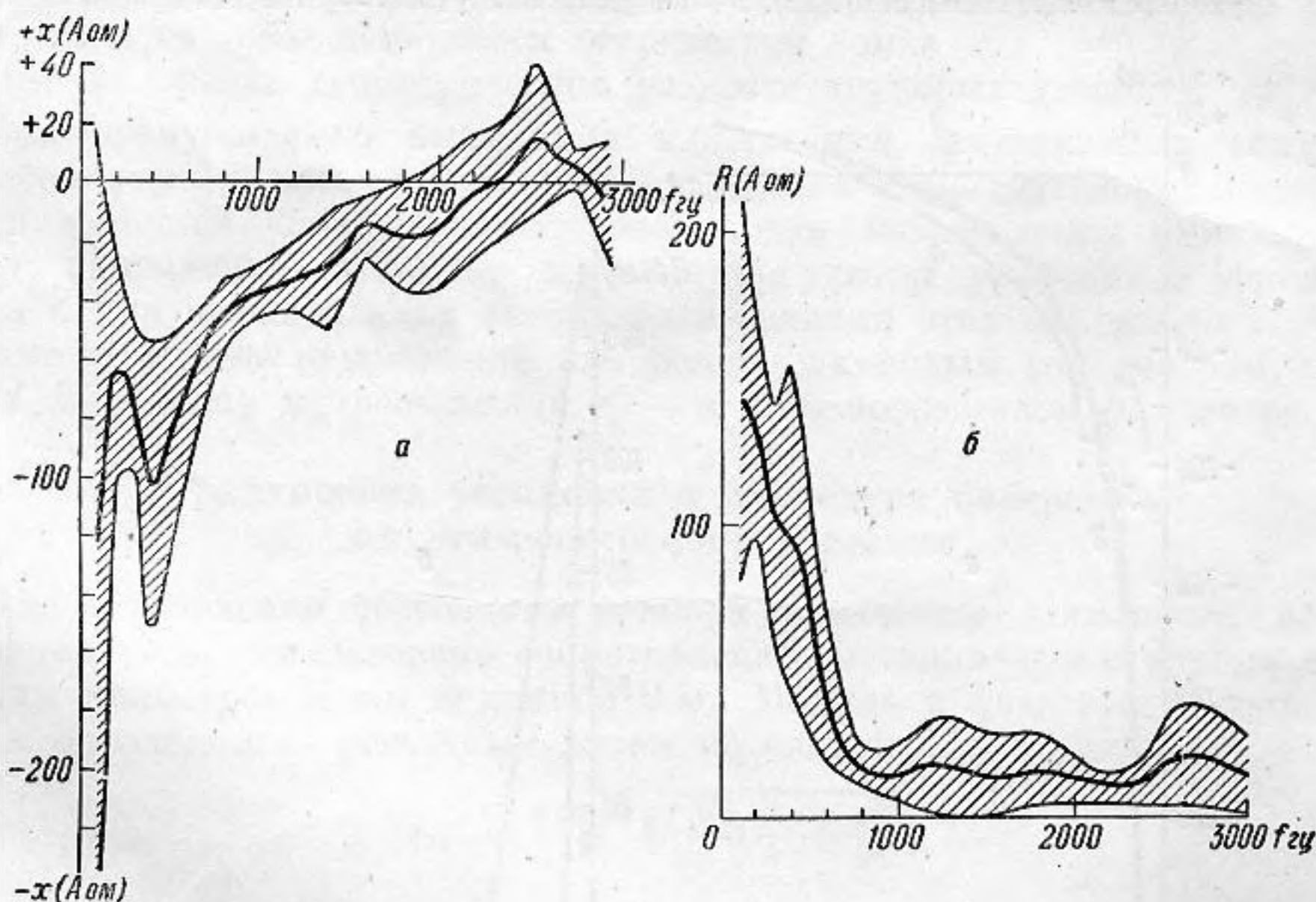
$$\frac{B_1}{A_1 + B_1/z_3} = |z_{\text{от}}| |K| e^{j(\psi + \varphi_{\text{от}})}. \quad (18)$$

При измерениях искомое акустическое сопротивление подключается к выходу четырехполюсника 2. На всех частотах, при которых производятся



Фиг. 4. Кривые разброса величин акустического сопротивления естественного уха для 10 лиц, измеренного через телефонную раковину с малыми отверстиями:

a — реактивная, *b* — активная составляющая



Фиг. 5. Кривые разброса величин акустического сопротивления естественного уха для 10 лиц, измеренного через телефонную раковину с большим отверстием:

a — реактивная, *b* — активная составляющая

измерения, устанавливается необходимое звуковое давление на входе акустического сопротивления и измеряются модули напряжения e_2 и $(e'_2 - e_2)$, а также разность фаз φ_x между ними. Далее, по формуле

$$z_x = \frac{|e_2|}{|e'_2 - e_2|} |z_{\text{от}}| |K| e^{j(\psi + \varphi_{\text{от}} + \varphi_x)} \quad (19)$$

производятся вычисления измеряемого акустического сопротивления.

Измерения акустического сопротивления естественного и искусственного уха

В качестве примера приведем результаты измерения описанным методом акустического сопротивления естественного и искусственного уха. При этих измерениях телефонная раковина, прижимаемая к ушной раковине или к искусственному уху, присоединялась к описанной измерительной установке. Звуковое давление поддерживалось на всех частотах постоянным и равным 10 бар. Измерены были акустические сопротивления с двумя телефонными раковинами, отличающимися друг от друга размерами отверстий. На фиг. 2 и 3 приведены результаты измерений. На этих же фигурах пунктирные кривые отвечают расчетному акустическому сопротивлению системы, состоящей из присоединяемой массы у отверстия телефонной раковины и гибкости объема камеры искусственного уха, при предположении, что активная составляющая сопротивления равна нулю во всем диапазоне частот.

Из сравнения кривых видно, что на частотах выше 400 гц искусственное ухо достаточно близко отражает, в отношении акустического сопротивления, свойства естественного уха. На частотах до 400 гц реактивная часть сопротивления естественного уха существенно меньше, чем для искусственного уха.

В области низких частот наблюдается также (см. фиг. 4 и 5) значительный разброс между результатами измерений для различных лиц. В некоторых случаях была обнаружена утечка между телефонной раковиной и ухом; при этом реактивная составляющая в области низких частот сопротивления принимает инерционный характер.

В заключение автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность инженерам В. И. Бойцову и И. М. Литваку за участие в настоящей работе и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meeker, F. Willard, Slaymaker, H. Frank. A wide Range adjustable Acoustic Impedance. JASA, 1945, 16, 3, 178—182.

Ленинград

Поступила в редакцию
25 февраля 1955 г.