UNCLASSIFIED

AD 667 289

ABSOLUTE CALIBRATION OF REFERENCE HYDROPHONES IN THE AUDIO FREQUENCY RANGE

A.N. Golenkov, et al

Department of the Navy
Washington, D.C.

March 1968

Processed for . . .

DEFENSE DOCUMENTATION CENTER
DEFENSE SUPPLY AGENCY

CLEARINGHOUSE
FOR FEDERAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION

U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE / NATIONAL BUREAU OF STANDARDS / INSTITUTE FOR APPLIED TECHNOLOGY

UNCLASSIFIED

AD 667289

[redacted]

Translation Branch

Classification:

Title: Absolute Calibration of Reference Hydrophones in the Audio Frequency Range

Absolyutnaya Graduirovka Izmeritel'nykh Gidrofonov v Diapazone Zvukovykh Chastot.

Author: A. N. Golenkov and L. E. Pavlov

Pages(s): 24

Source: Izmeritel'naya Tekhnika, No. 5, 1967, pp. 44-49

Original language: Russian

Translator: R

[redacted] TRANSLATION NO. 2553 Approved by: P.T.K.

Date 11 March 1968

Reproduced by the
CLEARINGHOUSE
for Federal Scientific & Technical
Information Springfield Va. 22151

32

Absolute Calibration of Referency Hydrophones in the Audio Frequency Range

By A. N. Golenkov and L. Ye. Pavlov

Source: Izmeritel'naya Tekhnika (Measurements Technology), No. 5, 1967. pp 44-49

The report contains a

Until now, underwater acoustic measurement technology lacked a satisfactory and simple method for the absolute calibration of hydrophones in the low and medium audio frequencies (500 Hz to 5 kHz).

In the frequency area above 5 kHz, the reciprority method (1,2) is used for planar and spherical waves; and, for frequencies below 300-500 Mz, electro-dynamic compensation method (3,4) is used. These methods provide a high order of accurate hydrophone calibration.

Unpredictable pressure effects cause difficulties in hydrophone calibration at the intermediate frequencies of 500 Hz - 5 kHz and also acoustic field problems appear at the higher frequencies. The properties of the water medium, primarily as these define the relationship of the dimensions

of the transducers to the wave length, impose a serious limitation on the use of established methods for calibrating hydrophones at the low and medium audio frequencies.

The comparitively small dimensions and the symmetry of their design, that commonly characterizes modern reference hydrophones, results in a lack of directivity at these frequencies and makes it more expedient to do a pressure-type calibration, the more so, since it is difficult to attain free field conditions at frequencies below 5 kHz.

The electro-dynamic compensation method, in which the opposing electro-dynamic force on the diaphragm of an electro-dynamic transducer serves as the calibration characteristic, is not practical for frequencies above 500 Hz because there is a rapid rise in the diaphragm's inertial impedance with increase in frequency, and a corresponding degradation in the signal-to-noise ratio.

An attempt to use electro-dynamic forces for calibrating a small-dimensioned hydrophone at the higher frequencies, in our opinion, forgoes the major advantages of electro-dynamic compensation and it is technically a complex matter.

A search for a uniform, simple and highly accurate method of calibrating hydrophones led the authors to develop the null method, the basic concept of which is analogous to the electro-dynamic compensation method, but suitable for use at the mid-audio frequencies.

The essence of this method lies in the fact that the oscillations of a piezo-electric surface, in response to sound waves in water, are inhibited by the piezo-electric forces (at an audio rate) which are excited on that surface by applying an exterior voltage to it.

The instant when the piezo surface is immobile (nulled) --when subjected to the simultaneous action of an exterior sound field and the internal piezo-electric forces--the compensation interval--must be measured by a sensitive instrument that measures the oscillatory displacements of the hydrophone's surface.

A cylindrically - configured hydrophone, the two end surfaces of which are not restrained, experiences radial displacements of its piezo ceramic surface under the action of sound waves applied to its outer surface, and this is

expressed in the equation for in inverse piezo-effect (6):

$$\xi = \frac{\sigma}{e} - \delta \frac{U_K}{a}, \tag{1}$$

where σ = is the mechanical stress in the surface developed by the applied sound energy; e -- is the modulus of elasticity; U_K - is the electrical voltage on its surface; = is the thickness of the piezo-ceramic wall; δ - is the piezo-electric modulus.

From (1) it can be seen that by selecting the proper sign and magnitude for U_K, the displacement can be made zero.

The mechanical stress σ in the walls of the hydrophone is proportional to the mechanical transformation ratio r/a (r - is the radius of the cylinder), and therefore:

$$\sigma = \frac{r}{a} p,$$

where p - is the sound pressure.

At compensation - the null ($\xi = 0$) from (1) we have

$$\frac{\sigma}{e} = \delta \frac{U_K}{a} \quad \text{или} \quad p = \frac{\delta e}{r} U_K = M U_K. \tag{2}$$

Equation (2) is the equation for the hydrophone calibration method which we have termed the piezo-electric compensation method. It shows that at the instant of compensation, sound

pressure p, which is exerted on the surface, has a voltage proportional to the compensation applied at the electrodes.

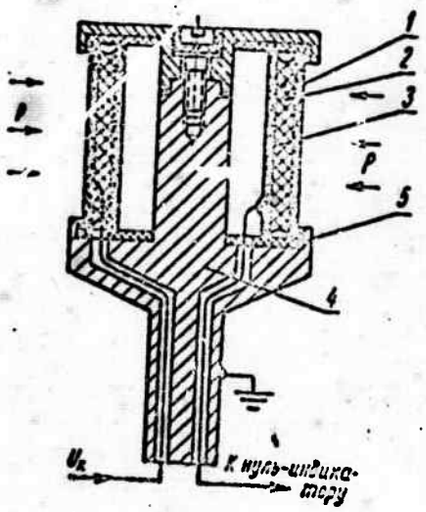
Thus, the instant of compensation is determined by selecting the appropriate phase and amplitude for this voltage from an exterior power supply.

As evident from equation (2), the proportionality coefficient, M is not dependent on frequency, and assumes the character of a constant for a given model of transducer that may be under calibration by the compensation method.

This constant can be determined by an independent process. A compensated transducer is used when calibrating hydrophones. A calibrated hydrophone is placed close to the compensating transducer, and if the acoustic impedance of the calibrated hydrophone at the instant of compensation is sufficiently large, then its sensitivity is determined by the formula: $E = \frac{U}{p} = \frac{U}{MU_k}$ (3)

where U - is the output voltage of the calibrated hydrophone.

The compensating transducer consists of two radially-polarized cylinders 1 and 3 (Fig. 1),



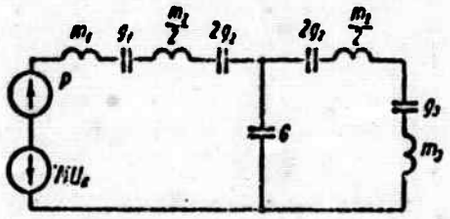
Фиг. 1

mounted coaxially. The space 2 between the cylinders is filled with an acoustically stable material. The cylinders' external electrodes are connected to the housing and grounded. The cylinders bear on gaskets 5 and the cylinders are installed between the upper and lower flanges of the housing 4. These gaskets provide a hermetic seal, an acoustic de-coupling of the cylinders from oscillations of the housing, and a safeguard for the ends of the cylinders against their excitations by sound pressure.

One of these piezo-ceramic cylindrical transducers is the null unit (the outer one in Fig. 1), which compensates the sound pressure when a compensation voltage U_k is applied to its surface; and the second cylinder acts as the null-indicator's sensitive element which senses the instant of compensation as evidenced by the dynamic equilibrium between sound pressure and the piezo-electric effect.

The compensating transducer operates in the following manner. The sound pressure waves that impinge on the null unit are conducted through the adjacent acoustically-stable material to the sensing element of the null indicator; and, consequently an electric voltage is impressed across the electrodes of the null-indicator that represents the oscillations of its inner surface. Proportionate to the value of the input compensating voltage on the null units' surface, this signal lowers in value, and when the instant of compensation is reached, it becomes zero, and thus satisfies the conditions for the piezo-electric compensation method.

The equivalent electric circuit of the compensating transducer is seen in Fig. 2.



Фиг. 2

Here $m_1 = a_1\rho_1$ and $m_3 = a_3\rho_3$ are the distributed masses of the inner and outer piezo-cylinders; respectively: $g_1 = \frac{r_1^2}{a_1 e_1}$ and $g_3 = \frac{r_3^2}{a_3 e_3}$ are their elasticities (r is the average radius, p-is the density); $m_2 = a_2\rho_2$ is the mass of the material separating the piezo-cylinders, $g_2 = \frac{r_2^2}{a_2 e_2}$ and $G = \frac{a_2}{\rho_2 e_2^2} = \frac{a_2}{e_2}$ are the elasticities of that material.

When filling the cavity between the two cylinders with a rigid material one may neglect eleasticity G, which determines the deformations in the width dimension, but when filling the cavity with a fluid, one must exclude the elasticity expression g_3 from the circuit.

In our set up, we filled the cavity with an epoxy compound that had mechanical characteristics mid way between a solid and a fluid, and it was necessary to calculate both elasticities.

As seen in the equivalent circuit diagram, the compensation condition is attained independent of frequency and the values of the circuit parameters. In the fabrication of the transducers measures were taken to reduce the influence of longitudnal stresses of the null-unit which are determined by the piezo modulus $\delta_{12}=\delta_{13}$, on the e.m.f. of the null indicator (when the cavity is filled with a fluid, the utility of such measures is superfulous.)

It is to be noted, that at a finite wall thickness a_1 of the null unit, the expression for the constant M (of the compensation transducer) is made complex. Physically, this is due to the fact that when a thick wall is used, the inner and outer surfaces of the null unit oscillate non-uniformly: when one surface or the other is at rest, the other still makes minor oscillations because its absolute displacements depend on all three piezo-moduluses, δ_{11}, δ_{12} and δ_{13} affecting its surface.

Assuming that the surface at rest is the piezo ceramic surface adjacent to the sound conducting material in the cavity, calculations lead to the following dependency for

the constant M relative to the thickness of the wall:

$$M = M_0\left[1 + \frac{a_1}{r_1}\left(\frac{\delta_{11}}{\delta_{12}} - \nu\right)\right].$$

where $M_0 = \frac{\delta_1 e_1}{r_1}$; ν — is Poisson's Ratio.

This formula shows that the surface on which the sound pressure acts directly will remain somewhat dampened. This, strictly speaking, lowers the acoustic impedance of the compensating transducer.

The wall thickness of the null unit must be adequately thin. Our set up observed the relationship $\frac{a_1}{r_1} < 4 \cdot 10^{-2}$.

<u>The Experimental Set-up</u>. Calibration of hydrophones by the piezo-electric compensation method was carried out in a small tank filled with water. The sound waves in the water were generated by a piezo-ceramic transducer.

Using a compensation transducer of the type described, we restricted its use to the calibration range of 1-500 Hz.

In the higher frequency area, we used an inverted compensation transducer which gives the greatest practical resolution of waves in a small tank's working cavity.

In this variant, the compensation transducer in an integral part of the measuring tank: the walls of the null unit form its lateral surface, and the inner piezo-ceramic cylinder is the sensing element of the null indicator.

The transducer, producing the sound pressure, is installed in the sturdy tank mounting frame thus providing the desired grounding of the un-grounded (inner) surfaces of the null indicator. The hydrophone to be calibrated is secured in the opening located in the middle of the tank cover. The cover rests on a resilent seal and covers the piezo-ceramic cylinders and hermetically seals the inner cavity of the measuring tank.

The linear dimensions of the tank are calculated by a well-known formula (7) so that the radial resonant point of the working cavity was always higher than the longitudinal.

Relative to the vertical dimension of the tank, a test showed that the distribution of pressure (which occurs with increase of frequency) turns out to be practically negligible for frequencies up to $\sim 0.1 f_1$.

For calibration of hydrophones at the higher frequencies, it is necessary to take into account non-uniformities in sound pressure along the longitudinal plane of the tank.

The sound pressure distribution curve has a symmetrical character which permits one to execute a calibration of those hydrophones that have a symmetrical-type construction, and which may occupy a substantial volume of the measuring tank, provided that the compensating transducer and calibrated hydrophone have coincident planes of acoustic symmetry.[1]

The fact is that the compensating transducer measures the average value acting on the surface of the null unit, and its sensitivity to the pressure gradient is extremely little.

If, as it commonly happens, a non-directional hydrophone exhibits the very same integrating characteristics, then one may execute a calibration under conditions of a variable

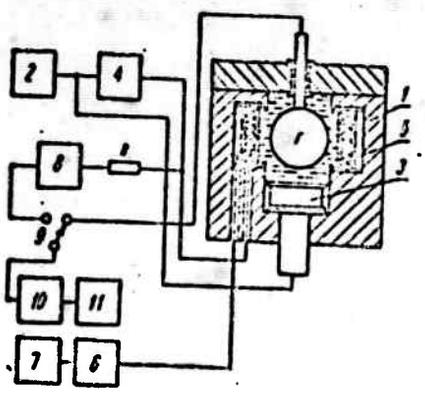
1. That which we term the plane of acoustic symmetry of the inverted compensating transducer or the hydrophone is that plane in which all possible sound pressure deviations from the average value are equalized.

distribution up to about 0.8 μ ; when, strictly speaking, the tank seems too small.

A barrier of transparent organic-glass installed on the tank cover, provides a hermetical seal for the measuring tanks' working cavity under a free water surface. This simple arrangement permits filling up the cavity with water that is free of air bubbles, which is a pre-requisite for proper functioning of the calibration device.

Our test showed that the constructional mechanical resonances of the system can be shifted beyond the working frequency range up through 5 kHz.

A bloc diagram of the calibration device is seen in Figure 3. The hydro-acoustic part of it is represented by the measuring tank 1, described above.



Фиг. 3

The sound pressure in the tank is generated by the piezo-ceramic projector 3, fed from a sine wave generator 2. From this generator, through a phase-inverter 4, the compensation voltage U_k appears at the null unit's compensating tranducer, 5. The voltage taken from the terminals of the null indicator's sensing element through amplifier 6, is presented on an oscilliscope 7 which serves as a visual indicator of the instant of compensation as evidenced by the disappearance of the sinusoidal signal.

The calibration device provides direct measurement of the sensitivity of hydrophone under calibration, Γ, (at the instant of compensation) using the readings of attenuator,8 which is calibrated in units of sensitivity.

$$E = \frac{1}{M} \cdot \frac{U}{U_k}$$

This attenuator measures the ratio of voltages $\frac{U}{U_k}$ with the scale calculation $\frac{1}{M}$. To do this, the attenuator is equipped with an accessory voltage divider formed by resistance R and the input resistance of the attenuator. Resistance R is selected according to the size of M for a given tank size, so that when the output voltages of the hydrophone under calibration and of the attenuator are equal,

the dial reading of the latter reads the sensitivity.

The conjunction of the output voltages is indicated visually on the oscillograph 11 when they are alternately fed to it through switch, 9 and pre-amplifier, 10.

The output voltage of the hydrophone under calibration is recorded, and then, via the attenuator at the oscillograph, the very same voltage is used to ascertain the hydrophone's sensitivity.

The high input impedance (not less than 300 megohms) of the input amplifiers allows one to measure sensitivity over the frequency range 1 Hz to 5 kHz for the great majority of piezo-ceramic hydrophones, and practically irrespective of their loading.

The Basic Test Results. Evaluation of Accuracy

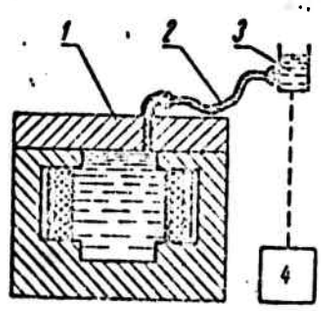
The experimental determination of the compensating transducer's M constant is fundemental to the piezo-electric compensation method.

The constant expresses the relationship of the pressure p^o to the voltage U_k^o required to compensate this pressure; that is: $M = \frac{P^o}{U_k^o}$, and it is established by the characteristics of the piezo-material and by the design of the transducer - independent of frequency.

In principle, M can be determined in the static mode, but it is better, with piezo-electric transducers, to assign a variable pressure p^o.

For this, we used a modified hydrostatic environment (8) in which a periodically varying level of a free water surface creates a varying hydrostatic pressure in the water.

The cavity of the measuring tank 1 (Fig. 4), is joined by a flexible tube, 2, to an auxiliary open vessel, 3, which is fitted to a vibration table, 4, that generates sinusoidal oscillations which act vertically. The entire system is filled with water and the initial hydrostatic pressure is determined by position of the free meniscus* in the open vessel. The hydrostatic pressure $p^o = pghsinwt$ is changed at a rate proportional to the oscillatory displacement of the free water surface; wher; p-is the water density; g-force of gravity; h-amplitude of the oscillatory displacement.



Фиг. 4

* The curved upper surface of a liquid column, concave when the walls are wetted by the liquid and convex when not.

Selection of an adequately low (0.3 - 0.4 Hz) oscillating frequency for the vibration table made it possible to disregard the inertial forces acting in the oscillating liquid. This was due to the trifling oscillatory accellerations associated with such a low frequency.

The amplitude h of the oscillations in our measurements were 2 centimeters, and, consequently, $M = \frac{p^0}{U_k^0} = \frac{196}{U_k^0}$ к/м².

The compensation voltage U_k^0 was measured by a high-quality voltmeter. Experience showed that, when using the hydrostatic system, the error in determining M is a fraction of one percent and can be regarded as a constituent of the systematic error of the calibration device.

In this connection, it is of interest to note that repeated measurements of M, carried out over a year's time, gave a variation in magnitude within limits of 1% which indicates a high stability with respect to time. In the event that a piezo-ceramic is used in the null unit, the characteristics of which are temperature - dependent, the calibration of the hydrophone by the piezo-electric compensation method has to be carried out at that water temperature at which the M constant was determined.

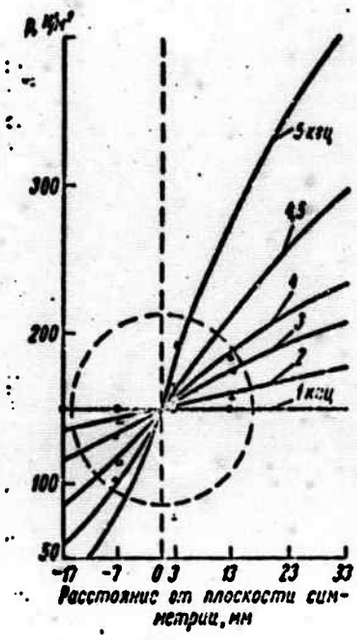
The tank described was made with a temperature-stabilized ceramic, and gave an M = $185.7 \frac{н/м^2}{в}$.

The dimensions of the inner cavity of this measuring tank (diameter - 78 mm; height 105 mm) allowed us to calibrate non-directional hydrophones in it which have dimensions not exceeding 50 mm, and at frequencies up to 5 kHz.

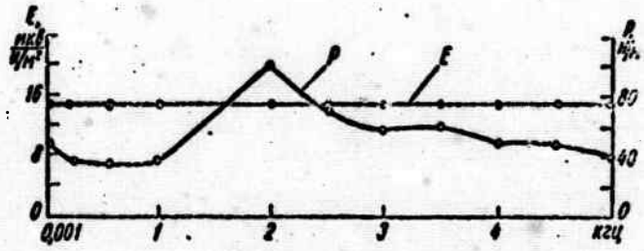
The vibration dampening gaskets on the butt ends of the piezo-ceramic unit gave practically complete "de-coupling" of the hydrophone under calibration from the oscillations of the compensating transducer (the walls of the chamber). This was checked without water, and when an alternating voltage was fed to the exciter (to 100 db) and to the terminals of the null unit (to 10 db), there was no signal from the hydrophone. In the working band of frequencies, the compensating voltage was several volts.

Use of the mechanism of piezo-effect is realized by the exceptionally high sensitivity to deformation of the compensating transducer, however, its sensitivity to pressure lay in the area $20-60 \frac{мкв}{н/м^2}$.

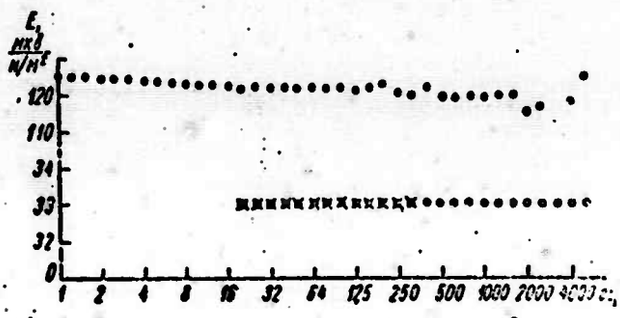
At frequencies above 1 kHz, it is necessary to satisfy the theoretical prerequisites, related to the sound field in a tank, which would satisfy the tolerance for hydrophone calibrations under conditions of possible variations in sound pressure along the length of the tank.



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7.

Using a miniature spherical hydrophone of a known constant sensitivity, the relative change of pressure was measured when the hydrophone was positioned at various points along the length of the tank and at frequencies of 1,2,3,4,4.5 and 5 kHz.

The experimental curves, thus obtained for the distribution of sound pressure along the tank length are shown in Fig. 5. Along the vertical axis are laid out the measured values of pressure, and along the horizontal axis, the position of the miniature hydrophone relative to the plane of acoustic symmetry of the tank.

These curves, for frequencies to 5 kHz, agree well with the calculated values, and their relatively good symmetry is such that one may practically view non-uniformities as cancelled out by the sound pressure distribution on the surface of a hydrophone of comparitively large dimensions.

In Fig. 6 is presented the frequency dependency of a sound pressure p , generated in the measuring tank. Using the compensating transducer and with a constant voltage on the generator terminals, the measured sound pressure level varies substantially depending on the frequency of excitation.

However, at the hydrophone sensitivity E, it remains linear which indicates the measuring accuracy of the piezo-electric compensation method, in spite of the change in magnitude of the sound pressure.

Evaluation of the system error was determined experimentally by numerous hydrophone calibrations. They indicate a high reproducibility of measured data.

As an example, in the upper portion of Fig. 7 is shown the frequency characteristic of sensitivity of a spherical hydrophone made of barium titanate and having a diameter of 50 mm. Each point on the graph represents an average of ten measurements. The maximum deviation of the values at individual fixed frequencies over the band 1 Hz to 5 kHz was 0.8 db; the r.m.s. error of the series of measurements lay within 3%.

In the lower portion of the graph is shown the frequency characteristics of sensitivity for a piezo-ceramic hydrophone of a cylindrical configuration (diameter 12 mm, height 22mm).

In the spectrum 20-30 Hz the calibration points (indicated by "x's" over the little circles) were done by the piezo-electric compensation method in a water-filled steel tank (diameter 150 mm, length 200 mm) using a compensating transducer (with a constant $M = 157{,}5 \frac{н/м^2}{в}$, installed as a separate component (see Fig. 7). In the spectrum 20 Hz - 5 kHz

the calibration was done by the piezo-electric compensation method in a tank with an inverted compensating transducer (diameter 78 mm, length 105 mm, $M = 185.7 \frac{N/M^2}{a}$) .

In spite of the fact that the two test devices substantially differed in the constructional features of their respective tanks, in their compensating transducers, and also in certain instrumentation (in this sense, they can be regarded as independent), the calibration results in both devices were practically the same (within 3%).

The good agreement indicates the accuracy of measuring sensitivity by the piezo-electric compensation method.

At the upper end of the frequency spectrum the calibration data, using the piezo-electric compensation method, agrees (within 0.5 db) with that obtained independently on a non-directional hydrophone using the free-field reciprocity method.

Calibration of non-directional hydrophones with dimensions less than 10 mm, using the piezo-electric compensation method, was carried out at frequencies up to 23 kHz. In several areas of the frequency spectrum above 5 kHz, the measurements were complicated by mechanical structural resonances of the measuring tank at frequencies which corresponded to the anomalies noted

in the frequency characteristics of the hydrophone under calibration.

LITERATURE

1. Foch, M.P. Podvodnaya Akustika ("Underwater Acoustics") (translated from the English). Published by "Mir". 1965, Moskva.

2. Klyukin, L.L. and Kollesnikov, A. Ye. Akusticheskiye Izmereniyz v Sudostroyenii ("Acoustic Measurements in Shipbuilding") Pub'd by "Sudostroyeniye", 1966, Leningrad.

3. Trott, W.J. and Lide, E. Journal of the Acoustic Society of America, V.27, No. 5.

4. Golenkov, A. N. Izmeritel'naya Tekhnika ("Measurements Technology") 1961, No. 9.

5. Sims, C. and Bobber R. J. Journal of the Acoustic Society of America, 1959, V. 31, No. 10.

6. Kharkevich, A.A. Teoriya Preobrazovatelei ("Theory of Transducers") Pub'd by "Gosenergoizdat," 1948, Moskva and Leningrad.

7. Skuchik, E. Osnovi Akustiki ("Fundementals of Acoustics") Pub'd by 1.1.L., 1958, Moskva.

8. Golenkov, A.N. Izmeritel'naya Tekhnika ("Measurements Technology") 1965, No. 5.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

5

1967

Абсолютная градуировка измерительных гидрофонов в диапазоне звуковых частот

А. Н. ГОЛЕНКОВ и Л. Е. ПАВЛОВ

681.2.089.6:534.88

В практике гидроакустических измерений до сих пор отсутствует удобный и достаточно простой метод абсолютной градуировки гидрофонов в диапазоне низких и средних звуковых частот (500 *гц* — 5 *кгц*).

В диапазоне частот выше 5 *кгц* применяется метод взаимности [1, 2] в поле плоских или сферических волн, а на частотах ниже 300—500 *гц* — метод электродинамической компенсации [3, 4], обеспечивающий высокую точность гидрофонов.

На промежуточных частотах 500 *гц* — 5 *кгц* выявляются трудности при градуировке гидрофонов «по давлению» в диапазоне низких частот, а также и «по полю» на более высоких частотах. Условия среды, определяемые прежде всего соотношением размеров преобразователей звука и длиной звуковой волны, накладывают существенное ограничение применению известных методов градуировки гидрофонов в диапазоне низких и средних звуковых частот.

Сравнительно небольшие размеры современных измерительных гидрофонов, имеющих обычно симметричную конструкцию, обеспечивают отсутствие направленности на этих частотах и делают целесообразным проведение их градуировки по давлению, тем более, что реализовать условия свободного поля на частотах ниже 5 *кгц* затруднительно.

Метод электродинамической компенсации, в котором условия градуировки обеспечиваются при компенсации звукового давления противодавлением электродинамических сил на мембране электродинамического преобразователя, практически не может быть использован на частотах выше 500 *гц* из-за быстрого роста инерционного сопротивления мембраны с повышением частоты и соответствующего ухудшения отношения сигнал — шум.

Попытка использовать электродинамические силы для градуировки миниатюрного образцового гидрофона на более высоких частотах, сделанная в [5], по нашему мнению, теряет важные преимущества метода электродинамической компенсации и представляется технологически сложной.

Поиски единообразия и простоты градуировки гидрофонов с высокой точностью привели авторов к разработке нулевого метода, основная идея которого аналогична идее метода электродинамической компенсации, но позволяет реализовать ее в диапазоне звуковых частот.

Сущность этого метода состоит в том, что колебания пьезоэлектрической оболочки под действием звукового давления в среде тормозятся пьезоэлектрическими силами звуковой частоты, возникающими в оболочке при подаче на ее обкладки внешнего напряжения.

Момент достижения практической неподвижности оболочки, находящейся под одновременным воздействием внешнего звукового давления и внутренних пьезоэлектрических сил — момент компенсации, — должен отмечаться чувствительным индикатором колебательных деформаций оболочки.

Радиальные деформации пьезокерамической оболочки в виде цилиндра со свободными торцами, находящейся под воздействием звукового давления на наружной поверхности и пьезоэлектрических сил, определяются из уравнения обратного пьезоэффекта [6]

$$\xi = \frac{\sigma}{e} - \delta \frac{U_к}{a}, \qquad (1)$$

где σ — механическое напряжение в оболочке, задаваемое приложенным звуковым давлением; e — модуль упругости; $U_к$ — электрическое напряжение на обкладках оболочки; a — толщина оболочки; δ — пьезомодуль.

Из (1) видно, что при соответствующем выборе знака и величины $U_к$ деформацию можно обратить в нуль.

Механическое напряжение σ в стенках оболочки пропорционально коэффициенту механической трансформации r/a (r — радиус цилиндра) и поэтому

$$\sigma = \frac{r}{a} p,$$

где p — звуковое давление.

При компенсации ($\xi = 0$) из (1) получаем

$$\frac{\sigma}{e} = \delta \frac{U_к}{a} \quad \text{или} \quad p = \frac{\delta e}{r} U_к = M U_к. \qquad (2)$$

Уравнение (2) является уравнением метода градуировки гидрофонов, названного нами методом пьезоэлектрической компенсации. Оно показывает, что в момент компенсации звуковое давление p, действующее на оболочку, пропорционально напряжению компенсации, подаваемому на ее электроды.

Таким образом, момент компенсации достигается подбором амплитуды и фазы этого напряжения от внешнего источника.

Как видно из (2), коэффициент пропорциональности M не зависит от частоты и приобретает смысл постоянной для данного образца компенсационного преобразователя.

Эта постоянная может быть определена независимым методом. Компенсационный преобразователь используется при градуировке гидрофонов. Для этого градуируемый гидрофон устанавливается вблизи компенсационного преобразователя и, если акустический [illegible] гидрофона в момент компенсации достаточно [illegible] его чувствительность определяется по формуле

$$E = \frac{U}{p} = \frac{U}{M U_к}, \qquad (3)$$

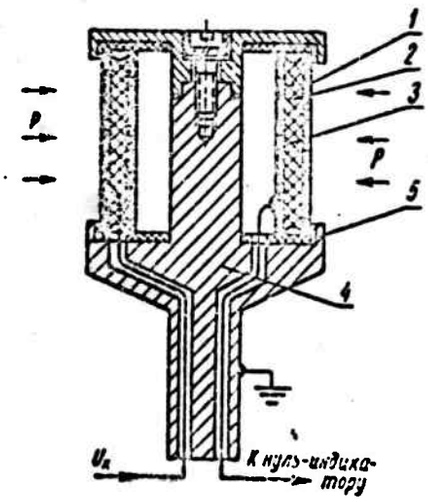
где U — выходное напряжение градуируемого гидрофона.

Компенсационный преобразователь состоит из двух радиально поляризованных цилиндров *1* и *3* (фиг. 1), расположенных коаксиально. Зазор *2* между цилиндрами заполнен акустически жесткой средой. Наружные электроды цилиндров соединены с корпусом и заземлены. Цилиндры устанавливаются между верхним и нижним фланцами корпуса *4* на прокладках *5*. Эти прокладки обеспечивают герметизацию, акустическую развязку цилиндров от колебаний корпуса и защиту торцов цилиндров от воздействия на них звукового давления.

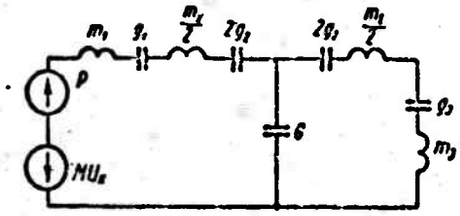
Один из пьезокерамических цилиндров является нуль-органом (внешний на фиг. 1), на котором осуществляется компенсация звукового давления при подаче на его обкладки напряжения $U_к$ компенсации, а второй — чувствительным элементом нуль-индикатора момента компенсации, свидетельствующим о динамическом равновесии звукового воздействия и пьезоэлектрических сил.

Компенсационный преобразователь работает следующим образом. Колебания нуль-органа под воздействием звукового давления передаются через промежуточный слой чувствительному элементу нуль-индикатора, на электродах которого, следовательно, возникает электрическое напряжение, свидетельствующее о колебаниях внешней оболочки. По мере подачи на обкладки нуль-органа напряжения компенсации этот сигнал уменьшается, а при достижении момента компенсации обращается в нуль, при этом реализуются условия метода пьезоэлектрической компенсации.

Эквивалентная схема компенсационного преобразователя изображена на фиг. 2.



Фиг. 1



Фиг. 2

Здесь $m_1 = a_1\rho_1$ и $m_3 = a_3\rho_3$ — распределенные массы наружного и внутреннего цилиндров, соответственно; $g_1 = \frac{r_1^2}{a_1 e_1}$ и $g_3 = \frac{r_3^2}{a_3 e_3}$ — их гибкости (r — средний радиус, ρ — плотность); $m_2 = a_2\rho_2$ — масса промежуточного слоя, $g_2 = \frac{r_2^2}{a_2 e_3}$ и $G = \frac{a_2}{\rho_2 e_2^2} = \frac{a_2}{e_2}$ — гибкости промежуточного слоя.

При заполнении зазора между цилиндрами твердым веществом можно пренебречь гибкостью G, определяющей деформации по толщине, а при заполнении зазора жидкостью, не обладающей значительной гибкостью, следует исключить из схемы гибкость g_2.

В нашем случае при заполнении зазора эпоксидным компаундом — веществом, занимающим промежуточное положение по своим механическим параметрам между жидкостью и твердым телом, необходимо учитывать обе гибкости.

Как видно из эквивалентной схемы, режим компенсации достигается независимо от частоты и значений параметров схемы. При конструировании преобразователя приняты меры, снижающие влияние продольных деформаций нуль-органа, определяемых пьезомодулем $\delta_{12} = \delta_{13}$, на э. д. с. нуль-индикатора (при заполнении зазора жидкостью надобность в таких мерах отпадает).

Следует заметить, что при конечной толщине a_1 стенки нуль-органа выражение для постоянной M компенсационного преобразователя усложняется. Физически это связано с тем, что при использовании толстой оболочки наружная и внутренняя поверхности нуль-органа колеблются неодинаково: при неподвижности одной из них другая еще совершает малые остаточные колебания, так как ее абсолютные смещения зависят от всех трех пьезомодулей δ_{11}, δ_{12} и δ_{13} в оболочке.

Расчеты, сделанные в предположении, что останавливается поверхность пьезокерамической оболочки, примыкающая к промежуточному слою, приводят к следующей зависимости постоянной M от толщины оболочки:

$$M = M_0\left[1 + \frac{a_1}{r_1}\left(\frac{\delta_{11}}{\delta_{13}} - \nu\right)\right],$$

где $M_0 = \frac{\delta_1 e_1}{r_1}$; ν — коэффициент Пуассона.

Эта формула показывает, что поверхность, непосредственно воспринимающая звуковое давление, остается

несколько недоторможенной. При этом, строго говоря, снижается акустический импеданц компенсационного преобразователя.

Оболочка нуль-органа должна быть достаточно тонкой. В наших установках соблюдается отношение $\frac{a_1}{r_1} < 4 \cdot 10^{-2}$.

Экспериментальная установка. Градуировка гидрофонов методом пьезоэлектрической компенсации производится по давлению в малой камере, наполненной водой. Звуковое давление в камере возбуждается при помощи пьезокерамического излучателя.

Компенсационный преобразователь описанной конструкции применялся нами лишь при градуировке гидрофонов в диапазоне частот 1—500 *гц*.

В диапазоне более высоких частот нами был использован обращенный компенсационный преобразователь, дающий наиболее экономичное решение волновых размеров полости малой камеры.

В этом варианте компенсационный преобразователь является неотъемлемой частью измерительной камеры: стенки нуль-органа образуют ее боковую поверхность, а внешний пьезокерамический цилиндр является чувствительным элементом нуль-индикатора момента компенсации.

Возбудитель звукового давления устанавливается в массивном основании камеры, обеспечивающем надежное экранирование незаземленных (внешних) обкладок нуль-индикатора. Градуируемый гидрофон закрепляется в центральном отверстии крышки камеры, которая на амортизационном уплотнении закрывает блок пьезокерамических цилиндров и герметизирует внутреннюю полость измерительной камеры.

Линейные размеры камеры по известным формулам [7] рассчитываются так, чтобы радиальный резонанс полости всегда находился выше продольного (f_l).

Опыт показал, что распределение давления по высоте измерительной камеры, возникающее с повышением частоты, практически оказывается пренебрежимым лишь до частот $\sim 0{,}1 f_l$.

При градуировке гидрофонов на более высоких частотах необходимо учитывать неравномерность звукового давления по длине камеры.

Симметричный характер кривых распределения звукового давления позволяет производить градуировку в камере симметричных по конструкции гидрофонов, занимающих значительный объем измерительной камеры, при условии совмещения плоскостей акустической симметрии[1] компенсационного преобразователя и градуируемого гидрофона.

Дело в том, что компенсационный преобразователь измеряет среднее давление, действующее на поверхность нуль-органа, и чувствительность его к градиенту давления весьма мала.

[1] Плоскостью акустической симметрии обращенного компенсационного преобразователя или гидрофона мы называем плоскость, в которой компенсируются возможные отклонения звукового давления от среднего значения.

Если, как это бывает обычно, ненаправленный гидрофон обладает такими же интегрирующими свойствами, то градуировку оказывается возможным производить и при наличии заметного волнового распределения до $\sim 0{,}8\, f_l$, когда, строго говоря, камера уже не может считаться малой.

Ограждение из прозрачного оргстекла, установленное на крышке, позволяет производить герметизацию полости измерительной камеры под свободной поверхностью воды. Это простое устройство обеспечивает заполнение полости водой без воздушных пузырьков воздуха, что необходимо для правильной работы установки.

Наш опыт показал, что механические конструктивные резонансы системы могут быть вынесены за пределы рабочего диапазона частот градуировки до частоты 5 *кгц*.

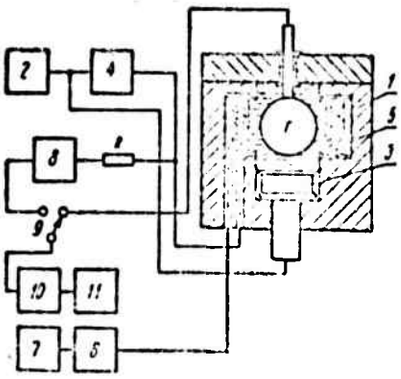
Блок-схема измерительной установки представлена на фиг. 3. Гидроакустическая часть ее представлена измерительной камерой *1*, описанной выше.

Звуковое давление в камере возбуждается пьезокерамическим излучателем *3*, питаемым от генератора электрических колебаний *2*. От этого же генератора через фазовращатель *4* на нуль-орган компенсационного преобразователя *5* подается напряжение $U_к$ компенсации. Напряжение, снимаемое с электродов чувствительного элемента нуль-индикатора, через усилитель *6* подается на осциллоскоп *7*, являющийся визуальным индикатором момента компенсации, который определяется по исчезновению синусоидального сигнала.

В измерительной установке предусмотрено непосредственное измерение чувствительности градуируемого гидрофона *Г* (в момент компенсации) по аттенюатору *8*, отградуированному в единицах чувствительности

$$E = \frac{1}{M} \cdot \frac{U}{U_к}$$

Этот аттенюатор измеряет отношение напряжений $\frac{U}{U_к}$ с учетом масштаба $\frac{1}{M}$. Для этого аттенюатор снабжается дополнительным делителем, образованным со-



Фиг. 3

противлением R и входным сопротивлением аттенюатора. Сопротивление R выбирается по величине M для данной камеры так, чтобы при равенстве выходных напряжений градуируемого гидрофона и аттенюатора деление на лимбе последнего давало отсчет чувствительности.

Сравнение выходных напряжений производится визуально, на экране осциллографа *11*, куда они подаются поочередно при помощи переключателя *9* через предварительный усилитель *10*.

Выходное напряжение градуируемого гидрофона запоминается, а затем при помощи аттенюатора на экране осциллографа устанавливается такое же напряжение, при котором и считывается значение искомой чувствительности гидрофона.

Высокое входное сопротивление (не менее 300 *Мом*) примененных усилителей позволяет в диапазоне частот 1 *гц* — 5 *кгц* получать для подавляющего большинства пьезокерамических гидрофонов чувствительность практически в режиме холостого хода.

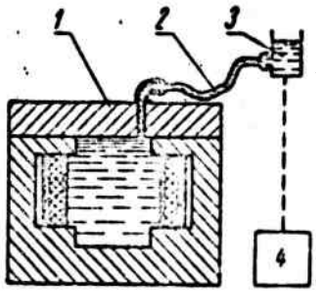
Основные экспериментальные результаты. Оценка точности. Фундаментальным для метода пьезоэлектрической компенсации является экспериментальное определение постоянной M компенсационного преобразователя.

Эта постоянная выражается отношением давления p^0 к напряжению $U_к^0$, необходимому для компенсации этого давления, т. е. $M = \frac{p^0}{U_к^0}$, и определяется свойствами пьезоматериала и конструкцией преобразователя, не зависящими от частоты.

Принципиально M может быть определено в статическом режиме, но для пьезоэлектрических преобразователей удобнее задавать переменное давление p^0.

Мы использовали для этого гидростатическое возбуждение [8], при котором переменное гидростатическое давление в воде создается путем периодического изменения уровня свободной поверхности жидкости.

Полость измерительной камеры *1* (фиг. 4) посредством гибкой трубки *2* сообщается с дополнительным открытым сосудом *3*, установленным на вибростолике *4*, совершающем синусоидальные колебания по вертикали. Вся система заполняется водой и начальное гидростатическое давление определяется положением свободного мениска в открытом сосуде. В такт колебаниям свободной поверхности изменяется гидростатическое давление $p^0 = \rho g h \sin \omega t$, пропорциональное колебательному смещению (ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, h — амплитуда колебательного смещения).



Фиг. 4

Частота колебаний вибростолика выбиралась достаточно низкой (0,3—0,4 *гц*), чтобы влиянием инерционных сил в колеблющейся жидкости можно было пренебречь из-за малости колебательных ускорений.

Амплитуда h колебаний в наших измерениях составляла 2 *см*, и, следовательно, $M = \frac{p^0}{U_к^0} = \frac{196}{U_к^0}$ *н/м²*.

Напряжение компенсации $U_к^0$ измерялось вольтметром высокого класса. Опыт показал, что при использовании гидростатического возбудителя погрешность определения M составляет доли процента и может рассматриваться как неисключенный остаток систематической погрешности градуировочной установки.

Интересно в этой связи отметить, что повторные измерения M, проведенные через год, дали вариации этой величины также в пределах 1%, что свидетельствует о ее высокой временной стабильности. В случае применения в нуль-органе пьезокерамики, свойства которой зависят от температуры, градуировка гидрофонов методом пьезоэлектрической компенсации должна проводиться при той температуре воды, при которой была определена постоянная M.

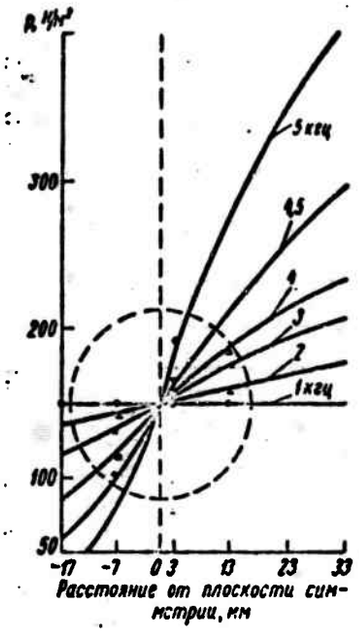
Для описываемой камеры, собранной на температурно-стабилизированной керамике, $M = 185{,}7 \frac{н/м^2}{в}$.

Размеры внутренней полости этой измерительной камеры (диаметр — 78 *мм*, высота 105 *мм*) позволяли градуировать в ней ненаправленные гидрофоны с размерами, не превышающими 50 *мм*, до частоты 5 *кгц*.

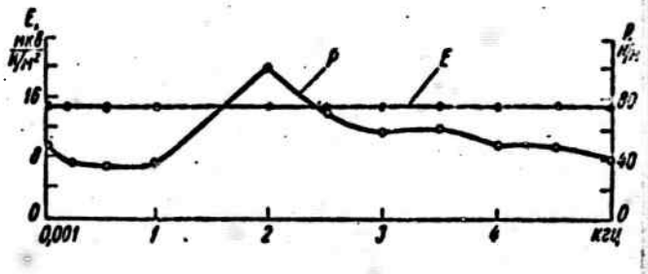
Виброизолирующие прокладки на торцах пьезокерамического блока практически полностью обеспечивают «развязку» градуируемого гидрофона от колебаний компенсационного преобразователя (стенок камеры). Это проверялось без воды при подаче переменного напряжения на возбудитель (до 100 *в*) и на электроды нуль-органа (до 10 *в*); сигнал с гидрофона отсутствовал. В рабочем диапазоне частот напряжение компенсации составляло несколько вольт.

Использование механизма пьезоэффекта реализует исключительно высокую чувствительность компенсационного преобразователя к деформациям, однако его чувствительность к давлению лежала в пределах 20—60 $\frac{мкв}{н/м^2}$.

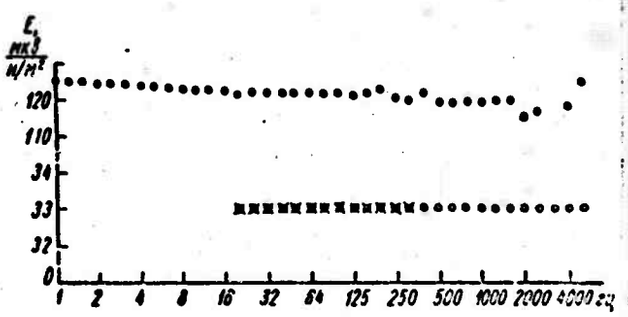
При частоте выше 1 *кгц* необходимо было убедиться в соответствии звукового поля в камере теоретическим предпосылкам, обосновывающим допустимость градуировки гидрофонов в условиях возможной неравномерности звукового давления по длине камеры.



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7.

При помощи миниатюрного сферического гидрофона с заведомо постоянной чувствительностью было измерено относительное изменение давления при помещении гидрофона в различных точках по длине камеры на частотах 1; 2; 3; 4; 4,5; 5 *кгц*.

Полученные таким образом экспериментальные кривые распределения звукового давления по длине камеры представлены на фиг. 5. По вертикальной оси отложены измеренные значения давления, в по горизонтальной — положение миниатюрного гидрофона относительно плоскости акустической симметрии камеры.

Эти кривые в диапазоне частот до 5 *кгц* удовлетворительно согласуются с расчетными, в их достаточная симметричность относительно плоскости симметрии позволяет считать практически компенсированной неравномерность распределения звукового давления на поверхности градуируемого гидрофона сравнительно большого размера.

На фиг. 6 приведена частотная зависимость звукового давления *p*, возбуждаемого в измерительной камере. Уровень звукового давления, измеренный при помощи компенсационного преобразователя при постоянстве напряжения на зажимах возбудителя, существенно изменяется в зависимости от частоты возбуждения.

Однако при этом чувствительность *E* гидрофона оставалась линейной, что свидетельствует о правильности измерения звукового давления методом пьезоэлектрической компенсации, несмотря на изменения величины звукового давления.

Оценка погрешности проводилась экспериментально путем многократных градуировок гидрофонов. Она свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов измерений.

В качестве примера в верхней части фиг. 7 приведена частотная характеристика чувствительности сферического гидрофона из керамики титаната бария диаметром 50 *мм*. Каждая точка на графике взята как среднее из десяти измерений. Максимальный разброс значений на отдельных фиксированных частотах в диапазоне 1 *гц* — 5 *кгц* достигал 0,8 *дб*, среднеквадратическая погрешность ряда измерений лежала в пределах 3%.

В нижней части этого графика приведены частотные характеристики чувствительности пьезокерамического гидрофона цилиндрической формы (диаметр 12 *мм*, высота 22 *мм*).

В диапазоне 20—300 *гц* градуировка (отмечено перечеркнутыми кружками) производилась методом пьезоэлектрической компенсации в стальном баке (диаметр 150 *мм*, длина 200 *мм*) с водой, куда помещался и компенсационный преобразователь $\left(M = 157{,}5\ \frac{н/м^2}{в}\right)$, изготовленный в виде отдельного узла (см. фиг. 1). В диапазоне частот 20 *гц*—5 *кгц* градуировка производилась методом пьезоэлектрической компенсации в камере с обращенным компенсационным преобразователем (диаметр 78 *мм*, длина 105 *мм*, $M = 185{,}7\ \frac{н/м^2}{в}$).

Несмотря на то, что эти две установки существенно различаются между собой по конструкции камер, компенсационными преобразователями, а также по элемен-

там измерительной части (и в этом смысле могут считаться независимыми), результаты градуировки гидрофона на обоих установках практически совпали (в пределах 3%).

Хорошая согласованность свидетельствует о правильности измерений чувствительности методом пьезоэлектрической компенсации.

На верхнем конце частотного диапазона результаты градуировки методом пьезоэлектрической компенсации согласуются (в пределах 0,5 *дб*) с результатами градуировки ненаправленного гидрофона независимым методом взаимности в свободном поле.

Градуировка ненаправленных гидрофонов с размерами менее 10 *мм* методом пьезоэлектрической компенсации была проведена на частотах до 23 *кгц*. На некоторых участках частотного диапазона выше 5 *кгц* измерения осложнялись механическими конструктивными резонансами системы измерительной камеры, которым соответствуют характерные искажения на частотной характеристике градуируемого гидрофона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фош М. П. Подводная акустика (перев. с англ.). М., Изд-во «Мир», 1965.
2. Клюкин И. И., Колесников А. Е. Акустические измерения в судостроении. Л., Изд-во «Судостроение», 1966.
3. Trott J. W., Lide E. N. JASA, 1955, v. 27, № 5.
4. Голенков А. Н. Измерительная техника, 1961, № 9.
5. Sims C., Bobber R. J. JASA, 1959, v. 31, № 10.
6. Харкевич А. А. Теория преобразователей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
7. Скучик Е. Основы акустики. М., ИИЛ, 1958.
8. Голенков А. Н. Измерительная техника, 1965, № 5.

Поступила 28.I.1967 г.