АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2012, том 58, № 5, с. 623–627

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 620.1.08:534.6

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ГРАДУИРОВКИ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАМЕР В СТОРОНУ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

© 2012 г. В. А. Гордиенко, Б. И. Гончаренко, С. С. Задорожный, М. В. Старкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет 119991 Москва, Ленинские горы

E-mail: glery@bk.ru, gon-boris@yandex.ru, zss@mail.ru, mstarkova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.07.2011 г.

Обсуждается частотно-зависимая погрешность градуировки звукоприемников в поле стоячей волны и показана принципиальная возможность расширения в сторону высоких частот рабочего диапазона градуировки гидрофонов и векторных приемников (приемников градиента звукового давления) конечных размеров в вертикальном столбе жидкости, колеблющейся в цилиндрической камере малого объема.

Ключевые слова: векторно-фазовые методы, градуировка гидроакустических приемников, приемник градиента акустического давления, градуировка приемников градиента давления.

Как известно, для обеспечения нормальной работы любой акустический измерительный тракт должен быть отградуирован, т.е. подвергнут такой измерительной процедуре, в результате которой получаются количественные значения определенных параметров тракта, позволяющие определить измеряемую величину в абсолютных единицах.

В настоящее время методы градуировки приемников акустического давления (ПД) можно считать достаточно развитыми (см., напр., [1, 2]).

Сложнее обстоит дело с градуировкой приемников градиента акустического давления (ПГД), или векторных приемников (ВП), как часто называют двух- или трехкомпонентные варианты приемников такого типа. Во-первых, существуют проблемы создания образцовых ВП (в действующей сегодня терминологии – рабочего эталона). Так, для обработки сигналов, особенно при использовании алгоритмов, использующих значения проекций вектора потока акустической мощности [2], требуется знание проекций колебательной скорости (КС), выраженных в эквивалентных единицах звукового давления плоской звуковой волны, т.е. в В/(Па$\sqrt{\text{Гц}}$), в то время как основная масса существующих конструкций ВП, как правило, регистрирует проекции градиента звукового давления. Поэтому чувствительность каналов ВП существенным образом зависит от акустического импеданса среды, причем эти изменения различны, в зависимости от формы и конструкции самого приемника [2]. Во-вторых, для обеспечения малых пороговых уровней при регистрации слабых сигналов на низких частотах, ВП имеют в несколько раз бóльшие размеры, чем приемники акустического давления. Серьезные попытки решения этой проблемы предприняты в Государственном метрологическом центре гидроакустических измерений (ГМЦГИ) ФГУП ВНИИФТРИ, где уже создана установка для передачи единицы колебательной скорости в водной среде в диапазоне частот от 5 до 1000 Гц, однако считать эту проблему окончательно решенной пока преждевременно.

В связи с этим, формальное распространение известных методов градуировки ПД на ПГД в общем случае не всегда годится. Некоторые из них не годятся принципиально, большинство же требует усовершенствования применительно к измерениям КС частиц среды в волне или градиента звукового давления (ГД). В связи с этим, градуировка и определение основных характеристик ПГД (или ВП) чаще всего осуществляется путем использования образцового ПД и нахождения теоретической связи между компонентами поля в условиях проведения экспериментальных работ по градуировке [2].

Основные методы градуировки ПГД были подробно описаны нами ранее [2]. 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, чаще всего используют камеру малого объема – круглую трубу [2, 3]. Хорошо известно, что в жесткой круглой трубе, внутренний радиус которой $R = d/2$ отвеча-

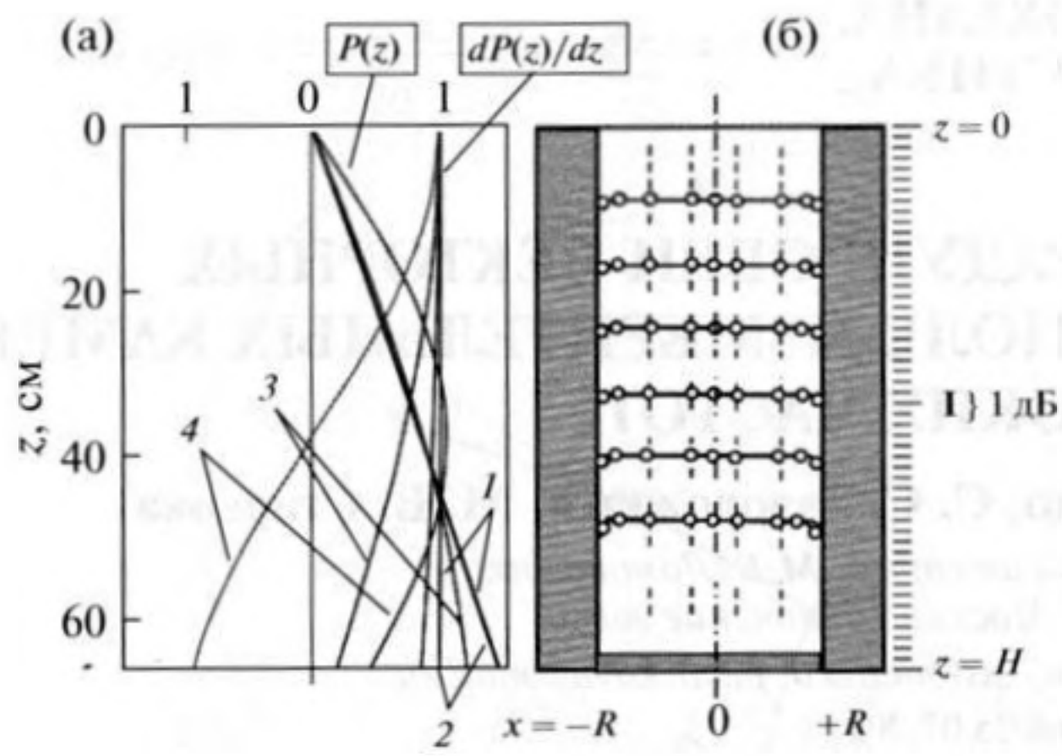

Рис. 1. (а) Характерные вертикальные разрезы поля давления $P(z)$, приведенные к глубине d_0 размещения гидрофона, и градиента звукового давления $dP(z)/dz$, нормированные на уровень вблизи поверхности, в установке УВГ-1 на частотах: *1* – 2 Гц, *2* – 200 Гц, *3* – 500 Гц, *4* – 1000 Гц; (б) Пример характерной экспериментально измеренной неоднородности поля давления в горизонтальной плоскости рабочего объема на разной высоте (измерения проводились в диапазоне частот 5–500 Гц).

ет неравенству $R < 0.61\lambda$, могут существовать бегущие плоские волны [4].

В работе [5] показано, что наиболее точным и перспективным методом градуировки ПГД следует считать градуировку в вертикальном столбе колеблющейся жидкости. В этой же работе описана разработанная на кафедре акустики МГУ им. М.В. Ломоносова установка (УВГ-1) для градуировки звукоприемников в частотной области 2–500 Гц.

В такой вертикальной трубе с жесткими стенками можно пренебречь распределением звукового давления вдоль радиуса и рассматривать одномерную задачу волнового распределения по ее длине. Если вода в трубе имеет свободную поверхность, а волны возбуждаются поршнем, расположенным внизу, в ней устанавливается стоячая волна с узлом на поверхности (при $z = 0$) и распределением амплитуды звукового давления $P(z)$ на глубине z, определяемой выражением (рис. 1):

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

где P_0 – значение амплитуды звукового давления в пучности стоячей волны, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Для низких частот точка, для которой $P(z) = P_0$, чаще всего находится вне объема измерительной камеры.

Амплитуда градиента давления (как, впрочем, и колебательной скорости частиц среды в волне), наоборот, имеет пучность на поверхности:

$$\frac{dP(z)}{dz} = P_G(z) = P_0\, k \cos kz.$$

Таким образом, 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 достаточно точно определить величину его чувствительности.

Отметим, например, что в работе [5] указывается величина неисключенной систематической погрешности при доверительной вероятности 0.95 – 13–15% (1.2–1.5 дБ). При этом анализ погрешностей показывает, 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) [5]. 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 меньшую погрешность градуировки в диапазоне частот 2–500 Гц.

Стремление расширить рабочий диапазон градуировки в сторону высоких частот весьма сильно сказывается на точности градуировки ВП. Одна из основных причин заключается в том, что поле стоячей волны является существенно неоднородным в вертикальном направлении, что приводит к несовпадению геометрического и фазового центров звукоприемника, и как следствие – к появлению систематической погрешности определения его чувствительности. Тем не менее, оказывается, что с учетом характера кривых распределения по вертикали поля давления в стоячей волне, при определенных условиях можно рассчитать величину этой неисключенной систематической погрешности и соответственно уменьшить погрешность на высших частотах диапазона градуировки, расширив тем самым частотный диапазон градуировки звукоприемников конечных размеров в область высоких частот.

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.

Тогда суммарная сила давления $P_P(z)$ (объемного сжатия), воздействующая на поверхность S сферического ПД радиуса a, геометрический центр которого находится на расстоянии z_0 от по-

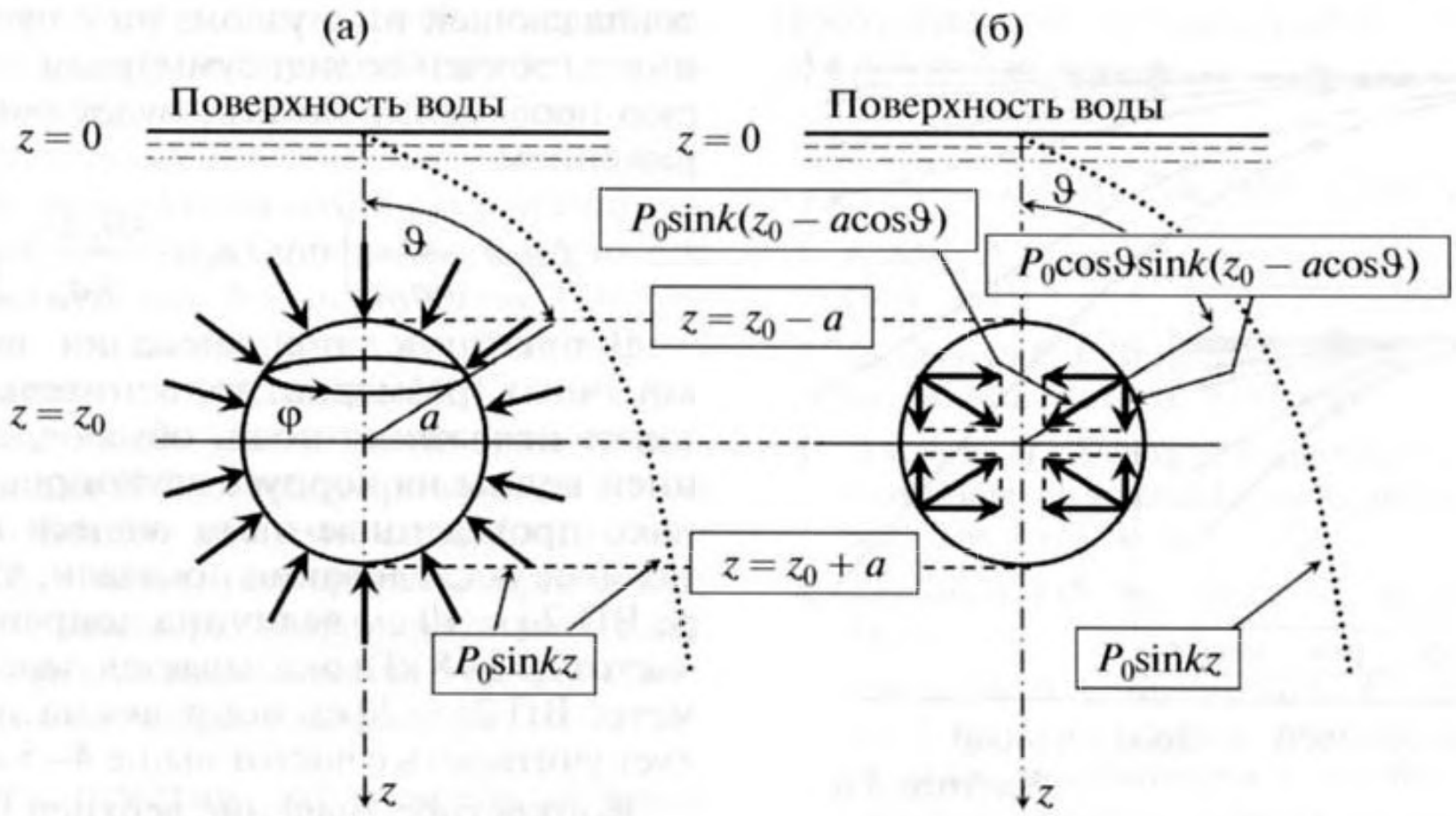

Рис. 2. К расчету силы акустического давления (а) и его градиента (б) в стоячей волне, действующих на сферический звукоприемник конечного размера.

верхности воды в цилиндрическом баке (рис. 2) определяется следующим выражением:

$$P_P(z) = \oint_S P(z)\, dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\vartheta\, a^2 \sin\vartheta\, P(z). \quad (1)$$

Аналогично, для приемника радиуса a, регистрирующего градиент акустического давления, в проекции на вертикальную ось Z, суммарное воздействие будет определяться следующим интегралом по поверхности S звукоприемника:

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

Сила $P_P(z)$ в (1) с точностью до множителя пропорциональна акустическому давлению в геометрическом центре приемника $P(z)$: $P_P(z) = K_P P(z)$. Аналогично, с точностью до множителя, сила $P_G(z)$ в (2) пропорциональна градиенту акустического давления $\frac{dP(z)}{dz}$, т.е. $P_G(z) = K_G \frac{dP(z)}{dz}$. Нетрудно убедиться, что в случае плоской бегущей волны оба множителя – K_P и K_G – являются константами. Если поле по каким-либо причинам пространственно неоднородно, то множители будут зависеть от характера этой неоднородности.

Если звукоприемник размещен в поле стоячей волны, то оба интеграла относительно легко берутся и сводятся к выражениям:

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

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

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

$$P_{P0} = 4\pi a^2 P_0 \sin kz_0 \quad (K_P = 4\pi a^2),$$

$$P_{G0} = 4\pi a^2 P_0 \cos kz_0 k\frac{a}{3} \quad \left(K_G = 4\pi a^2 k \cdot \frac{a}{3}\right).$$

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

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

Эти величины представляют собой частотно зависимые поправки, которые и надо учитывать при определении чувствительности звукоприемника при расширении рабочего диапазона в сторону высоких частот.

Значения поправок для ПД (Δ_P) и ПГД (Δ_G) в дБ приведены на рис. 3 для наиболее характерных размеров звукоприемников, используемых в реальных экспериментах.

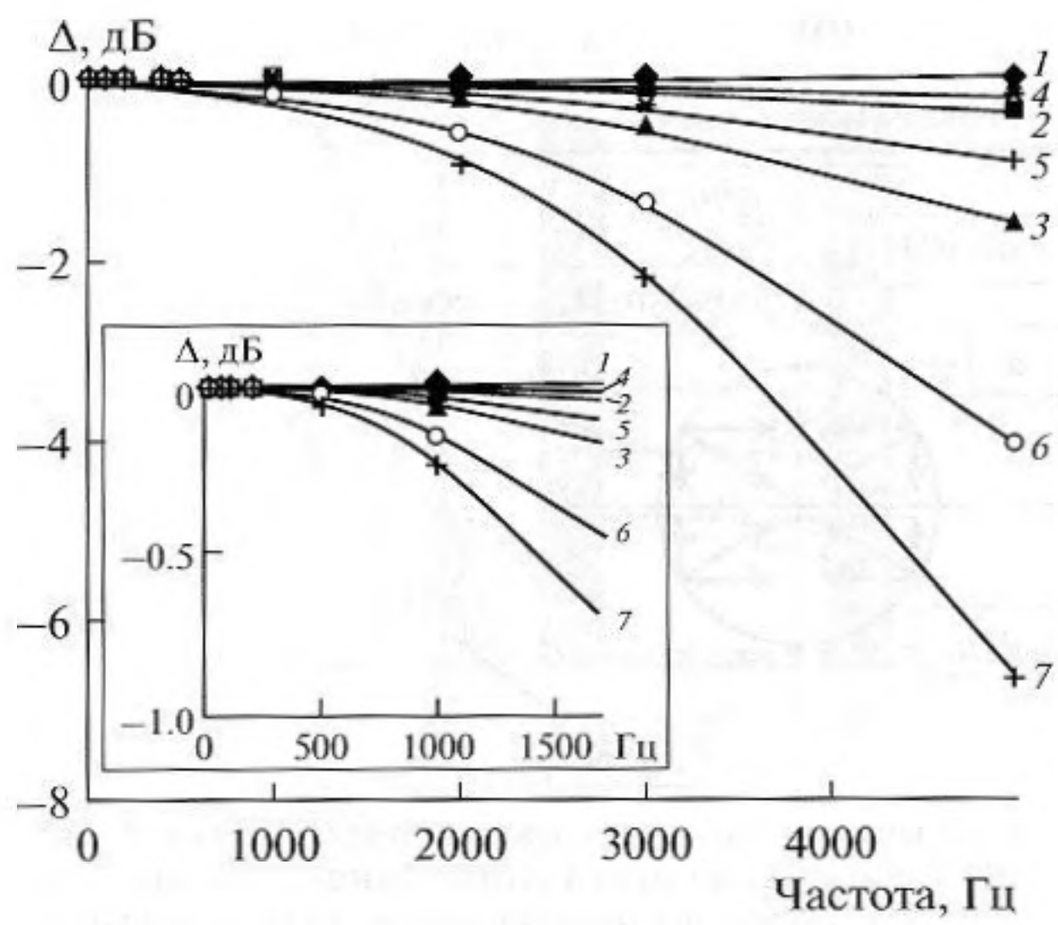

Рис. 3. Отличие Δ искомых значений акустического давления (*1*, *2*, *3*) и его градиента (*4*, *5*, *6*, *7*) от измеренных сферическим звукоприемником радиуса *a*: *1* – 1 см; *2*, *4* – 2.5 см; *3*, *5* – 5 см; *6* – 10 см; *7* – 12.5 см. На врезке приведен фрагмент зависимости в области низких частот в увеличенном масштабе.

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 $a = 8$–13 см. Поэтому для таких звукоприемников поправки могут быть существенными уже начиная с частот 1 кГц и выше. Например, для использовавшегося нами в работах по изучению высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии [6] трехкомпонентного ВП диаметром 5 см (диапазон рабочих частот до 12.5 кГц), если бы его калибровали в поле стоячей волны, 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 $2a$ или ПГД на базе двух разнесенных на расстояние $2a$ ПД. Эта поправка составляет:

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

Если величина звукового давления измеряется с помощью сферического образцового гидрофона радиуса a_0, установленного на глубине d_0, не совпадающей с минимумом амплитуды давления в узле стоячей волны, а градуируется сферический ПГД радиуса a_G, установленный на глубине d, не совпадающей ни с узлом, ни с пучностью давления в стоячей волне, суммарная поправка, которую необходимо ввести, будет определяться выражением:

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

В принципе, при внесении звукоприемника конечных размеров дополнительно возникают также искажения поля, обусловленные дифракцией волны на корпусе звукоприемника [2]. Однако проведенные нами оценки и экспериментальные исследования показали, что при диаметре ВП $2a = 10$ см величина поправок в диапазоне частот до 6–8 кГц оказывается невелика. При диаметре ВП $2a = 20$ см поправку на дифракцию следует учитывать с частот выше 4–5 кГц.

Конкретное значение верхней частоты, до которой можно градуировать звукоприемники без потери точности, определяется конструктивными особенностями установки и принципиальной возможностью возбуждения на ней высокочастотной плоской волны.

В случае установки УВГ-1 удалось показать, что теоретически возможно расширить частотный диапазон примерно до 3 кГц, вместо ранее заявленной частоты 500 Гц. Дальнейшему расширению частотного диапазона препятствовали возникающие механические резонансы конструкции установки и существенные искажения фронта волны, обусловленные отклонением волны от плоской за счет нарушения соотношения $R < 0.61\lambda$. Однако ограниченная мощность используемого вибратора реально позволила реализовать диапазон только до 1.5 кГц.

Следует также отметить, что на практике расширение частотного диапазона такого сложного акустического инструмента, как камера малого объема – задача отнюдь не тривиальная и считать, что ее легко можно решить, используя лишь "теоретические" значения поправок, не приходится. Задачу многократно затрудняет то обстоятельство, что, помимо значительного усложнения с увеличением частоты математической модели самой акустической камеры, на звуковое поле все в большей и большей степени влияет помещенный в камеру приемник. Поэтому "цена" вопроса во многом определяется качеством изготовления самой измерительной камеры, способом возбуждения стоячей волны и особенностями взаимодействия акустической волны со стенками камеры. В ряде случаев погрешности за счет всевозможных искажений поля на высоких частотах могут быть сравнимы с величиной рассчитываемой поправки на конечность размеров звукоприемников. Поэтому поправки лучше рассчитывать исходя из реального распределения поля, возникающего в камере в присутствии градуируемого и опорного приемников, что требует весьма кро-

потливой и достаточно длительной исследовательской работы, предшествующей процедуре калибровки. Поэтому реализованную для установки УВГ-1 возможность расширения частотного диапазона до 1500 Гц без увеличения суммарной погрешности градуировки в определенном смысле следует расценивать как большую удачу. Следует также отметить, что расширение частотного диапазона градуировки на установке УВГ-1 без увеличения погрешности, как показали сравнительные измерения для ВП, отградуированных в этой же частотной области другими способами, возможно для ВП, диаметр которых не превышает 120 мм. При большем диаметре звукоприемника уже возникают искажения поля за счет его взаимодействия с самим звукоприемником.

Тем не менее, отметим, что описанный выше учет поправок, применительно к методу градуировки звукоприемников различных размеров в поле стоячих волн, открывает резерв уменьшения погрешности градуировки звукоприемников на верхних рабочих частотах, особенно в тех случаях, когда при градуировке в качестве образцового и градуируемого используются звукоприемники разных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боббер Р.* Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974. 364 с.
2. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
3. *Strasberg M., Schloss F.* Calibration of pressure gradient transducers in an oscillating liquid column // J. Acoust. Soc. Am. 1973. V. 54. P. 533.
4. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
5. *Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Дрындин А.В., Лихачев С.М.* Градуировка звукоприемников в вертикальном колеблющемся столбе жидкости абсолютным методом // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 243–246.
6. *Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В., Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М.* Аномалия высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии как оперативный предвестник землетрясения // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 97–109.