

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Особенности градуировки векторных акустических приемников в неоднородном поле вертикально колеблющегося столба жидкостиВ. А. Гордиенко^а, Б. И. Гончаренко^б, С. С. Задорожный, М. В. Старкова*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^а glery@bk.ru, ^б gon-boris@yandex.ru*

Статья поступила 28.07.2011, подписана в печать 31.10.2011

Обсуждаются особенности градуировки векторных приемников конечных размеров в поле плоской стоячей волны и возможность учета частотно-зависимой погрешности, возникающей при этом, позволяющей расширить частотный диапазон существующих установок в область более высоких частот без потери точности градуировки звукоприемников.

Ключевые слова: векторно-фазовые методы, градуировка гидроакустических приемников в малых измерительных объемах, приемники градиента акустического давления, градуировка приемников градиента давления.

УДК: 620.1.08, 534.6. PACS: 06.20.Dk, 43.58.Vb, 43.30.Xm.

Введение

Начиная с 1970-х гг. внедрение в практику акустических измерений векторных приемников и комбинированных приемных систем (КПС) на их основе [1] потребовало решения проблемы градуировки таких звукоприемников.

Методы градуировки приемников акустического давления (ПД) в настоящее время можно считать достаточно развитыми. Основные из них, используемые в гидроакустике, достаточно подробно описаны в литературе (см., например, [2, 3]). Однако отсутствие образцовых приемников градиента звукового давления (ПГД), двух- или трехкомпонентные варианты которых часто называют векторными приемниками (ВП), не позволяет в настоящее время формально распространить известные методы градуировки ПД на ПГД. Некоторые из них не годятся принципиально, большинство же требует усовершенствования применительно к измерениям колебательной скорости (КС) частиц среды в волне или градиента звукового давления (ГД). В связи с этим градуировка и определение основных характеристик ПГД чаще всего осуществляются путем использования образцового ПД и нахождения теоретической связи между компонентами поля в условиях проведения экспериментальных работ по градуировке.

На первых порах, когда основными решаемыми задачами были создание качественных ВП и обнаружение и локализация с помощью них относительно мощных источников акустических сигналов, считалась вполне приемлемой градуировка каналов ВП с погрешностью до 4 дБ, устанавливаемая в нашей стране, например, МИ 1620-87 «Государственная поверочная схема для средств измерений звукового давления в водной среде в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^2$ кГц», согласно пп. 3.1 и 3.2 которой при использовании в качестве рабочих средств измерений приемников градиента звукового давления доверительные относительные погрешности для рабочих средств измерений при доверительной вероятности 0.95 составляют от 1 до 4 дБ.

Наметившаяся в последнее время как в России, так и за рубежом тенденция увеличения интереса к малогабаритным гидроакустическим системам, включающим одновременно приемник акустического давления (ненаправленный гидрофон) и двух- и трехкомпонентный ВП, связана с тем, что известные методы и алгоритмы, основанные на использовании информации, регистрируемой только приемниками давления, достигли своих предельных возможностей в плане регистрации сигналов локальных источников с соотношениями сигнал/шум на входе, существенно меньшими единицы [1, 4, 5]. Параллельно практические нужды дальнейшего использования таких приемных систем для обнаружения, пеленгования и определения уровней шумоизлучения удаленных источников слабых низкочастотных сигналов в водной среде привели к необходимости пересмотра значений погрешностей градуировки.

При этом всегда необходимо иметь в виду, что требуемые при градуировке каналов ВП точностные характеристики в значительной мере определяются алгоритмами обработки данных и поэтому могут сильно различаться в зависимости от типа решаемой задачи. Так, например, при использовании в качестве ПГД двух разнесенных в пространстве гидрофонов точность задания амплитудно-фазовых характеристик сквозного тракта наиболее высока и не может быть хуже 0.1 дБ по амплитуде и 0.3° по фазе [1, 6]. При использовании ВП для определения потоков акустической мощности и работе в поле шумов океана эту точность можно ограничить значениями $3-5^\circ$ и $0.5-0.7$ дБ. В то же время для подавления источника сосредоточенной помехи с помощью кардиоиды требуется разброс характеристик трактов ПД и ПГД не более 1° и 0.5 дБ [1, 6]. Проблема градуировки ВП осложняется еще и тем, что, как правило, для того, чтобы обеспечить малые пороговые уровни регистрируемых сигналов, размеры ВП существенно превышают размеры ПД, работающих в том же частотном диапазоне.

Частично проблему можно решить, используя те или иные алгоритмы настройки комбинированного прием-

ного модуля (КПМ) [1]. Однако во многих случаях желательно иметь результаты градуировки каналов ВП с необходимой (заданной) точностью по возможности в широком частотном диапазоне.

В настоящей статье описывается установка для градуировки звукоприемников конечных размеров и методика обработки результатов измерений выходных сигналов, позволяющая сохранить относительно высокую точность градуировки в широком частотном диапазоне.

1. Установка для градуировки ВП в вертикально колеблющемся столбе жидкости абсолютным методом

Начиная с 1970-х гг. на кафедре акустики физического факультета МГУ активно велись исследования по разработке методов градуировки ВП. Основные из них подробно проанализированы в монографии [1] и работах [7–9]. Как показали эти исследования, наиболее эффективной с точки зрения обеспечения достаточно высокой точности является градуировка ВП в поле плоских свободных акустических волн. В области низких частот, когда трудно создать необходимые условия свободного поля, удобно использовать камеру малого объема — круглую трубу [2, 10]. В такой трубе с жесткими стенками при условии, что внутренний радиус трубы $R = d/2$ отвечает неравенству $R < 0.61\lambda$, могут существовать бегущие плоские волны, которые распространяются с фазовой скоростью c , не зависящей от частоты ω (или длины волны λ).

В работах [10, 11] показано, что наиболее точным и перспективным методом градуировки ПГД следует считать градуировку в *вертикальном* столбе колеблющейся жидкости. В этой же работе описана разработанная нами нестандартизованная установка УВГ-1 для градуировки звукоприемников с неисключенной систематическая погрешностью 13–15% (1.2–1.5 дБ) при доверительной вероятности 0.95.

Более детальный анализ погрешностей показал, что основная погрешность градуировки определялась фактически погрешностью градуировки образцового гидрофона первого разряда, с использованием которого производилась метрологическая аттестация установки (в реализованном варианте установки — 12%, или 1 дБ) [11]. На долю остальных погрешностей (погрешность измерений электрических напряжений на выходе измерительного тракта; погрешности, связанные с измерением частоты, с присутствием помехи, с неточностью определения вертикальной координаты звукоприемника и пр.) приходится менее 0.4 дБ. Это означает, что при использовании образцового гидрофона с меньшей погрешностью на установке УВГ-1 в принципе можно обеспечить и существенно меньшую погрешность градуировки, которая в рамках оценок, проведенных в работе [11], для ВП может не превышать 0.5 дБ в диапазоне частот 2–500 Гц.

Важно, что в такой вертикальной трубе можно пренебречь неравномерностью распределения звукового давления вдоль радиуса и по углу в горизонтальной плоскости цилиндрической камеры и рассматривать одномерную задачу волнового распределения по ее высоте. В разработанном варианте установки, когда мы имеем трубу, на одном конце которой расположен

излучатель (поршень), а другой конец открыт, на границе раздела вода–воздух импеданс примерно равен нулю и будет происходить, по существу, полное отражение. Поэтому в трубе устанавливается стоячая волна с распределением звукового давления $P(z)$ с узлом на поверхности (при $z = 0$)

$$P(z) = P_0 \sin(kz),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. При записи этой формулы, как и двух следующих, временной множитель $\exp(j\omega t)$ для удобства опущен. Градиент давления $\partial P/\partial z$ (как, впрочем, и колебательная скорость частиц среды в волне \mathbf{V}), наоборот, имеет пучность на поверхности (рис. 1):

$$\frac{\partial P(z)}{\partial z} \equiv P_G(z) = P_0 \left(\frac{\omega}{c}\right) \cos(kz),$$

$$V(z) = P_0 \left(\frac{1}{\rho c}\right) \sin(kz).$$

Разработка установки явилась попыткой создания средства измерений, отвечающего современным требованиям как к точностным характеристикам градуировки ПГД, так и к форме представления результатов. При этом непосредственно учитывался опыт создания установок, предназначенных для осуществления родственных методов градуировки (см., например, [12–14]).

Основанием камеры 1, представляющей отрезок жесткой трубы (рис. 1), является жесткий поршень 2, возбуждение которого осуществляется с помощью электродинамического вибровозбудителя 3, установленного на массивной платформе. Внутренний диаметр камеры 1 равен 0.4 м, внешний 0.8 м, высота 0.65 м.

Для закрепления градуируемого звукоприемника 4, помещаемого на глубину d , и перемещения его в вертикальном и горизонтальном направлениях служит координатное устройство 6. На глубине d_0 (для низких частот примерно 0.15 м от дна) с помощью упругих растяжек закреплен гидрофон обратной связи (ОС) 5.

Сигналы с градуируемого звукоприемника и гидрофона обратной связи после усиления и фильтрации с помощью узкополосных фильтров регистрируются вольтметром и самописцем, поступаая одновременно на вход АЦП компьютера для дальнейшей обработки. Сигнал с гидрофона с помощью специальной подпрограммы управляет амплитудой выходного сигнала генератора, который подводится к вибровозбудителю через усилитель мощности. Это позволяет в случае необходимости автоматически поддерживать на этой глубине для любой частоты рабочего диапазона строго постоянное значение амплитуды звукового давления P_0 .

Таким образом, одновременная регистрация сигналов, поступающих с градуируемого звукоприемника и с гидрофона ОС, позволяет, во-первых, с хорошей точностью контролировать (и, если это необходимо, поддерживать постоянными) значения звукового давления P на глубине d_0 , а во-вторых — определять фазовые характеристики каналов градуируемого звукоприемника.

Отметим, что данный метод градуировки ВП является абсолютным в том смысле, что определение амплитуды градиента звукового давления, колебательной скорости, колебательного ускорения и других необходи-

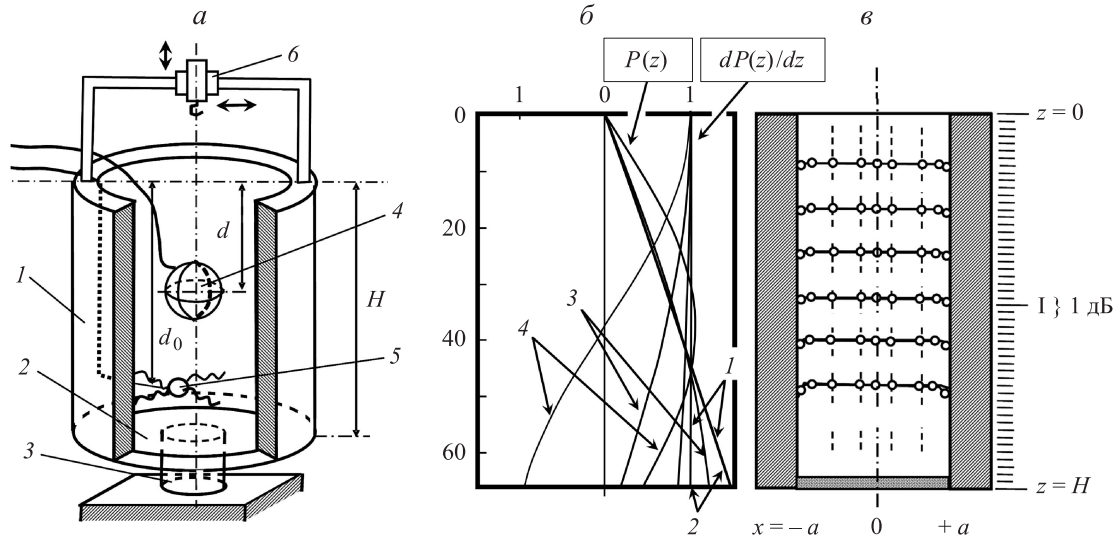


Рис. 1. Установка УВГ-1: а — общая схема измерительной камеры; б — характерные вертикальные разрезы поля давления $P(z)$, приведенные к глубине гидрофона ОС и градиента звукового давления $dP(z)/dz$, нормированные на уровень вблизи поверхности, в установке на частотах: 1 — 2 Гц, 2 — 200 Гц, 3 — 500 Гц, 4 — 4000 Гц; в — экспериментально измеренная неоднородность поля давления в горизонтальной плоскости рабочего объема на разной высоте на частоте 250 Гц

мых акустических величин осуществляется теоретически путем пересчета из измеряемой другой физической величины с использованием известных, конкретных для данной установки констант, таких как плотность среды в рабочем объеме и скорость звука в ней.

Корректировка результатов градуировки ВП осуществляется автоматически при обработке результатов на ЭВМ, включенной в состав установки. Фазовые характеристики градуируемых звукоприемников определяются как разность фаз сигналов со звукоприемника и с гидрофона обратной связи в предположении, что гидрофон ОС регистрирует истинную фазу волны в рабочем объеме.

Зная чувствительность G_P гидрофона обратной связи, глубину его погружения d_0 и глубину погружения d градуируемого звукоприемника и измеряя напряжение на выходе приемника давления U_P и приемника градиента давления U_G , можно определить чувствительность последнего в следующих единицах:

— эквивалентного звукового давления P_e плоской бегущей волны:

$$G_{PG} = \frac{U_G}{P_e} = \frac{U_G}{P_0} \frac{\sin kd_0}{\cos kd} = G_P \frac{U_G}{U_P} \frac{\sin kd_0}{\cos kd}; \quad (1)$$

— колебательной скорости V частиц среды в волне:

$$G_{PG} = \frac{U_G}{V} = G_P \frac{U_G}{U_P} \frac{\sin kd_0}{\cos kd} \cdot \rho c. \quad (2)$$

Для определения коэффициента деления, а также значения перепада чувствительности «фронт-тыл» производится измерение относительного коэффициента преобразования градуируемого звукоприемника G при его вращении относительно остальных осей ориентированных в перпендикулярной плоскости.

Для построения диаграммы направленности проводятся измерения аналогично описанным выше при вращении градуируемого звукоприемника с шагом по углу поворота не более 15° .

2. Основные систематические ошибки градуировки и их оценка

На самом деле полученные выше значения чувствительности не являются точными. Помимо погрешностей, связанных с погрешностями градуировки образцового гидрофона, измерений электрических напряжений на выходе измерительного тракта и пр., существует несколько систематических погрешностей, обусловленных спецификой используемого метода.

Так, на низких частотах на гидрофон действует дополнительное акустическое давление, обусловленное колебанием гидростатического давления. Поэтому истинное значение давления на глубине d будет определяться выражением

$$P(d) = P_0 \frac{\sin kd}{\sin kd_0} \frac{1}{\left(1 - \frac{g}{\omega^2 d_0}\right)}.$$

Здесь g — ускорение свободного падения. Таким образом, при градуировке ВП следует вводить поправочный множитель

$$K_G = \left(1 - \frac{g}{\omega^2 d_0}\right). \quad (3)$$

В результате, например, выражение (2) для чувствительности вертикального канала ВП, выраженной в единицах колебательной скорости, следует переписать в виде

$$G_{PG} = \frac{U_G}{V} = G_P \frac{U_G}{U_P} \frac{\sin kd_0}{\cos kd} \cdot \rho c \cdot K_G = G_P \frac{U_G}{U_P} \frac{\sin kd_0}{\cos kd} \cdot \rho c \cdot \left(1 - \frac{g}{\omega^2 d_0}\right).$$

Если градуируется гидрофон, то множитель (3) необходимо учесть дважды для градуируемого и гидрофона обратной связи:

$$K_P = \left(1 - \frac{g}{\omega^2 d}\right) \left(1 - \frac{g}{\omega^2 d_0}\right).$$

Более существенная погрешность связана с конечностью размеров градуируемого звукоприемника. Стоячая волна предполагает неоднородность поля по вертикали, тем большую, чем выше частота. При, как правило, достаточно больших размерах низкочастотных ВП это приводит к несовпадению геометрического и акустического центров звукоприемника и, следовательно, к возникновению дополнительной погрешности градуировки, связанной с конечностью его размеров. Стремление расширить рабочий диапазон градуировки в сторону высоких частот весьма существенно сказывается на точности градуировки ВП.

Раскладывая поле в области расположения звукоприемника в ряд Тейлора по координате, для которой оценивается погрешность, можно показать, что данная погрешность будет определяться членами, содержащими вторую производную измеряемой звукоприемником характеристики поля. Если при метрологической аттестации установки исследуется поле давления (что, в частности, имело место в случае установки УВГ-1), то удобно пользоваться формулами для оценок погрешностей этого типа θ_{MP} (для ПД) и θ_{MG} (для ВП) на основании именно данных о поле давления в рабочем объеме [11]:

— для приемника давления

$$\theta_{MP} = \left| \frac{(U_2 - U_1) - (U_n - U_{n-1})}{U_0 \Delta r \cdot (n - 2)} \right| \cdot \frac{R_{\max}}{6};$$

— для векторного приемника

$$\theta_{MG} = \left| \frac{(U_3 - 2U_2 + U_1) - (U_n - 2U_{n-1} + U_{n-2})}{U_0 \Delta r^3 \cdot (n - 3)} \right| \cdot \frac{R_{\max}}{3\pi}.$$

При выводе данных формул делалось предположение, что градуируемые звукоприемники имеют сферическую форму с максимальным радиусом R_{\max} . Здесь U_i — напряжение на выходе перемещаемого измерительного гидрофона в i -й точке по координате Z , U_0 — напряжение на выходе перемещаемого измерительного приемника в среднем положении, Δr — шаг перемещения вдоль выбранной координаты. Количество точек измерений n должно быть выбрано таким, чтобы общий интервал из n точек перекрывал максимальный размер R_{\max} активного элемента градуируемых на установке звукоприемников. Расчет данной погрешности с использованием экспериментальных данных по распределению поля в рабочем объеме установки УВГ-1 вплоть до частоты 500 Гц дает следующие величины:

— для приемника давления погрешность составляет порядка 1.5%,

— для векторного приемника — 0.5 % вплоть до диаметров ВП порядка 230 мм.

Это означает, что, зная уровень звукового давления на некоторой фиксированной глубине d_0 (измеренный, например, ПД, отградуированным с заданной достаточно высокой точностью) и глубину погружения градуируемого ВП, формально можно определить его чувствительность с достаточно высокой точностью.

Эта величина оказывается одного порядка с другими погрешностями и поэтому слабо сказывается на общей погрешности установки, учитывая суммарную погрешность первичной метрологической аттестации установки, указанную в работе [11].

Однако уже в области частот порядка килогерца и выше систематическая погрешность начинает быстро расти. Соответственно точность градуировки падает.

3. Расширение частотного диапазона градуировки за счет учета систематической погрешности

Оказывается, что с учетом характера кривых распределения давления при определенных условиях можно проводить более точную градуировку звукоприемников конечных размеров и при наличии неравномерности звукового поля по вертикали, т. е. расширить частотный диапазон измерений в измерительной камере в сторону высоких частот.

Расчет поправки несколько упрощается тем обстоятельством, что чувствительные элементы обоих звукоприемников (гидрофона и градуируемого ВП) обладают интегрирующими свойствами, т. е. способностью усреднять неравномерность давления и его градиента по поверхности, и, следовательно, измеряют усредненные их значения, а само акустическое поле в измерительном объеме представляет собой стоячую волну.

Очевидно также, что при описанном способе возбуждения акустической стоячей волны отклонения акустического давления от его среднего значения в горизонтальной плоскости в значительной степени компенсируются за счет усреднения. Поэтому за отклонения регистрируемого звукоприемником уровня сигнала от истинного отвечает преимущественно неоднородность поля вдоль вертикальной оси.

Достаточно очевидно, что суммарная сила давления, воздействующая на поверхность S сферического ПД радиуса a , геометрический центр которого находится на расстоянии z_0 от поверхности воды в цилиндрическом баке (рис. 2), определяется следующим выражением:

$$P = \oint_S P(z) dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\vartheta a^2 \sin \vartheta P(z).$$

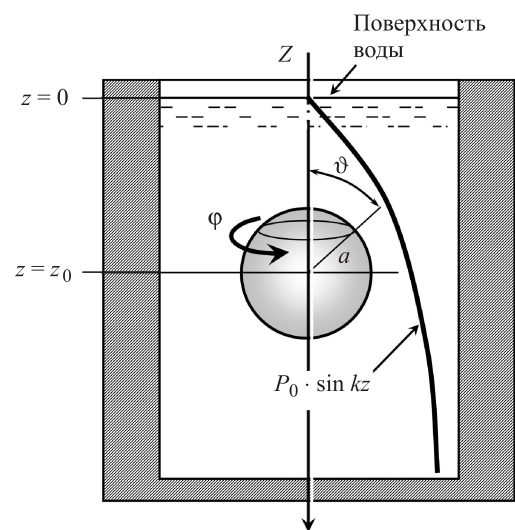


Рис. 2. К расчету уровня давления и его градиента в стоячей волне, действующего на корпус звукоприемника конечного размера

Аналогично для приемника, регистрирующего градиент давления в проекции на вертикальную ось Z , суммарная сила воздействия будет определяться следующим интегралом по поверхности S звукоприемника:

$$P_G(z) = \oint_S P(z) \cos \vartheta dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi d\vartheta a^2 \sin \vartheta \cos \vartheta P(z).$$

Оба интеграла относительно легко вычисляются и сводятся к выражениям

$$P = 2\pi a^2 P_0 \int_0^\pi \sin \vartheta \sin k(z_0 - a \cos \vartheta) d\vartheta = 4\pi a^2 P_0 \sin kz_0 \frac{\sin ka}{ka},$$

$$P_G(z) = 2\pi a^2 P_0 \int_0^\pi \sin k(z_0 - a \cos \vartheta) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \frac{4\pi a^2 P_0 \cos kz_0}{ka} \left(\cos ka - \frac{\sin ka}{ka} \right).$$

Нетрудно также показать, что для приемников малых волновых размеров ($ka \ll 1$) эти значения должны составлять

$$P_{P0} = 4\pi a^2 P_0 \sin kz_0, \\ P_{G0} = 4\pi a^2 P_0 \cdot k \cdot \frac{a}{3}.$$

Таким образом, истинные значения параметров акустического поля будут отличаться от измеренных сферическим звукоприемником радиуса a на величину

$$\Delta_P = \frac{\sin ka}{ka}, \quad \Delta_G = \frac{3}{(ka)^2} \left(\cos ka - \frac{\sin ka}{ka} \right).$$

Эти величины представляют собой частотно-зависимые поправки, которые и надо учитывать при определении чувствительности звукоприемника. Значения поправок для ПД (Δ_P) и ПГД (Δ_G) в децибелах приведены на рис. 3 и 4 для наиболее характерных размеров звукоприемников, используемых в реальных экспериментах. Из рисунка видно, что частотно зависимые поправки существенны преимущественно в области высоких частот для приемников относительно больших размеров, которые характерны для ВП. Так, для низкочастотных ПД, размеры которых обычно составляют порядка 5 см в диаметре, поправкой можно пренебречь вплоть до частот 3–4 кГц. Что касается ВП, то их размеры при достаточно низких пороговых уровнях, необходимых для работы в области частот до 1.5–2.0 кГц, обычно лежат в пределах значений $a = 8–12.5$ см. Поэтому для таких звукоприемников поправки могут быть существенными уже начиная с частот 1 кГц и выше. Для использовавшегося нами в работах по изучению высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии [15] трехкомпонентного ВП диаметром 5 см (диапазон рабочих частот до 12.5 кГц) эта поправка составляет 1 дБ на частоте 5 кГц, 4 дБ на частоте 10 кГц и 7 дБ на верхней частоте рабочего диапазона 12.5 кГц.

Аналогично может быть рассчитана поправка для канала ПГД цилиндрического типа размером $2L$

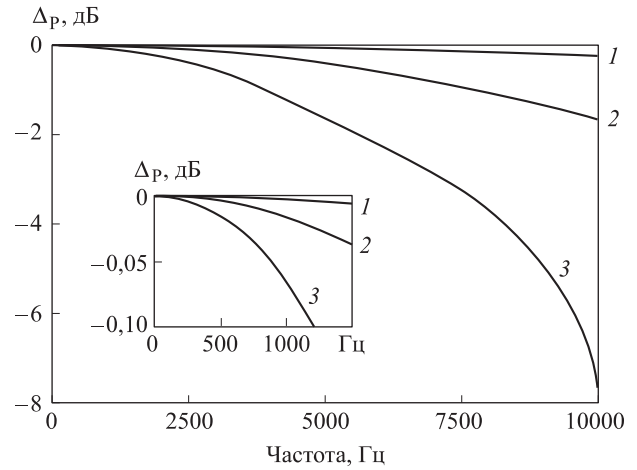


Рис. 3. Отличие Δ_P истинных значений акустического давления от измеренных сферическим звукоприемником радиуса a : 1 — 1 см; 2 — 2.5 см; 3 — 5 см (на врезке — та же поправка Δ_P в низкочастотной области)

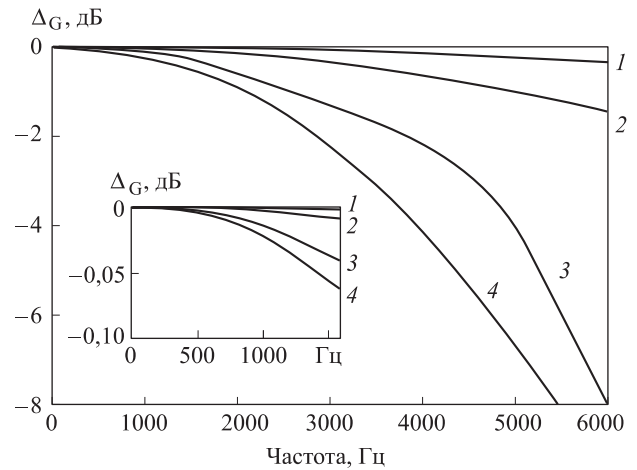


Рис. 4. Отличие Δ_G истинных значений градиента акустического давления от измеренных сферическим ПГД радиуса a : 1 — 2.5 см; 2 — 5 см; 3 — 10 см; 4 — 12.5 см (на врезке — та же поправка Δ_G в низкочастотной области)

(высота цилиндра) или ПГД на базе двух, разнесенных на расстояние $2L$ ПД. Эта поправка составляет

$$\Delta_G = \frac{\sin kL}{kL}.$$

При градуировке сферического приемника давления радиуса a_P и радиусе гидрофона ОС a_0 суммарная поправка, которую необходимо ввести, будет определяться выражением

$$\Delta_P = \frac{\sin ka_P}{ka_P} \frac{ka_0}{\sin ka_0}.$$

При градуировке сферического ПГД радиуса a_G эта поправка записывается в виде

$$\Delta_G = \frac{3}{(ka_G)^2} \left(\cos ka_G - \frac{\sin ka_G}{ka_G} \right) \frac{ka_0}{\sin(ka_0)}.$$

Заключение

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что с учетом полученных значений поправок, оказывается возможным существенное расширение частотного диапазона градуировки звукоприемников в область высоких частот. Безусловно, конкретное значение верхней частоты, до которой можно градуировать звукоприемники без потери точности, определяется конструктивными особенностями установки, и принципиальной возможностью возбуждения на ней высоких частот.

Для установки УВГ-1 сложность экспериментов заключалась в том, что поправки, по крайней мере в области не очень высоких частот, соизмеримы с погрешностью градуировки гидрофона ОС. Поэтому мы использовали в качестве звукоприемника ОС несколько гидрофонов ОС различного диаметра, а также акселерометр фирмы «Брюль и Кьер» нейтральной плавучести.

В результате удалось показать, что в конкретной установке УВГ-1 возможно расширить частотный диапазон без потери точности градуировки до 3.5 кГц вместо ранее заявленной частоты 500 Гц. Дальнейшему расширению частотного диапазона препятствовали возникающие механические резонансы конструкции установки. Однако ограниченная мощность используемого вибратора реально позволила реализовать диапазон только до 1.5 кГц.

Отметим также, что описанный выше учет поправок применительно к методу градуировки звукоприемников различных размеров в поле стоячих волн открывает резерв повышения точности градуировки звукоприемников, особенно в тех случаях, когда при градуировке

в качестве образцового и градуируемого используются звукоприемники разных размеров.

Список литературы

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М., 2007.
2. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М., 1974.
3. Колесников А.Е. Акустические измерения. Л., 1983.
4. Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. № 6. С. 93.
5. Clark J., Tarasek G. // Oceans'06. MTS IEEE. Revolutionize Marine Science Technology. Sept. 18–21, 2006. Hynes Convention Center. Boston, Massachusetts.
6. Pascal J.L. // Rev. Pratique de Controle on Dustriel. 1982. 21, N 115. P. 3840.
7. Гончаренко Б.И., Захаров Л.Н., Романюк Б.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1976. 17, № 5. С. 529.
8. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1980. 21, № 5. С. 83.
9. Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 1. С. 40.
10. Strasberg M., Schloss F. // JASA. 1973. 54. P. 533.
11. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Дрындин А.В., Лихачев С.М. // Акуст. журн. 1994. 40, № 2. С. 243.
12. Bauer V.B. // JASA. 1966. 39. P. 585.
13. Bauer V.B., Abbagnaro L.A., Schumann J. // JASA. 1972. 51. P. 1717.
14. Ермилов Б.И., Михайлов В.В., Окиншевич И.Н., Сайков Ю.М. // Метрологические проблемы гидрофизических и гидроакустических измерений. М.: НПО ВНИИФТРИ, 1990. С. 55.
15. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Маранулец Ю.В., Щербина А.О. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 4. С. 94.

Graduation features vector acoustic receivers in a nonuniform field of vertical oscillating liquid column

V. A. Gordienko^a, B. I. Goncharenko^b, S. S. Zadorozhniy, M. V. Starkova

Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aglery@bk.ru, ^bgon-boris@yandex.ru.

The features of the calibration of the vector receivers finite dimensions in the field of a plane standing wave and the possibility of accounting for frequency-dependent of the error occurring at the same time, allowing to extend the frequency range of existing facilities in the region of higher frequencies without loss of precision calibration.

Key words: vector-phase methods, the graduation of sonar-receivers in the small measuring volume, the receivers of the acoustic pressure gradient, calibration of the pressure gradient receivers.

PACS: 06.20.Dk, 43.58.Vb, 43.30.Xm.

Received 28 July 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2012).

Сведения об авторах

1. Гордиенко Валерий Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-69; e-mail: vgord@list.ru.
2. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-69; e-mail: gon-boris@yandex.ru.
3. Задорожный Сергей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; e-mail: zss@mail.ru.
4. Старкова Марина Валерьевна — канд. физ.-мат. наук, глав. специалист; e-mail: mstarkova@mail.ru.