

## РАДИОФИЗИКА

УДК 534.614

## О ГРАДУИРОВКЕ ПРИЕМНИКОВ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НА ВОЗДУХЕ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ В «НЕПРИСПОСОБЛЕННЫХ» ПОМЕЩЕНИЯХ

Б. И. Гончаренко, В. А. Гордиенко

(кафедра акустики)

E-mail: goncharenko@phys.msu.ru; vgor@list.ru

**Показана возможность градуировки звукоприемников в ближнем поле в реальном помещении. На основании экспериментальных данных показано, что условия сферического убывания поля в реальном лабораторном помещении выполняются в рабочем диапазоне частот в области горизонтальных расстояний вплоть до 60–80 см. Сравнение данных по градуировке канала приемника градиента давления в ближнем поле с аналогичными данными, полученными в других контролируемых условиях, показало их хорошее совпадение.**

Внедрение в практику акустических измерений приемников градиента давления (ПГД) [1] в обязательном порядке ставит проблему метрологического обеспечения таких измерений. Однако в настоящее время отсутствуют какие-либо специальные стандарты, касающиеся приемников градиента давления. Поэтому разработка метрологического обеспечения, позволяющего реализовывать требуемую точность определения амплитудно-частотных и частотно-фазовых характеристик каналов приемников градиента давления, до сих пор является весьма актуальной задачей.

Градуировка приемников градиента давления предусматривает определение их чувствительности и измерение диаграммы направленности, а также в некоторых случаях измерение их фазовой характеристики.

Определение чувствительности ПГД в большинстве случаев осуществляется путем использования образцового приемника звукового давления (ПД) и нахождения теоретической зависимости между компонентами звукового поля в условиях проведения эксперимента по градуировке.

Для правильного определения абсолютных уровней звукового давления или колебательной скорости при проведении измерений с помощью ПГД, необходимо учитывать «кажущееся» изменение чувствительности, обусловленное различием скоростей звука в различных средах и плотностей среды и звукоприемника в реальных условиях [1].

В настоящее время методы градуировки приемников градиента давления, использующихся в гидроакустике, достаточно подробно описаны в литературе и широко применяются на практике [2–7]. Во всех случаях чувствительность таких звукоприемников представляется в единицах эквивалентного звукового давления, приведенную к условиям плоской звуковой волны [4, 7, 8].

В работе [9] предложен метод калибровки приемника градиента давления в плоском водном слое открытого водоема на малых расстояниях от излучателя, где «прямая» волна значительно превышает поле отраженных волн. Связь между звуковым давлением и колебательной скоростью для этих условий задается простым соотношением:  $P = \rho c [1 - kr^{-2}]^{-1/2}$ , где  $\rho c$  — соответственно плотность водной среды и скорость звука в ней,  $k = \omega/c$  — волновое число,  $\omega$  — циклическая частота,  $r$  — горизонтальное расстояние между излучателем и приемной системой. Поэтому учет сферичности волны и пересчет на условие плоской звуковой волны не представляет труда. Развитию этого метода применительно к условиям не заглушенного гидробассейна посвящена работа [10].

Однако данные градуировки в воде отличаются от данных для воздуха, поэтому при необходимости выполнения измерений ПГД на воздухе, представляет практический интерес использовать ближнее поле для градуировки приемника на воздухе непосредственно в реальном рабочем помещении, наполненном стеллажами, столами, шкафами и т. д. Такое помещение будем называть «неприспособленным» помещением.

Для правильного пересчета выходных напряжений в чувствительность требуется знание с относительно малой погрешностью расстояния между акустическими центрами излучателя и ПГД и типа излучателя (монополь, диполь). Кроме этого, трудность градуировки ПГД связана с их более значительными размерами по сравнению с приемниками давления из-за чего приходится вводить поправки на размеры и даже форму ПГД [1, 8].

В данной работе излагаются результаты, полученные при градуировке ПГД в одном из «неприспособленных» помещений физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Размеры помещения

составляли примерно  $4 \times 7 \times 3$  м, где первая, вторая и третья цифры соответственно ширина, длина и высота помещения.

Экспериментальная установка для проведения работ состояла из излучающего тракта, двух идентичных приемных трактов и координатного устройства, с нанесенной на нем шкалой. Координатное устройство позволяло перемещать звукоприемники в помещении по нормали, проходящей через центр источника звука к одной из стен помещения вдоль наибольшей оси помещения, примерно на расстоянии 2 м от боковой стены, на расстоянии 1 м от пола и при удалении излучателя от торцевой стены помещения примерно на 2.5 м. В состав экспериментальной установки также входил поворотный стол, который использовался для снятия характеристик направленности излучателя и звукоприемников.

Использовались сферический приемник звукового давления диаметром 50 мм и сферический трехканальный приемник градиента давления диаметром 170 мм, которые крепились на резиновых растяжках в прямоугольной рамке с частотой резонанса подвески менее 1 Гц. Учитывая определенные экспериментально характеристики направленности излучателя в рабочем диапазоне частот, а также соотношение его характерных размеров по отношению к длине волны, можно считать, что в качестве источника звука использовался излучатель, близкий по типу к монополю.

Возможность использования метода градуировки звукоприемников в ближнем поле в условиях сферической волны в «неприспособленных» помещениях будет определяться выполнением сферического закона убывания звукового поля в горизонтальном направлении в области измерений. С этой целью были проведены измерения убывания звукового поля по звуковому давлению и колебательной скорости. Измерения осуществлялись в режиме излучения треть октавной полосы белого шума и тонального синусоидального сигнала. В результате было выяснено, что сферический закон убывания выполняется наилучшим образом в режиме излучения треть октавной полосы белого шума.

Экспериментальные данные по убыванию звукового давления в треть октавной полосы белого шума приведены на рис. 1. Для наглядности представления данных начальное расстояние для частот 400, 500 и 800 Гц на рисунке сдвинуто на постоянное значение. Прямые, ограничивающие экспериментальные данные сверху и снизу, описывают сферический закон убывания для различных начальных уровней. Экспериментальные данные на больших расстояниях, когда заведомо нарушался сферический закон убывания звукового поля, на графике не приведены. Горизонтальное расстояние между источником звука и звукоприемником отсчитывалось от акустического центра излучателя.

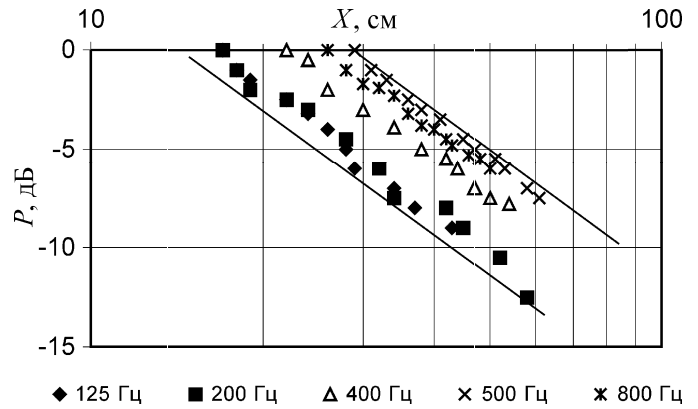


Рис. 1. Убывание амплитуды звукового давления в функции горизонтального расстояния

Для определения местоположения акустического центра излучателя для каждой частотной полосы треть октавного шума проводились измерения амплитуды звукового давления  $P_1$  и  $P_2$  соответственно в точках  $x_1$  и  $x_2$ . Поправка  $\Delta x$  для определения акустического центра  $x_0$  вычислялась по формуле  $\Delta x = (x_2 - Ax_1)/(A - 1)$ , где  $A = 10^{(P_1 - P_2)/20}$ . Для повышения точности определения значения акустического центра излучателя измерение амплитуды звукового давления  $P_2$  проводилось для шести различных точек в фиксированной частотной полосе. Область изменения величины  $x$ , где значения акустического центра  $x_0$  не зависели от точки измерения амплитуды звукового давления для полосы треть октавного шума 200 Гц, составила 15–60 см. Именно в этом диапазоне горизонтальных расстояний выполняется экспериментально определенный сферический закон убывания величины звукового давления в исследуемом диапазоне частот. Погрешность определения горизонтального расстояния  $x$  с учетом определения значения акустического центра излучателя не превышает 10%.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по убыванию величины колебательной скорости в треть октавных полосах белого шума.

Как известно [11], убывание поля колебательной скорости можно разбить на три области: существенно ближнее поле ( $kr < 1$ ,  $r$  — расстояние между

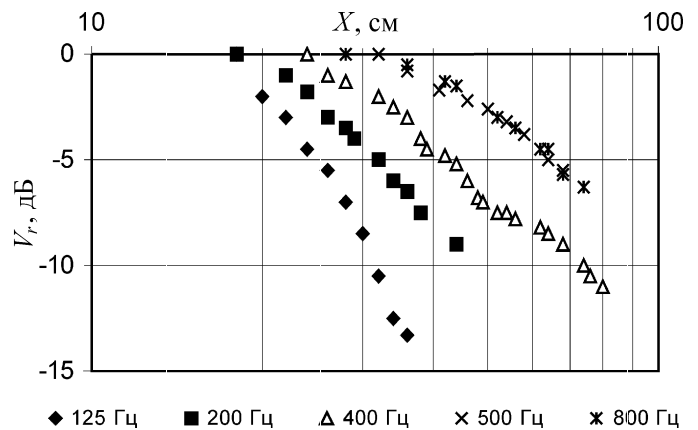


Рис. 2. Убывание амплитуды колебательной скорости в функции горизонтального расстояния

излучателем и звукоприемником), где убывание колебательной скорости пропорционально  $1/r^2$ , промежуточная зона, где убывание носит промежуточный характер между  $1/r^2$  и  $1/r$ , и зона, где действует сферический закон убывания  $1/r$ .

Как следует из полученных экспериментальных данных, в диапазоне частот 400–800 Гц убывание поля колебательной скорости на расстояниях примерно до 80 см следует сферическому закону убывания поля. На частоте 200 Гц убывание поля колебательной скорости можно отождествить с убыванием поля колебательной скорости в промежуточной зоне. На частоте 125 Гц убывание поля колебательной скорости 12 дБ на октаву (т. е. как  $1/r^2$ ) характерно для существенно ближнего поля.

Для определения чувствительности приемника градиента давления необходимо измерить уровни электрического сигнала с соответствующего канала приемника градиента давления и образцового приемника звукового давления, помещенных на определенном расстоянии от излучателя, рассчитать теоретическую поправку на сферичность волны с учетом определения величины акустического центра излучателя. Кроме того, необходимо учесть поправку, обусловленную несовпадением в ближнем поле сферического излучателя акустического центра звукоприемника с геометрическим центром сферы.

Необходимость введения последней поправки поясняет рис. 3. Полное воздействие на ПГД определяется следующим значением градиента давления:

$$\text{grad } P = \int_S \frac{P_0 e^{jkr}}{r} dS.$$

В плоской волне  $P_{1\text{eff}} = P_{2\text{eff}}$ , в то время как для сферической волны —  $P_{1\text{eff}} > P_{2\text{eff}}$ . Поэтому эффективный (кажущийся) акустический центр ПГД (как, впрочем, и ПД) смещается в сторону источника тем больше, чем меньше расстояние между излучателем и приемником.

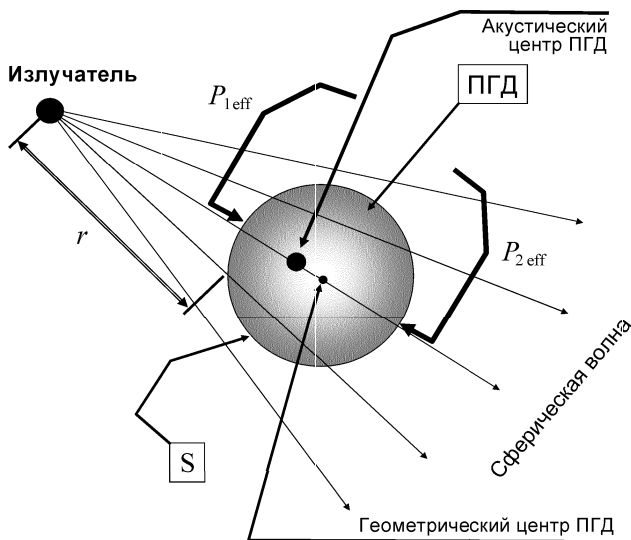


Рис. 3. К оценке погрешности задания фазового центра приемника градиента давления

Были измерены в треть октавных полосах частот 200 и 500 Гц уровни электрического сигнала с соответствующего канала приемника градиента давления и с образцового приемника звукового давления, а также теоретически рассчитана поправка на сферичность волны. Измерения были проведены для шести точек в пределах изменения горизонтального расстояния от 15 до 60 см. Далее по этим данным определены значения чувствительности приемника градиента давления  $G$ , данные которых занесены в таблицу.

Экспериментальные данные чувствительности приемника градиента давления, полученные для различных значений изменения горизонтального расстояния

Частота, Гц	X, см	15	25	35	45	55	60
200	$G$ , дБ	-2.4	-2.0	-1.7	-1.9	-2.3	-2.1
500	$G$ , дБ	6	6.3	6.5	6.7	6	5.8

Погрешность полученных экспериментальных значений чувствительности приемника градиента давления ( $G$ ) для различных точек измерения вдоль оси  $OX$  в пределах выполнения сферического закона убывания звукового поля составила  $\pm 0.5$  дБ. Постоянство значений чувствительности ПГД в пределах этой погрешности свидетельствует о правильности определения местоположения акустического центра излучателя.

Погрешности, обусловленные несовпадением в ближнем поле акустических центров ПГД и ПД с геометрическим центром сферы приемников, была оценена теоретически. По произведенным оценкам эти погрешности в нашем случае не превышали 1.5%.

Зависимости 1 и 2 на рис. 4 соответствуют полученным значениям чувствительности горизонтального канала векторного приемника. Измерения были проведены дважды.

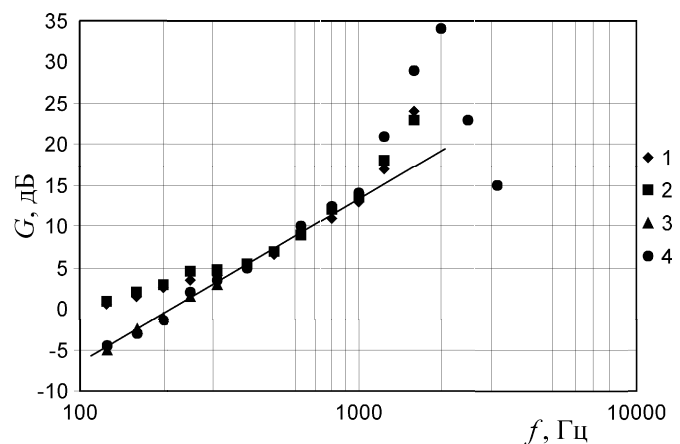


Рис. 4. Чувствительность горизонтального канала приемника градиента давления

Чувствительности, приведенной к условиям плоской звуковой волны (с учетом поправки на сферичность волны и определенного значения акустического центра), соответствует зависимость 3. На

частотах выше 400 Гц поправка не вводилась ввиду ее малости. За ноль принято значение чувствительности приемника звукового давления. Прямая линия соответствует росту чувствительности по закону 6 дБ на октаву.

Зависимость 4 соответствует чувствительности того же канала ПГД, полученной при градуировке в натуральных условиях по методике, изложенной в работе [12]. Сравнение значений чувствительностей, полученных независимыми методами, показывает их удовлетворительное совпадение в диапазоне частот 125–1000 Гц, что подтверждает достоверность результатов градуировки приемника градиента давления в неприспособленном помещении.

С учетом погрешности определения значения акустических центров излучателя, ПД и ПГД, а также погрешностей приборов для регистрации уровней электрического сигнала, которая составляла  $\pm 0.5$  дБ, общая погрешность определения чувствительности приемника градиента давления в нашем случае не превышала  $\pm 1.5$  дБ.

Измерения характеристики направленности каналов ПГД проводилась в треть октавной полосе белого шума в диапазоне частот от 100 Гц до 1 кГц. Расстояние между звукоприемником и источником звука составляло примерно 40 см. Разность уровней в максимуме и минимуме дипольной характеристики направленности составила величину около 18–20 дБ во всем исследуемом диапазоне частот, что с учетом изложенного в работе [1] об особенностях формирования характеристики направленности ПГД в ближнем поле, следует считать вполне удовлетворительным результатом.

При градуировке звукоприемников в ближнем поле в условиях сферической волны между звуковым давлением и горизонтальной составляющей колебательной скорости возникает дополнительная разность фаз, определяемая соотношением  $\varphi(PV_x) = \arctg(1/kr)$ . В этих условиях при измерении фазовой характеристики ПГД использовался вместо приемника звукового давления второй ПГД, размеры которого малы по сравнению с длиной волны, а резонансная частота преобразователя много выше верхней граничной частоты диапазона измерений. Для определения фазовой характеристики ПГД была измерена разность фаз электрических сигналов, с выходов двух ПГД и учтены фазовые характеристики второго ПГД и каналов электронной аппаратуры.

На рис. 5 приведена фазовая характеристика горизонтального канала описанного выше ПГД. Расстояние между звукоприемниками было 20 см, удаление от излучателя — 40 см. Сплошной кривой приведена рассчитанная фазовая характеристика сферического приемника колебательной скорости диаметром 170 мм при средней плотности  $\rho = 2.7$  г/см<sup>3</sup> [13], которая удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Погреш-

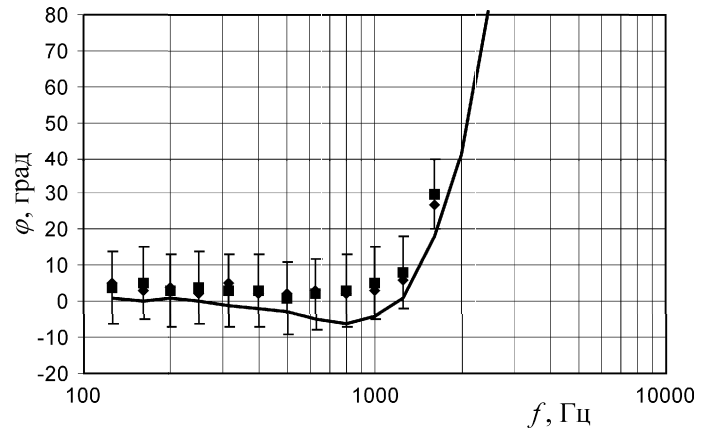


Рис. 5. Фазовая характеристика горизонтального канала приемника градиента давления

ность измерения фазовой характеристики ПГД в исследуемом диапазоне частот составила  $\pm 10^\circ$ .

### Заключение

Основные результаты данной работы состоят в следующем.

Показана возможность градуировки приемников градиента звукового давления на воздухе в ближнем поле в реальном помещении с целью дальнейшего их использования в аэроакустике.

Предлагаемая методика позволяет контролировать коэффициент деления отдельного канала звукоприемника, определяемой как отношение уровней сигнала, регистрируемого в максимуме и минимуме дипольной характеристики направленности в треть октавной полосе белого шума не менее чем 18–20 дБ во всем исследуемом диапазоне частот.

При проведении работ по градуировке приемника градиента давления в реальном помещении может быть обеспечена общая погрешность определения его чувствительности не хуже  $\pm 1.5$  дБ, а измерения фазовой характеристики в исследуемом диапазоне частот  $\pm 10^\circ$ .

### Литература

1. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М., 1989.
2. Бобер Р.Дж. Гидроакустические измерения. М., 1974.
3. Захаров Л.Н., Иванников А.Н., Андреев М.Ю. и др. Сб. тезисов докладов науч.-тех. конфер. МГУ-ЗИЛ. М., 1978. С. 42.
4. Иванов В.Е., Киришов В.А. // Измер. техника. 1981. № 9. С. 61.
5. Бокун Л.И., Киришов В.А. // Измер. техника. 1983. № 5. С. 65.
6. Михайлов В.В., Сайков Ю.М., Чечин Г.В. Гидрофизические измерения. М., 1989. С. 38.
7. Ермилов Б.И., Михайлов В.В., Окиншевич И.Н. и др. Метрологические проблемы гидрофизических и гидроакустических измерений. М., 1990. С. 55.

8. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Дрындин А.В. и др. // Акуст. журн. 1994. **40**, № 2. С. 243.
9. Herbert H.J., Paine W.L. // J. Acoust. Soc. Am. 1971. **49**, N 3(2). P. 931.
10. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1980. **21**, № 5. С. 83.
11. Свердлин Г.Н. Прикладная гидроакустика. Л., 1990.
12. Захаров Л.Н. // Акуст. журн. 1971. **17**, № 4. С. 558.
13. Ржевкин С.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1971. **12**, № 1. С. 52 (Moscow University Phys. Bull. 1971. **12**., N 1. P. 37).

Поступила в редакцию  
17.12.04