

Б. И. ГОНЧАРЕНКО, Л. Н. ЗАХАРОВ, Б. И. РОМАНИУК

## О МЕТОДАХ ГРАДУИРОВКИ ВЕКТОРНОГО ПРИЕМНИКА

Рассматривается методика градуировки векторного приемника в гидробассейне путем нахождения аналитических зависимостей между звуковым давлением и компонентами колебательной скорости и осреднения поля по одной, двум и трем координатам. Приводятся расчеты, сделанные на ЭВМ в предположении, что стенки гидробассейна являются акустически мягкими, а также результаты эксперимента.

Чувствительность векторных приемников или приемников градиента давления, выходное напряжение которых может быть пропорциональным смещению, колебательной скорости или ускорению в звуковой волне, целесообразно представлять в единицах звукового давления, приводя эти данные для определенности к условиям плоской волны. Поскольку в настоящее время при нахождении их чувствительности в качестве образцовых приемников используются исключительно приемники звукового давления, то очень важно иметь полную картину о поле, в котором производятся измерительные работы. Наиболее просто осуществить градуировку в условиях плоской волны, где связь между звуковым давлением  $p$  и колебательной скоростью  $\xi$  (ускорением  $\xi$ , смещением  $\xi$ ) наиболее проста. Создать такие условия, особенно на низких частотах, затруднительно. Это заставило исследователей пойти, с одной стороны, по пути создания резервуаров, возбуждаемых механическим способом, в которых связь между  $p$  и  $\xi$  выражается несложной зависимостью [1, 2], с другой стороны, по пути нахождения аналитических соотношений между  $p$  и  $\xi$  для акваторий с конечной глубиной места, приводя результаты градуировки и в первом и втором случаях [3, 4] к условиям плоской волны.

В работе [1] описана лабораторная установка, позволяющая осуществить градуировку приемников градиента давления по образцовому приемнику давления в стоячей звуковой волне в диапазоне частот 10—300 Гц. В дальнейшем эта установка была усовершенствована, после чего обеспечивала проведение градуировки градиентных приемников в диапазоне частот 2—2500 Гц [2].

Принцип возбуждения в замкнутом объеме стоячей волны для градуировки приемников был положен в основу лабораторных установок, описанных в работах [5 и 6]. Однако эти лабораторные установки применялись для градуировки приемников звукового давления. В дальней-

шем была показана возможность проводить в них градуировку градиентных приемников [7]. Градуировка производилась инерционным методом без образцового приемника звукового давления в диапазоне частот 100—700 Гц [5] и 100—3000 Гц [6] соответственно.

В работе [3] предложен метод градуировки приемников градиента давления в свободном поле, состоящий в непосредственном сравнении градиентного приемника с образцовым приемником звукового давления в точке. Для учета сферичности волны авторы рассчитали поправочные коэффициенты для расстояний между излучателем и приемником, равных 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 м. Градуировка проводилась в диапазоне частот 10—1000 Гц.

Метод градуировки векторных приемников путем осреднения звукового поля по глубине предложен в работе [4], где показано, что при наличии плоского слоя, безграничного в горизонтальном направлении, достаточно провести одно осреднение поля по глубине (при двух ориентациях градуируемого канала векторного приемника), чтобы соотношение между средними по глубине слоя квадратами модулей звукового давления  $|\rho|_H^2$  горизонтальной  $|\xi|_H^2$  и вертикальной  $|\eta|_H^2$  составляющими колебательной скорости приняло простой вид

$$\frac{|\rho|_H^2}{|\xi|_H^2 + |\eta|_H^2} = (\rho_0 c_0)^2,$$

где  $\rho_0 c_0$  — волновое сопротивление жидкости.

В данной работе рассматривается методика градуировки векторного приемника в гидробассейне. В распоряжении авторов имелся гидробассейн размером  $10 \times 4 \times 3,9$  м, стенки которого были изготовлены из тонких листов железа, опертых на ребра жесткости. Отсюда следует целесообразность возбуждения объема бассейна с помощью располагаемого внутри его акустического излучателя. Для градуировки векторного приемника по образцовому приемнику давления необходимо было найти аналитическую зависимость между звуковым давлением и компонентами колебательной скорости. Как известно [8], решение задачи об акустических колебаниях в прямоугольном баке с импедансными границами может быть получено в том случае, когда значение импеданса не зависит от угла падения звуковой волны. Предварительные экспериментальные работы показали, что на собственных частотах бассейна его стенки с достаточной степенью точности, как видно, в частности, из рис. 1, можно считать акустически мягкими.

В случае прямоугольного бака, изображенного на рис. 2, с акустически мягкими стенками потенциал скоростей  $\varphi$  в соответствии с [9] может быть записан в виде

$$\varphi = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P A_{mnp} \sin(k_m x) \sin(k_n y) \sin(k_p z), \quad (1)$$

где

$$k_m = \frac{m\pi}{a}, \quad k_n = \frac{n\pi}{b}, \quad k_p = \frac{p\pi}{H}.$$

$a$  — длина грани, идущей по оси  $x$ ;  $b$  — длина грани, идущей по оси  $y$ ;  $H$  — высота слоя воды (несколько менее высоты грани, идущей по оси  $z$ );  $m, n, p=1, 2, 3 \dots$ ,  $A_{mnp}$  — амплитуда колебаний, определяемая производительностью и местом расположения излучателя;  $k$  — волновое число;  $K_{mnp}$  — собственное значение параметра  $k$  для данной задачи.

Для определения звукового поля, возбуждаемого в замкнутом объеме на собственных частотах бака, найдем связь между звуковым давлением и составляющими колебательной скорости. Производя очевидные операции, найдем отношение квадрата модуля звукового давления к сумме квадратов модулей составляющих колебательной скорости

$$G = \frac{|p|^2}{|\dot{\xi}|^2 + |\dot{\eta}|^2 + |\dot{\zeta}|^2} = (\rho_0 c_0) (\psi)^2, \quad (2)$$

где

$$(\psi)^2 = [\psi(x_1, y_1, z_1, x, y, z, f, a, b, H)]^2.$$

Из выражения (2) следует, что это отношение равно квадрату волнового сопротивления среды, умноженному на поправочный коэффициент  $(\psi)^2$ , зависящий сложным образом от координат излучателя  $(x_1, y_1,$

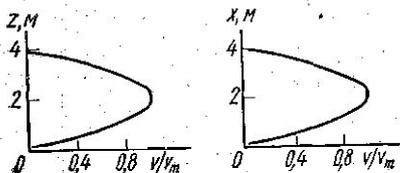


Рис. 1. Разрезы звукового давления по оси  $x$  и  $y$ , соответствующие моде  $f_{111}=258$  Гц. По оси абсцисс обложена относительная амплитуда сигнала, по оси ординат — расстояние

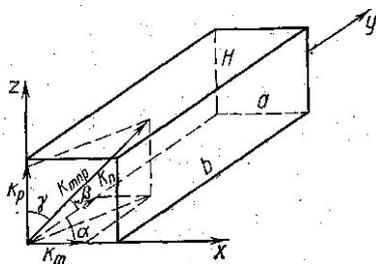


Рис. 2. Прямоугольный бак и вектора  $k_{mnp}$ ,  $k_m$ ,  $k_n$ ,  $k_p$ , определяющие в нем звуковое поле. Волновой вектор  $k_{mnp}$  и его компоненты  $k_m$ ,  $k_n$  и  $k_p$ , приведены к началу координат

$z_1$ ), координат приемника  $(x, y, z)$ , частоты и от размера бака. Вычисление поправочного коэффициента  $(\psi)^2$  представляет довольно трудоемкую операцию. Небольшие изменения стоящих в квадратных скобках параметров, как нетрудно показать, приведут к значительным отклонениям в определении  $(\psi)^2$ . Ошибки в определении  $(\psi)^2$  можно значительно уменьшить, переходя к осреднению поля по одной, двум или трем координатам. Количество осреднений определяется возможностью координатного устройства и наличием машинной техники для проведения расчетов.

Произведем осреднение поля по координате  $z$ . Пусть точечный излучатель установлен при этом в центре объема. Тогда в баке будут возбуждаться только нечетные моды, поскольку коэффициент возбуждения  $A_{mnp}$  для всех четных мод равен нулю. Для получения наиболее простого выражения  $(\psi)^2$  осреднение будем проводить по трассам, лежащим в плоскости  $x=a/2$  или  $y=b/2$ . Поправочный коэффициент тогда будет иметь вид:

для вертикальной трассы с координатами  $(x=a/2, y)$

$$(\bar{\psi})_z^2 = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_{p=1}^P k_{mnp} k_{m'n'p} \sin(k_n y) \sin(k_{n'} y)}{M^2 \left[ \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_{p=1}^P k_n k_{n'} \cos(k_n y) \cos(k_{n'} y) \right]} +$$

$$+ \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_p^P k_{mnp} k_{m'n'p} \sin(k_n y) \sin(k_{n'} y)}{\sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_{p=1}^P k_p^2 \sin(k_n y) \sin(k_{n'} y)} \quad (3)$$

для вертикальной трассы с координатами  $(x, y = b/2)$

$$\begin{aligned} (\bar{\psi})_z^2 = & \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_p^P k_{mnp} k_{m'n'p} \sin(k_m x) \sin(k_{m'} x)}{N^2 \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{p=1}^P k_m k_{m'} \cos(k_m x) \cos(k_{m'} x) \right.} \\ & \left. + \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_p^P k_{mnp} k_{m'n'p} \sin(k_m x) \sin(k_{m'} x)}{\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_p^P k_p^2 \sin(k_m x) \sin(k_{m'} x)} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

В обоих случаях  $m, n, p=1, 3, 5 \dots (2l+1)$ . При расположении излучателя и вертикальной трассы в плоскости  $x=a/2$  расстояние  $r_y$  между ними определяем из условия

$$k_n r_y = \frac{n\pi}{b} r_y \geq 1,$$

если же излучатель и трасса расположены в плоскости  $y=b/2$ , то соответственно для  $r_x$

$$k_m r_x = \frac{m\pi}{a} r_x \geq 1.$$

Как следует из рис. 3, строгой зависимости  $(\bar{\psi})_z$  от частоты нет. При осреднении поля по координате  $z$  мы избавляемся от интерференционных эффектов только в вертикальном направлении. Собственных

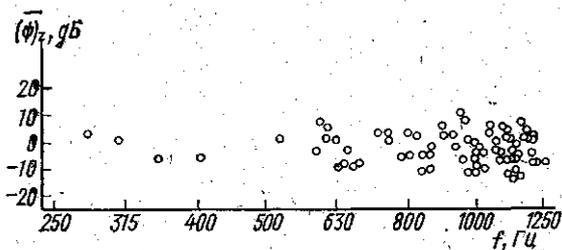


Рис. 3. Поправочный коэффициент  $(\bar{\psi})_z$  в зависимости от частоты, рассчитанный на ЭВМ по формуле (3) для гидроакустического бассейна ( $a=4, b=10$  и  $H=3,9$  м). Координаты излучателя ( $x_1=a/2, y_1=2/5b, z_1=H/2$ ). Координаты трассы ( $x=a/2, y=b/2$ )  $m, p=1, 3, 5 \dots, n=1, 2, 3 \dots$  За нулевой уровень принята величина поправочного коэффициента для плоской звуковой волны

значений частот бассейна достаточно много, и в ряде случаев они расположены очень близко друг к другу. Поэтому значения поправочного коэффициента  $(\bar{\psi})_z$  для одной собственной частоты перекрываются значениями  $(\bar{\psi})_z$  для другой собственной частоты. По-видимому, если посчитать значения  $(\bar{\psi})_z$  на собственных частотах, достаточно удаленных от соседних, то градуировку векторного приемника можно свести к снятию вертикального разреза звукового поля образцовым приемником давления и двух разрезов градуируемым каналом векторного приемника.

Определим величину поправочного коэффициента при осреднении поля по двум координатам  $y$  и  $z$ . Произведя расчет аналогичным образом, как и при осреднении поля по одной координате, получим выражение

$$(\bar{\Psi})_{yz}^2 = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P k_{mnp} k_{m'np}}{M^2 P \sum_{n=1}^N k_n^2 + M^2 N \sum_{p=1}^P k_p^2}, \quad (5)$$

где  $m, n, p = 1, 3, 5 \dots (2l+1) \dots$

Результаты расчета приведены на рис. 4. Осредняя поле по координатам  $y$  и  $z$ , мы избавляемся от интерференционных эффектов в продольном и вертикальном направлениях, в результате чего получаем определенную зависимость поправочного коэффициента  $(\bar{\Psi})_{yz}$  от частоты.

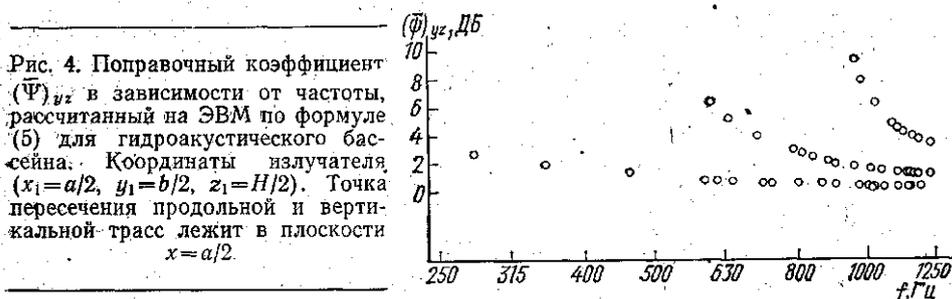


Рис. 4. Поправочный коэффициент  $(\bar{\Psi})_{yz}$  в зависимости от частоты, рассчитанный на ЭВМ по формуле (5) для гидроакустического бассейна. Координаты излучателя  $(x_1 = a/2, y_1 = b/2, z_1 = H/2)$ . Точка пересечения продольной и вертикальной трасс лежит в плоскости  $x = a/2$ .

Эта зависимость определяется только модой порядка  $m$ . Значения поправочного коэффициента, лежащие на нижней ветви, соответствуют частотам  $f_{1np}$ , на следующей —  $f_{3np}$ , на самой крутой —  $f_{5np}$ , т. е. каждому номеру моды порядка  $m$  соответствует своя ветвь и чем выше порядок моды, тем ветвь круче.

Таким образом, зная величину поправочного коэффициента на собственных частотах бака и устанавливая излучатель строго в центре объема, можно производить градуировку векторного приемника путем снятия двух разрезов звукового поля образцовым приемником давления и четырех разрезов градуируемым каналом векторного приемника, при этом градуируемый канал ориентируется параллельно тем двум осям, по которым осредняется поле.

Если произвести осреднение поля по трем координатам, то, как нетрудно показать, поправочный коэффициент  $(\bar{\Psi})_{xyz}^2$  будет равен единице. Если при этом каждая из трех выбранных трасс будет лежать в плоскости, параллельной соответствующей грани бака и проходящей через установленный в центре объема излучатель, то градуировка одного канала векторного приемника сведется к снятию трех разрезов звукового поля образцовым приемником давления и шести разрезов звукового поля градуируемым каналом.

Эксперимент по проверке методики градуировки векторного приемника был проведен в гидроакустическом бассейне. Векторный приемник был предварительно отградуирован методом, который описан в [4]. Поэтому сопоставление результатов градуировки векторного приемника в баке и в слое является, в первую очередь, критерием точности рассматриваемого метода, поправочные коэффициенты которого расчи-

таны с известными допущениями. На основании результатов экспериментальных работ определялась чувствительность канала векторного приемника по формуле

$$M'_{гр} = \sqrt{\frac{(U'_x)_z^2 + (U'_y)_z^2 + (U'_z)_z^2}{(U_p)_z^2}} M_{обр} \left[ \frac{\text{мк В}}{\text{Па}} \right],$$

где  $M'_{гр}$  — чувствительность градуируемого канала векторного приемника в сложном звуковом поле, не приведенная к условиям плоской волны;  $M_{обр}$  — чувствительность образцового приемника давления;  $(U_p)_z^2$  — усредненное по вертикали выходное напряжение, получаемое с образцового приемника давления;  $(U'_x)_z^2$ ,  $(U'_y)_z^2$ ,  $(U'_z)_z^2$  — усредненное по вертикали выходное напряжение, получаемое с градуируемого канала векторного приемника при ориентации этого канала соответственно вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Экспериментальные значения чувствительности градуируемого канала векторного приемника в сложном звуковом поле, рассчитанной по формуле (6) и не приведенной к условиям плоской волны, как видно из рис. 5, несколько разбросаны вдоль линии фактической чувствитель-

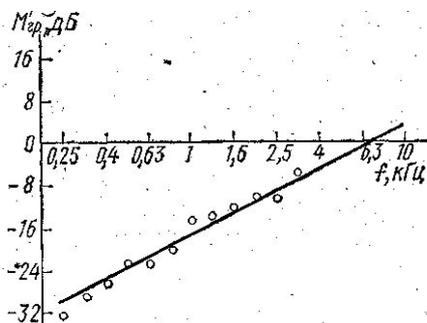


Рис. 5. Экспериментально определенная чувствительность градуируемого канала векторного приемника. За нулевой уровень принята чувствительность приемника звукового давления, равная 45 мкВ/Па. Сплошной линией показана фактическая чувствительность векторного приемника, возрастающая в 2 раза при удвоении частоты

ности. Чтобы привести экспериментально определенную чувствительность к условиям плоской волны, необходимо воспользоваться значениями поправочных коэффициентов, которые находятся из выражения (2) для конкретно указанных параметров.

Достоинством описанного выше метода градуировки векторных приемников является то, что он позволяет проводить измерения в лабораторных условиях и устраняет необходимость выезда на полигон. В то же время он не требует создания специальных измерительных установок: для градуировки векторных приемников используются готовый гидроакустический бассейн и обычная измерительная аппаратура. Поскольку метод градуировки заключается в снятии разрезов звукового поля с последующим осреднением их по глубине для устранения интерференционных эффектов, заглушать гидроакустический бассейн не требуется. Для возбуждения звукового поля в бассейне используется электродинамический излучатель, а не сложное наружное электромеханическое устройство.

В заключение авторы выражают благодарность С. Н. Ржевкину за полезные советы и замечания при выполнении настоящей работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bauer B. B. «J. Acoust. Soc. America», 1966, 39, 3, 585—586.
2. Bauer B. B., Abbagnaro L. A., Shumann J. «J. Acoust. Soc. America», 1972, 51, 5(2), 1717—1724.
3. Hebert H. J., Paine W. L. «J. Acoust. Soc. America», 1971, 49, 3(2), 931—932.
4. Захаров Л. Н. «Акустический журнал», 1971, 17, 558—562.
5. Schloss F., Strasberg M. «J. Acoust. Soc. America», 1962, 34, 958—960.
6. Sims C. C. «J. Acoust. Soc. America», 1964, 36, 2, 402.
7. Strasberg M., Schlose F. — «J. Acoust. Soc. America», 1973, 54, 2, 553.
8. Чапдин А. Ф. «Акустический журнал», 1972, 18, 153—155.
9. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. Изд-во МГУ, 1960.

Поступила в редакцию  
13.2 1975 г.

Кафедра  
акустики