

УДК 534.6

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ГРАДУИРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГИДРОФОНОВ ПО ПОЛЮ МЕТОДОМ ВЗАИМНОСТИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

© 2004 г. А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев, В. А. Смелов, А. И. Щелкунов

Государственный метрологический центр гидроакустических измерений

*Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт
физико-технических и радиотехнических измерений*

141570 Россия, Московская обл., Солнечногорский р-н, п. Менделеево

E-mail: Isaev@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 23.10.2002 г.

Предлагается процедура градуировки, позволяющая существенно снизить погрешность, обусловленную искажениями акустического поля в гидроакустическом бассейне. Эта процедура основана на определении так называемых приведенных электрических переходных импедансов преобразователей (электрических переходных импедансов, приведенных к закону распространения сферической волны) и заключается в измерении электрических переходных импедансов при различных расстояниях между гидроакустическими преобразователями. Чувствительность градуируемого гидрофона рассчитывается по значениям приведенных электрических переходных импедансов в дальнем поле. Для определения значений этих приведенных переходных импедансов используется математическая модель гидрофона, основанная на представлении его системой, образованной точечным чувствительным элементом и конечным числом точечных источников акустического сигнала – отражателей. Предложен способ определения числа и координат точечных отражателей на основе анализа акустических “изображений” отражающей поверхности гидрофона. Рассматриваются методика проведения измерений, алгоритмы математической обработки и результаты экспериментальных исследований. Приводится сравнительный анализ результатов градуировок гидрофонов “по полю” методом взаимности, выполненных по традиционной методике и с использованием предложенной процедуры.

При градуировке гидрофона в условиях лабораторного гидроакустического бассейна не удастся соблюсти в должной мере условия дальнего поля, поскольку корпус и элементы крепления гидрофона не являются акустически прозрачными. Интерференция сигнала излучателя и сигналов, отраженных элементами конструкций гидрофонов и их креплений, приводит к искажениям акустического поля, степень которых зависит от частоты градуировки. Эти искажения оказывают заметное влияние на погрешность результатов измерений.

Заметим, что характерный размер измерительного гидрофона может существенно превышать размер его активного элемента. В этом случае при градуировке в лабораторном гидроакустическом бассейне не удастся обеспечить условий, при которых на гидрофон действует практически плоская волна. Интерференция прямой волны от излучателя и волн, отраженных элементами конструкции гидрофона и его креплением, может существенно исказить результаты измерений. В работе рассматривается процедура градуировки в свободном поле, основанная на использовании модели градуируемого гидро-

фона в виде точечного активного элемента и конечного числа точечных отражателей [1].

Каноническое выражение для определения чувствительности на прием в свободном поле M_H гидроакустического измерительного преобразователя H по методу взаимности с использованием вспомогательных излучающего P и обратимого T преобразователей имеет вид [2, 3]:

$$M_H = \left(\frac{2 Z_{PH} Z_{TH} r_{PH} r_{TH}}{\rho f Z_{PT} r_{PT}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где: Z_{PH} , Z_{PT} , Z_{TH} – значения электрических переходных импедансов преобразователей, r_{PH} – расстояние между излучателем P и градуируемым преобразователем H ; r_{PT} – расстояние между излучателем P и обратимым преобразователем T , работающим в режиме приема; r_{TH} – расстояние между градуируемым преобразователем H и обратимым преобразователем T , работающим в режиме излучения; ρ – плотность среды; f – частота.

Значения переходных электрических импедансов Z_{PH} , Z_{PT} , Z_{TH} определяют по результатам измерения токов I_{PH} , I_{PT} , I_{TH} , протекающих через

преобразователи P и T при их работе в режиме излучения, и напряжений холостого хода U_{PH} , U_{PT} , U_{TH} , измеряемых на выходах преобразователей H и T при их работе в режиме приема, по формулам:

$$Z_{PH} = \frac{U_{PH}}{I_{PH}}, \quad Z_{PT} = \frac{U_{PT}}{I_{PT}}, \quad Z_{TH} = \frac{U_{TH}}{I_{TH}}.$$

Формула (1) справедлива для закона распространения сферической волны, поэтому для того, чтобы при измерениях достичь приемлемых условий дальнего поля, преобразователи должны быть разнесены на достаточно большие расстояния, при которых их можно рассматривать точечными [4].

Используемые при градуировке по методу взаимности вспомогательные преобразователи (излучатели и обратимые преобразователи), как правило, имеют специальную конструкцию с минимальными габаритами. Градулируемые измерительные гидрофоны обычно имеют корпус и элементы крепления, и их габариты могут быть настолько значительными, что удовлетворить в должной мере критерию минимально допустимого расстояния в условиях лабораторного гидроакустического бассейна оказывается невозможно. Вследствие этого, измерения выполняются в области пространства, в которой интерференция прямого акустического сигнала и сигналов, отраженных корпусом градулируемого преобразователя и его креплением, вызывает искажения акустического поля. Использование при этом стандартной процедуры градуировки может привести к значительным погрешностям результатов.

Влияние градулируемого гидрофона на акустическое поле проанализируем на упрощенной модели (см. рис. 1). Предположим, что излучатель и гидрофон разнесены на достаточное расстояние, при котором их активные элементы могут быть представлены соответственно в виде точечного излучателя P с чувствительностью на излучение \dot{S}'_P и точечного приемника H с чувствительностью на прием \dot{M}'_H . Отражающую способность корпуса и элементов крепления гидрофона представим точечным отражателем R с комплексным коэффициентом отражения $\dot{w}_R = w_R e^{-j\varphi_R}$. Элементы P , H и R расположены в плоскости X, Z , как это показано на рис. 1. Приемник H находится в начале координат, излучатель P – на оси X в точке с координатами $(x_1, 0)$, а отражатель R имеет координаты $(0, z_R)$.

Звуковое давление, действующее на приемник H , представляет собой результат интерференции двух когерентных сферических волн:

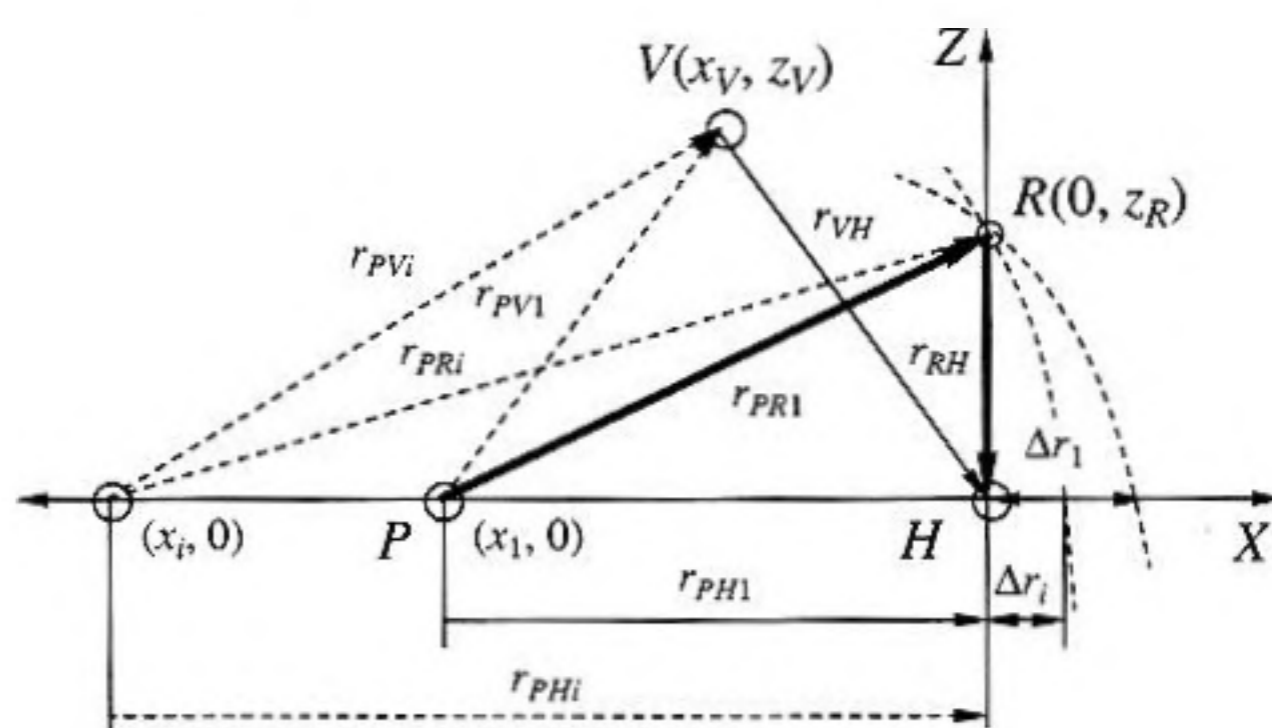


Рис. 1. Упрощенная модель для анализа влияния градулируемого гидрофона на акустическое поле.

прямой акустической волны с комплексной амплитудой

$$\dot{p}_{PH} = \dot{S}'_P \dot{I}_{PH} \frac{r_0}{r_{PH}} e^{-jk(r_{PH}-r_0)}$$

и волны, отраженной отражателем R , с комплексной амплитудой

$$\dot{p}_{RH} = \dot{S}'_P \dot{I}_{PH} \dot{w}_R \frac{r_0}{r_{PR} + r_{RH}} e^{-j(k(r_{PR} + r_{RH} - r_0) + \varphi_R)},$$

где: r_0 – опорное расстояние, обычно равное 1 м, $k = \frac{2\pi f}{c}$ – волновое число, c – скорость звука в воде.

Выражение для комплексной амплитуды напряжения \dot{U}_{PH} на выходе гидрофона запишем в виде:

$$\dot{U}_{PH} = \dot{M}'_H \dot{S}'_P \dot{I}_{PH} \frac{r_0}{r_{PH}} e^{-jk(r_{PH}-r_0)} \times (1 + w_R y_R(r_{PH}) e^{-j(kv_R + \varphi_R)}). \quad (2)$$

где: $v_R = r_{PR} + r_{RH} - r_{PH}$,

$$0 < y_R(r_{PH}) = \frac{r_{PH}}{r_{PR} + r_{RH}} \leq 1.$$

Дальнейшие рассуждения основаны на понятии электрического переходного импеданса, приведенного к закону распространения акустической волны. Для излучателя P и гидрофона H , разнесенных на расстояние r_{PH} , определим электрический переходной импеданс, приведенный к закону распространения сферической волны (далее приведенный переходной импеданс) в виде:

$$\dot{Z}_{PH}(r) = \frac{\dot{U}_{PH} r_{PH}}{\dot{I}_{PH} r_0} e^{jk(r_{PH}-r_0)}. \quad (3)$$

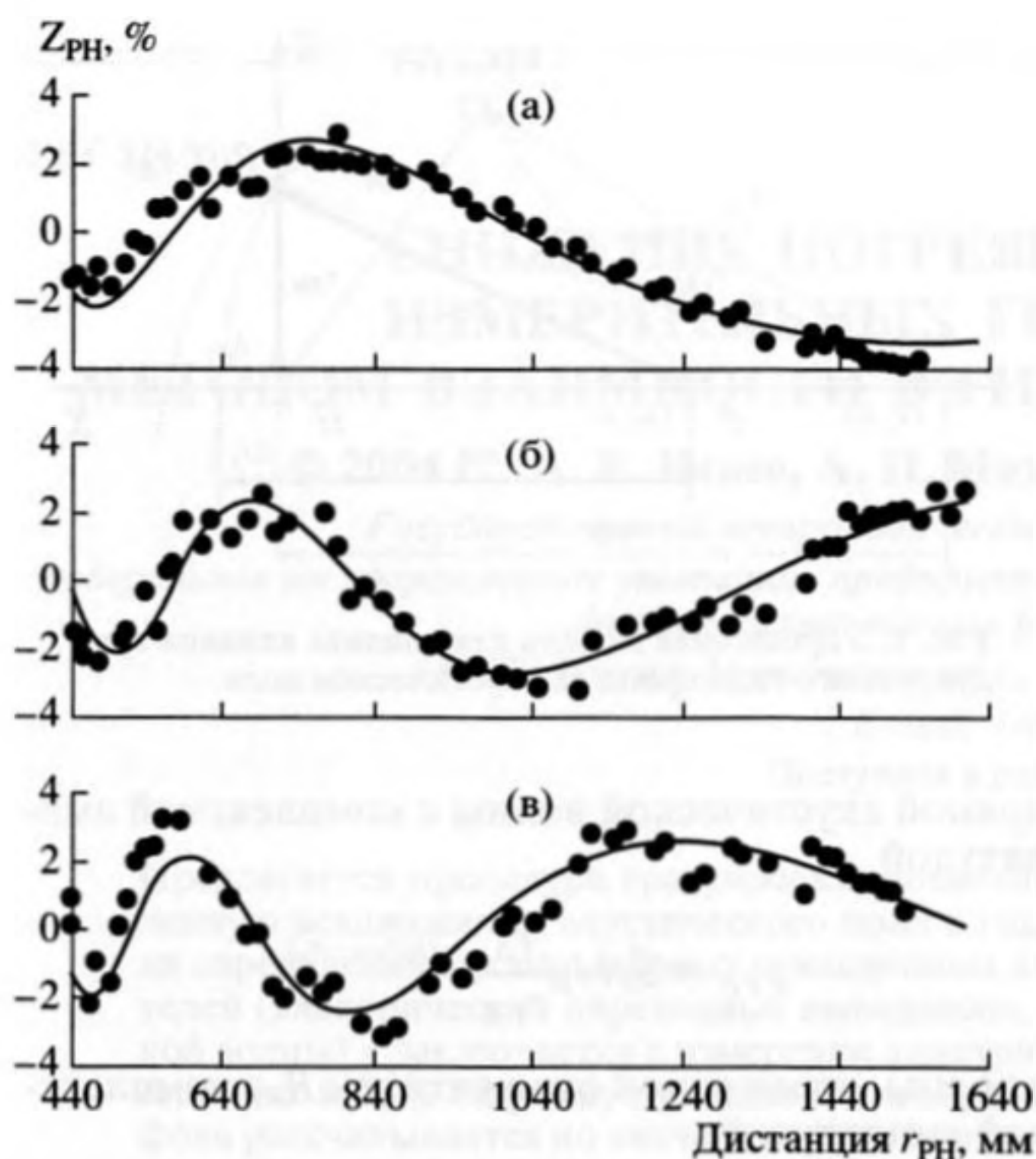


Рис. 2. Пространственные зависимости приведенных переходных импедансов пары сферических преобразователей с одним отражателем на частотах 30 (а), 40 (б), 60 (в) кГц. Точки – эксперимент, линии – модель.

Нетрудно убедиться, что приведенный переходной импеданс точечного излучателя P и точечного приемника H в невозмущенном поле сферической акустической волны не зависит от расстояния между P и H и представляет собой произведение $M'_H S'_P$. Обозначим приведенный переходной импеданс точечного излучателя и точечного приемника в невозмущенном поле сферической волны через Z_{PH_0} .

В поле сферической волны, возмущенном волной, исходящей от отражателя, приведенный переходной импеданс имеет зависимость от расстояния между излучателем и приемником акустического сигнала. Подставляя выражение для выходного напряжения гидрофона в (3) при $w_R \ll 1$, получим следующее приближенное выражение для модуля приведенного переходного импеданса:

$$Z_{PH}(r) = Z_{PH_0} \sqrt{(1 + 2w_R y_R(r_{PH}) \cos(kv_R + \varphi_R))}, \quad (4)$$

где: $Z_{PH_0} = M'_H S'_P$.

На рис. 2 в относительных единицах приведены пространственные зависимости модуля приведенного переходного импеданса $Z_{PH}(r)$, измеренные на частотах 30, 40, 60 кГц для излучателя и гидрофона, выполненных конструктивно в виде пьезоэлектрических сфер диаметром 7 мм на тон-

ком электрическом кабеле. При измерениях $Z_{PH}(r)$ на кабеле гидрофона на расстоянии 250 мм по вертикали от активного элемента закреплялся отражатель в виде полый сферы диаметром 30 мм. Дистанции между преобразователями изменялись от 440 мм до 1540 мм. Представленные на рис. 2 значения зависимостей $Z_{PH}(r)$ выражены в % относительно величин Z_{PH_0} , которые в свою очередь измерялись для каждой частоты в отсутствии отражателя на кабеле гидрофона.

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что с увеличением расстояния между преобразователями разность расстояний $\Delta r = r_{PR} - r_{PH}$ от излучателя P до отражателя R и от излучателя P до приемника H уменьшается. Соответственно изменяется разность фаз прямой и отраженной акустических волн, суммирующихся в точке расположения приемника H . При перемещении излучателя из начального положения в бесконечно удаленную точку приведенный переходной импеданс на частоте f претерпевает $\frac{\Delta r_1}{\lambda}$ колебаний с убывающей пространственной периодичностью (λ – длина волны акустического сигнала). При $r_{PH} \gg \frac{r_{RH}^2}{\lambda}$ модуль приведенного переходного импеданса стремится к постоянной величине:

$$Z_{PH_\infty} = \lim_{r_{PH} \rightarrow \infty} (Z_{PH}(r)) = Z_{PH_0} \sqrt{(1 + 2w_R \cos(kr_{RH} + \varphi_R))}. \quad (5)$$

Для чувствительности на прием M_H гидрофона как системы, состоящей из точечного активного элемента и точечного отражателя, можем записать:

$$M_H = M'_H \sqrt{(1 + 2w_R \cos(kr_{RH} + \varphi_R))}.$$

Аналогичное соотношение справедливо и для чувствительности на излучение S_P излучателя в случае, если гидрофон точечный и отражатель сосредоточен на излучателе:

$$S_P = S'_P \sqrt{(1 + 2w_R \cos(kr_{RH} + \varphi_R))}.$$

Использование для расчета чувствительности гидрофона значений электрических переходных импедансов, определенных при произвольно выбранных расстояниях между преобразователями, приводит к существенной погрешности результата. Как видно из рис. 2, отличие значений приведенного переходного импеданса от величины Z_{PH_∞} может достигать двойной амплитуды огибающей, что составляет примерно 7% на частоте 30 кГц и 6% на частоте 40 кГц.

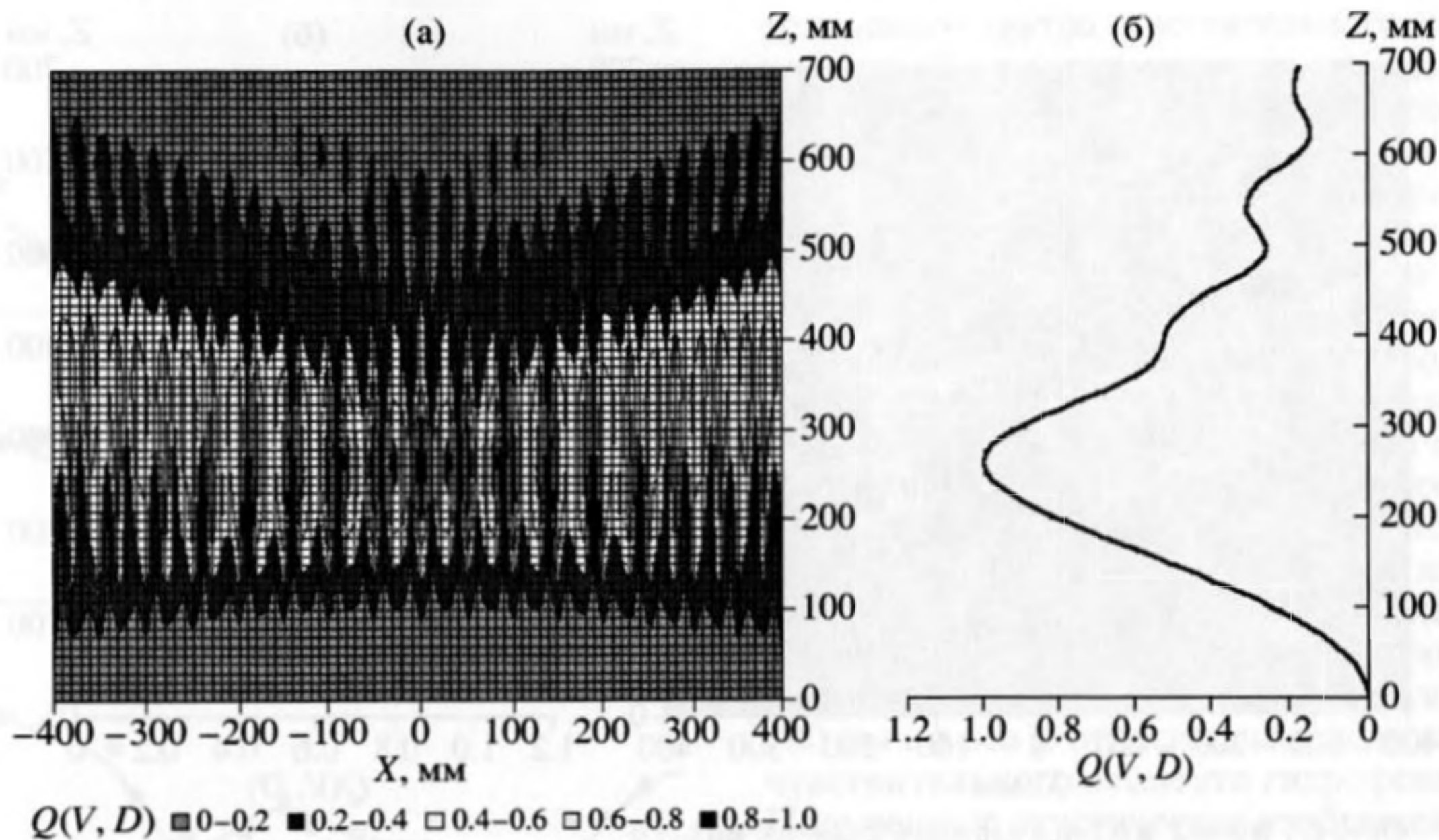


Рис. 3. Акустическое изображение отражателя на частоте 30 кГц (а) и значения функционала $Q(V, D)$ при $x = 0$ (б).

Покажем, каким образом информация о пространственной зависимости приведенного переходного импеданса $Z_{PH}(r)$ может быть использована для определения Z_{PH_0} и Z_{PH_-} .

Вначале рассмотрим задачу определения координат отражателя. Для ее решения воспользуемся следующим приемом. Предположим, что для набора расстояний r_{PH_i} ($i = 1, \dots, N$) известны значения квадрата модуля приведенного переходного импеданса $Z_{PH}^2(r)_i$. Поместим виртуальный точечный отражатель V с единичным коэффициентом отражения в некоторую точку плоскости с координатами (x_V, z_V) (см. рис. 1). Определим для виртуального отражателя V на апертуре $D \in (r_{PH_i}, i = 1, \dots, N)$ функционал $Q(V, D)$ следующим образом:

$$Q(V, D) = \frac{1}{\|h(V, D)\|} \sqrt{(Q'(V, D))^2 + (Q''(V, D))^2}, \quad (6)$$

где:

$$Q'(V, D) = \sum_{i=1}^N \kappa_i y_V(r_{PH_i}) \cos(k\vartheta_{V_i}),$$

$$Q''(V, D) = \sum_{i=1}^N \kappa_i y_V(r_{PH_i}) \sin(k\vartheta_{V_i}),$$

$$\kappa_i = \frac{Z_{PH}^2(r)_i}{Z_{PH_0}^2} - 1,$$

$$\vartheta_{V_i} = r_{PV_i} - r_{PH_i} + r_{VH},$$

(V, D) – нормирующая функция.

Нетрудно убедиться, что функционал $Q(V, D)$ имеет глобальный максимум в точке с координатами $(x_V = x_R, z_V = z_R)$. Следовательно, сканируя виртуальным отражателем V участок плоскости $x_V \in (x_R - a, x_R + a)$, $z_V \in (z_R - b, z_R + b)$ в предполагаемой области расположения отражателя R и отображая для каждого положения отражателя V значения функционала $Q(V, D)$ градациями яркости, получим изображение отражателя R в виде яркого пятна на пересечении двух лучей в точке с координатами (x_R, z_R) .

На рис. 3а, 4а, 5а приведены акустические изображения отражателя на частотах 30, 40, 60 кГц, полученные по пространственным зависимостям приведенных переходных импедансов, представленных на рис. 2. При вычислениях функционала (6) использовалось приближение:

$$Z_{PH_0} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{PH}(r)_i. \quad (7)$$

Виртуальным отражателем сканировалось пространство в пределах от -400 до $+400$ мм по оси X и от 0 до 700 мм по оси Z относительно центра активного элемента излучателя. На рис. 3б, 4б, 5б приведены графики значений функционала $Q(V, D)$ на оси Z . На всех трех изображениях функционал $Q(V, D)$ достигает максимума в одной и той же области пространства, близкой к точке с координатами $(0, 250)$, что хорошо согласуется с экспе-

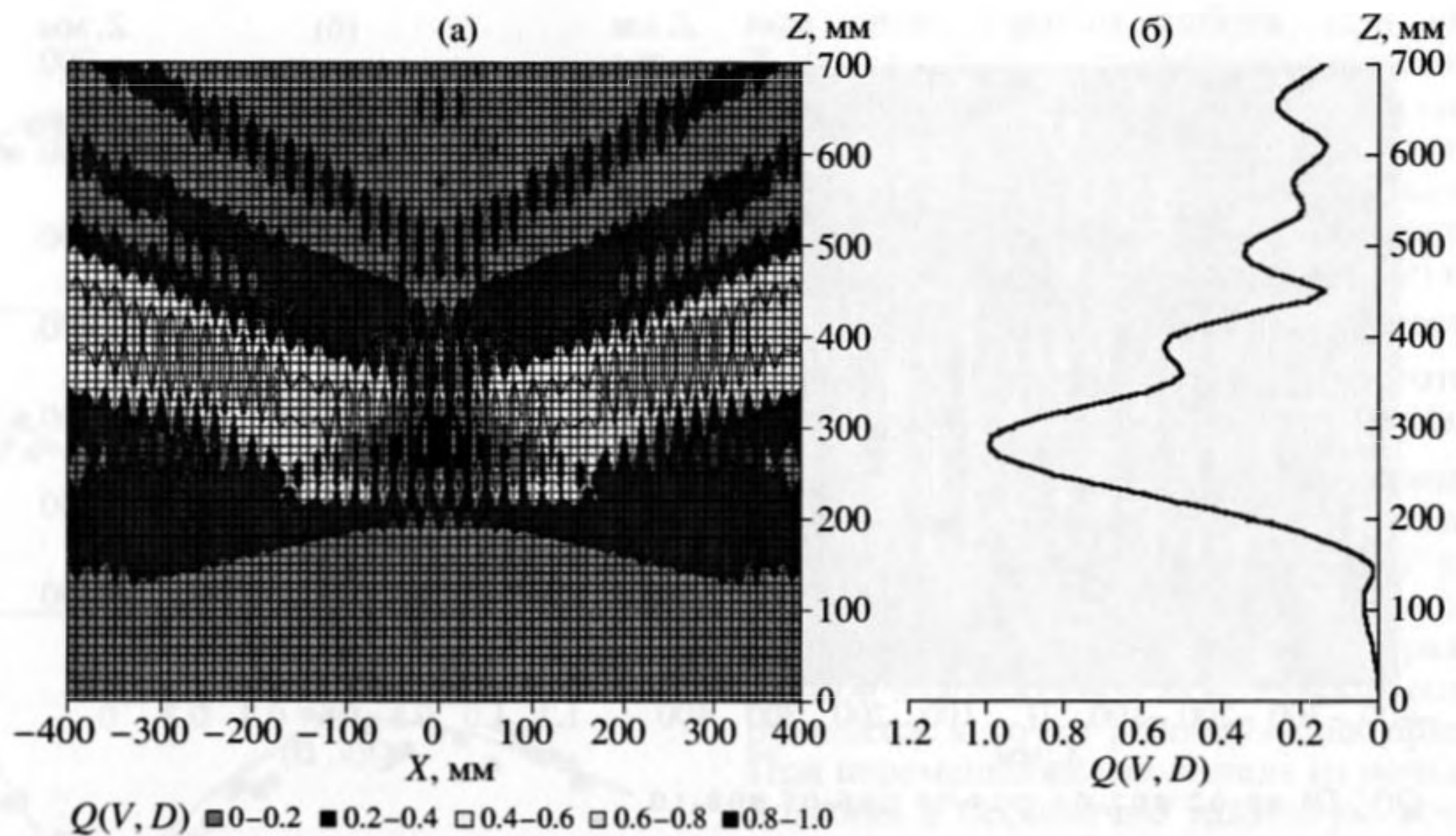


Рис. 4 Акустическое изображение отражателя на частоте 40 кГц (а) и значения функционала $Q(V, D)$ при $x = 0$ (б).

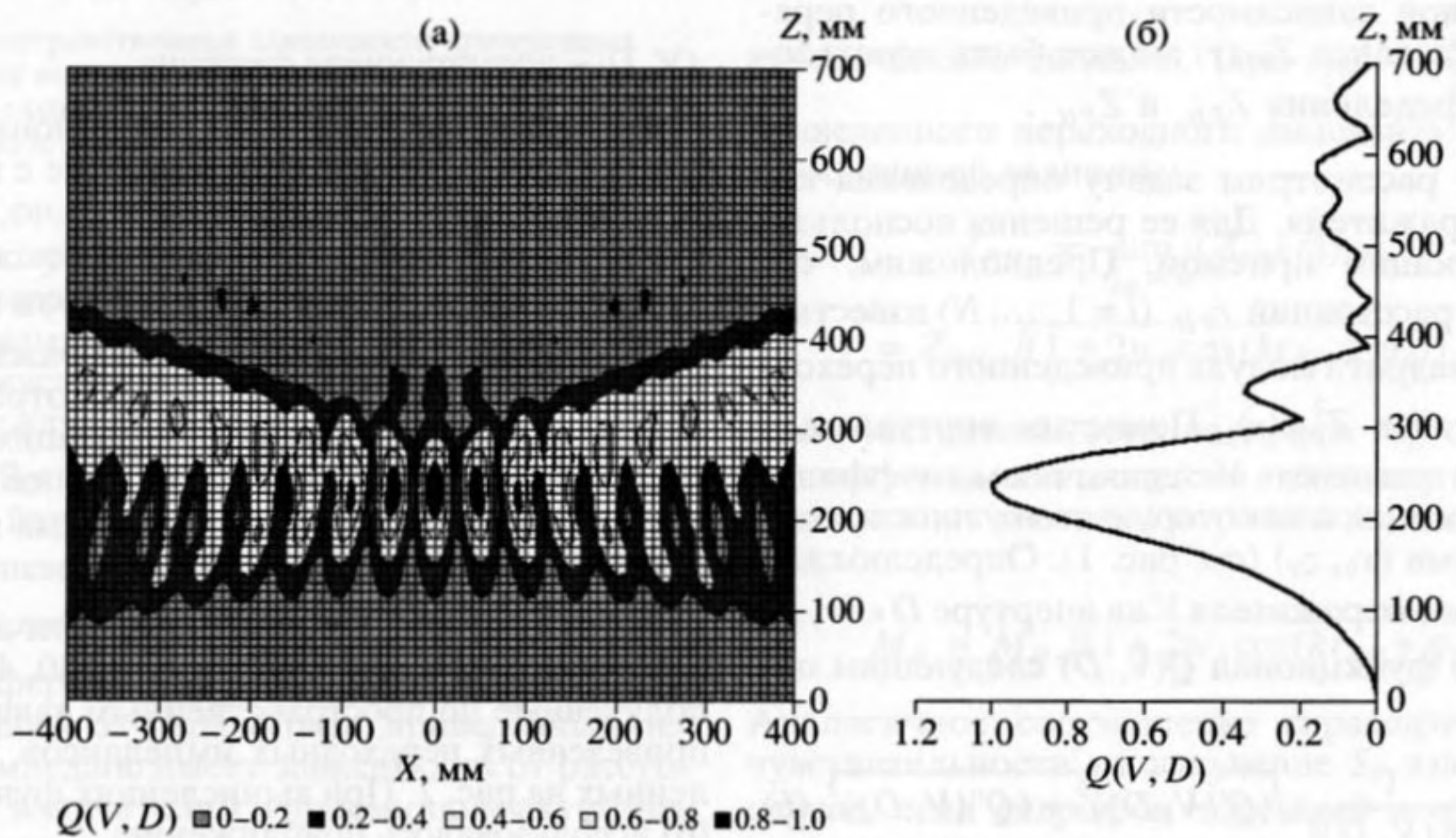


Рис. 5. Акустическое изображение отражателя на частоте 60 кГц (а) и значения функционала $Q(V, D)$ при $x = 0$ (б).

риментом и свидетельствует об устойчивости способа.

Предложенный способ был применен для восстановления отражающей поверхности градуируемого гидрофона. На рис. 6 в относительных единицах точками приведены значения пространственных зависимостей модуля приведенного переходного импеданса $Z_{pH}(r)$, определенные экспериментально для гидрофона B&K 8104 на час-

тотах 40, 60, 120 кГц. Значения $Z_{pH}(r)$ представлены в % относительно величин Z_{pH_0} , в качестве которых для каждой частоты использовалась оценка, полученная по формуле (7). При измерениях расстояния между гидрофоном и излучателем изменялись в диапазоне от 480 мм до 800 мм. Гидрофон устанавливался вертикально в гидроакустическом бассейне на глубине 3 м и крепился за кабель к двум тонким титановым струнам с по-

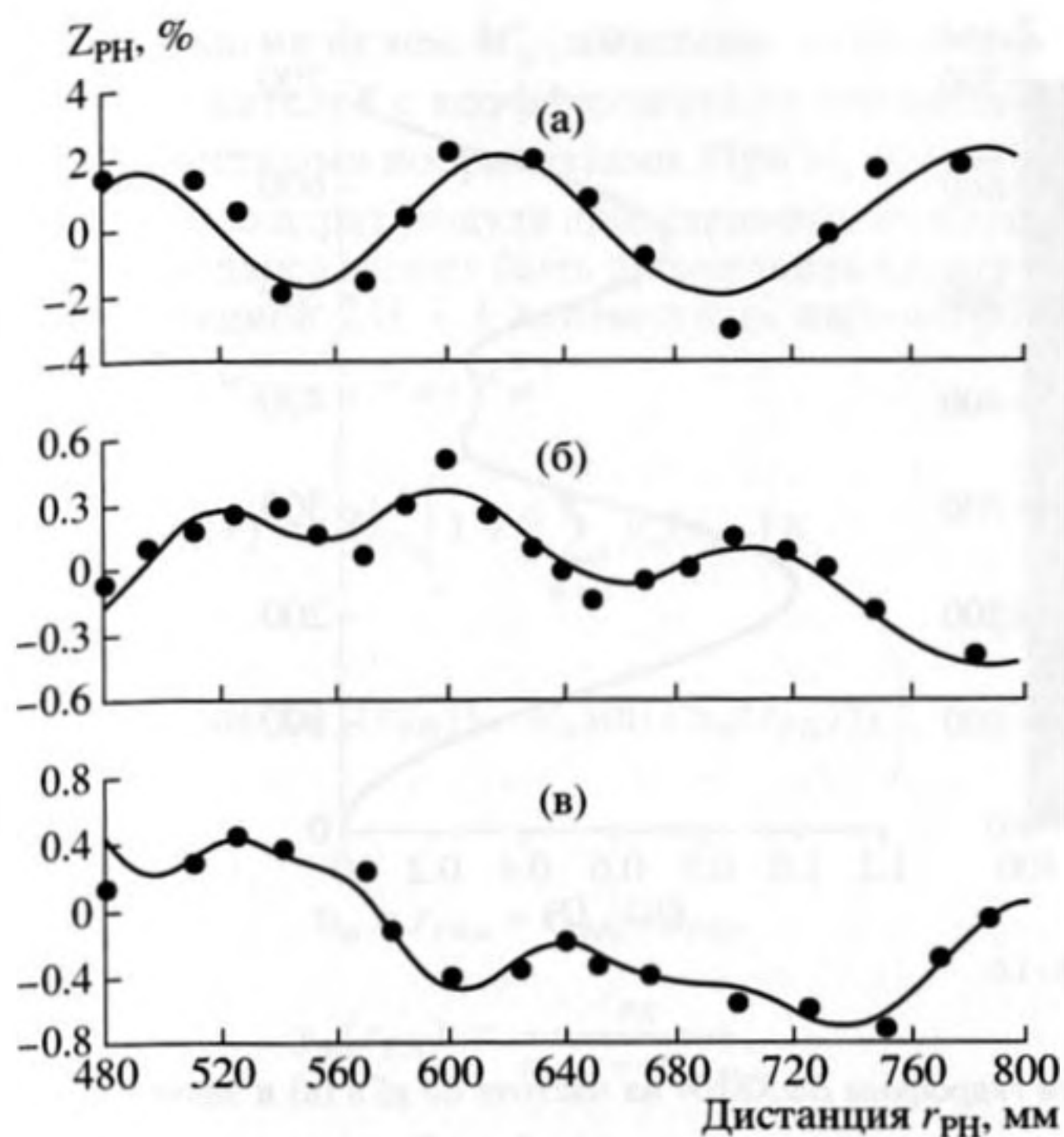


Рис. 6. Пространственные зависимости приведенных переходных импедансов сферического излучателя и гидрофона B&K8104 на частотах 30 (а), 40 (б), 60 (в) кГц. Точки – эксперимент, линии – модель.

мощью зажима из пластика, обладающего значением ρ_c близким к значению ρ_c воды. Наибольший размер зажима не превышал 50 мм. Зажим фиксировался на расстоянии 550–570 мм от геоме-

трического центра чувствительного элемента гидрофона. В качестве излучателей использовались пьезоэлектрические сферы диаметром 20 мм (на частоте 40 кГц) и 7 мм (на частотах 60 и 120 кГц). Временная селекция сигналов, отраженных от границ гидроакустического бассейна, обеспечивалась радиоимпульсным режимом измерений. Длительность радиоимпульсов составляла не более 50 периодов несущей частоты. Положение геометрического центра активного элемента гидрофона B&K 8104 принималось за начало координат. Экспериментальные зависимости модуля приведенного переходного импеданса использовались для получения акустических изображений отражающей поверхности гидрофона. Виртуальным точечным отражателем сканировалось пространство в пределах ± 400 мм по оси X и от 0 до 700 мм по оси Z относительно положения центра чувствительного элемента гидрофона B&K 8104. Полученные акустические изображения приведены на рис. 7а–9а. На рис. 7б–9б приведены графики значений функционала $Q(V, D)$ в пределах от 0 до 700 мм по оси Z (проходящей через корпус, кабель и зажим гидрофона). Из рис. 7 видно, что на частоте 40 кГц корпус и кабель гидрофона можно считать акустически прозрачными. Яркое пятно, соответствующее максимуму функционала $Q(V, D)$ в точке (0, 560), представляет собой акустическое изображение зажима. Как видно из рис. 8 на частоте 60 кГц функционал сохраняет экстремум в точке (0, 560), однако корпус и кабель гидрофона теряют свойство акустической прозрачности и начинают проявлять себя как дополнительный отражатель, расположенный на расстоянии 230 мм

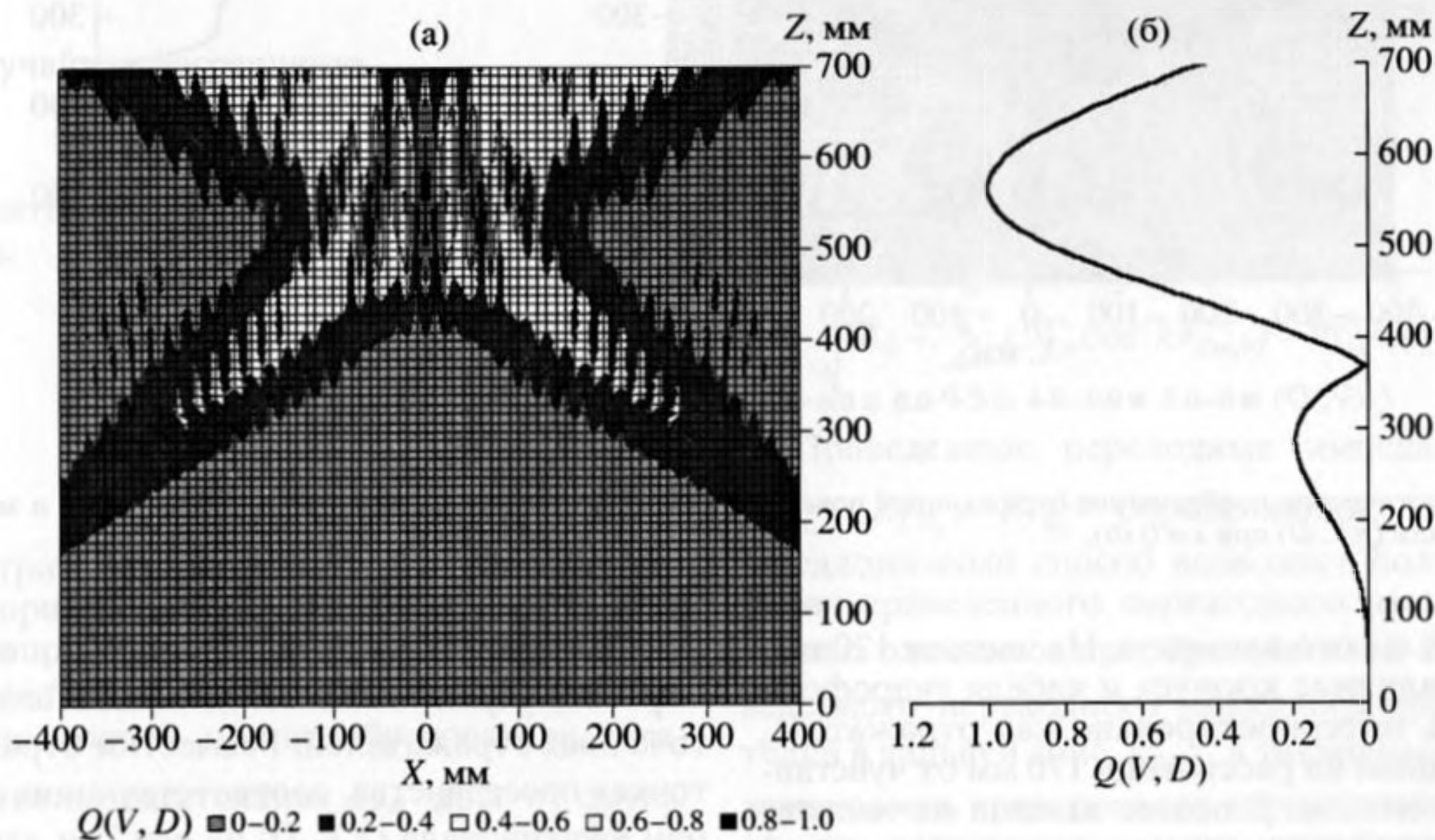


Рис. 7. Акустическое изображение отражающей поверхности гидрофона B&K8104 на частоте 40 кГц (а) и значения функционала $Q(V, D)$ при $x = 0$ (б).

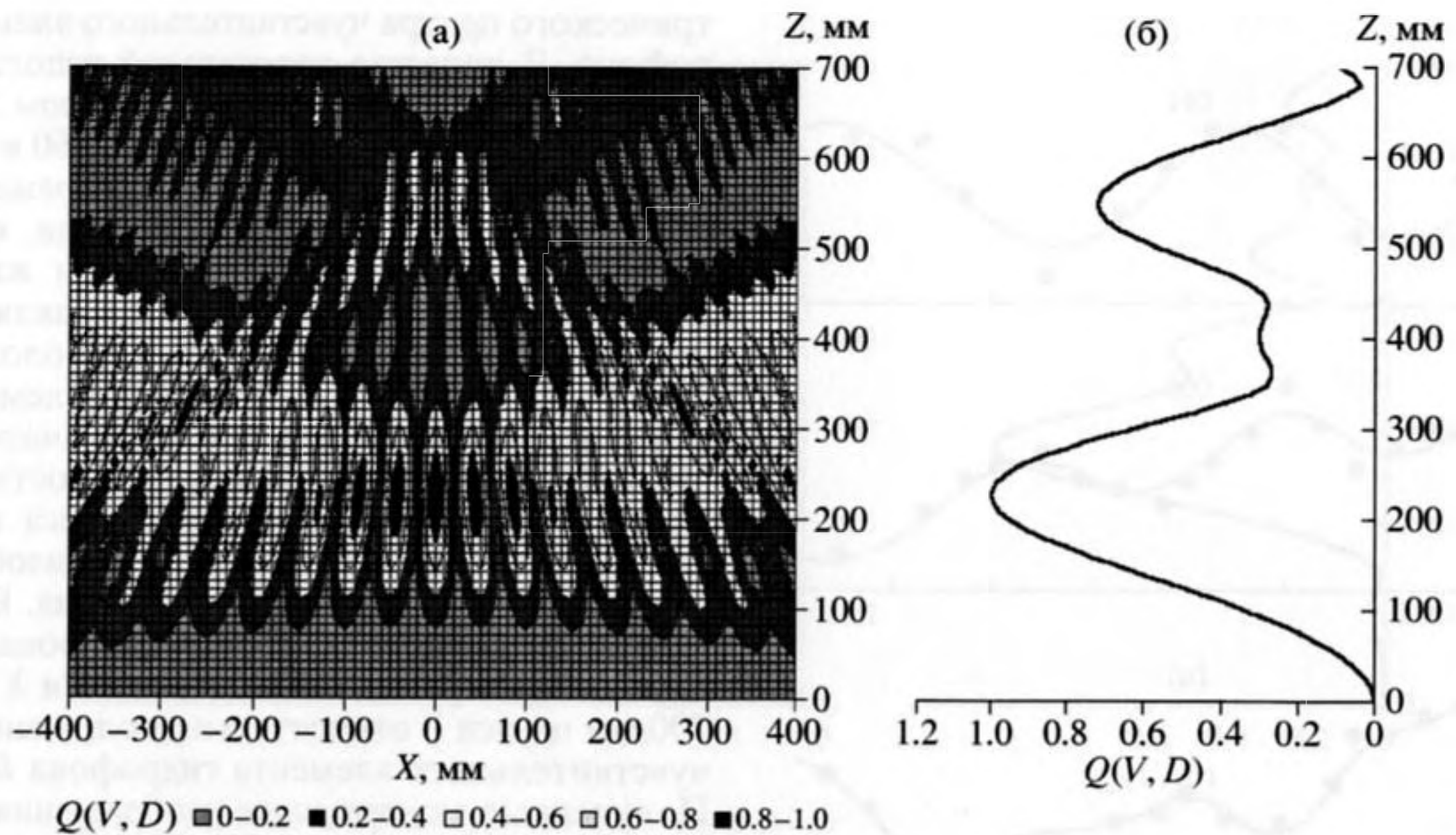


Рис. 8. Акустическое изображение отражающей поверхности гидрофона B&K8104 на частоте 60 кГц (а) и значения функционала $Q(V, D)$ при $x = 0$ (б).

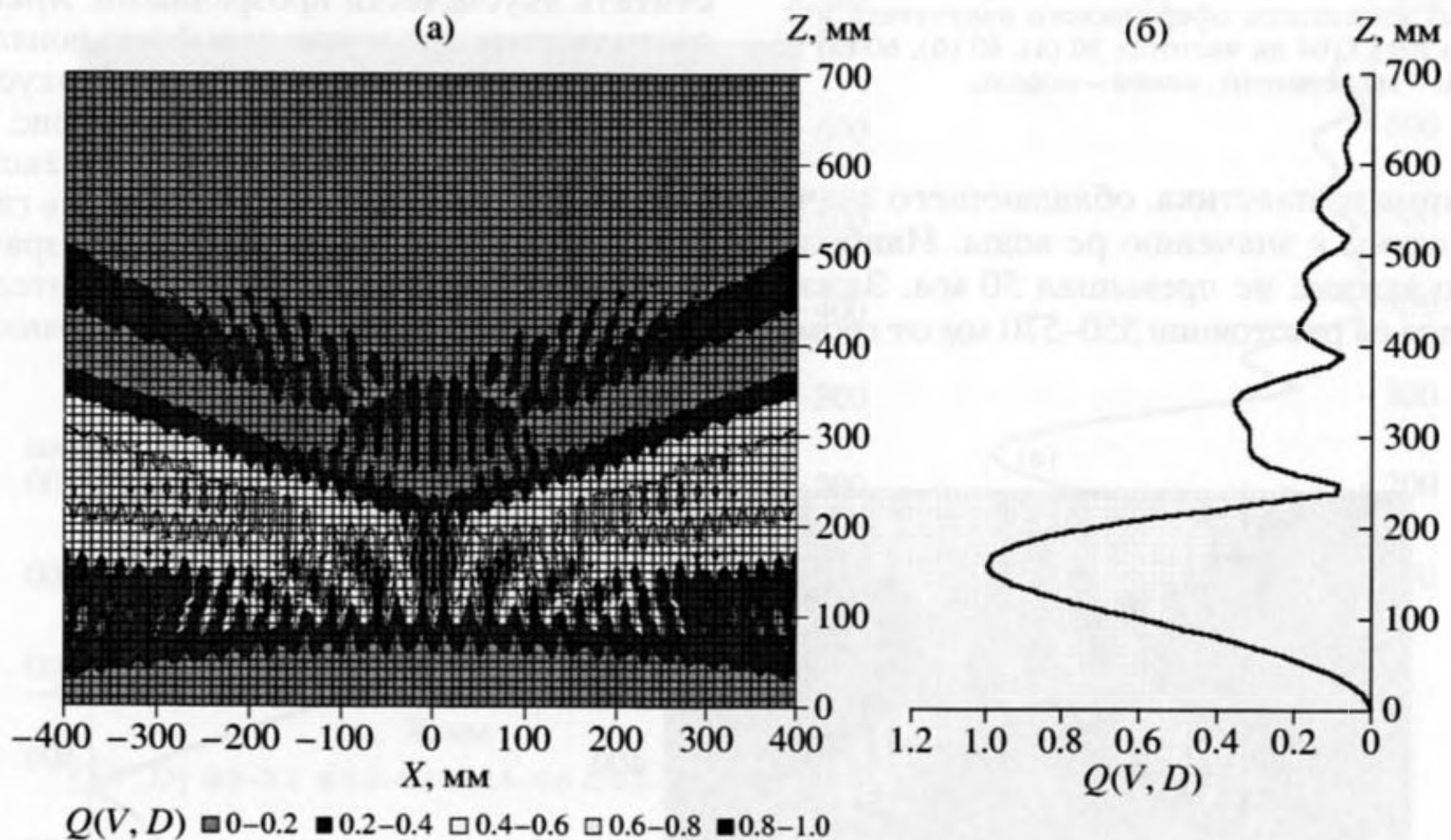


Рис. 9. Акустическое изображение отражающей поверхности гидрофона B&K8104 на частоте 120 кГц (а) и значения функционала $Q(V, D)$ при $x = 0$ (б).

от чувствительного элемента. На частоте 120 кГц (см. рис. 9) влияние корпуса и кабеля гидрофона может быть интерпретировано как отражатель, расположенный на расстоянии 170 мм от чувствительного элемента. Влияние зажима на частоте 120 кГц не проявляется, вследствие временной селекции прямого и отраженного зажимом сигналов.

Полученные изображения удобно аппроксимировать упрощенными моделями в виде набора точечных отражателей. Разместим отражатели в точках пространства, соответствующих максимумам функционала $Q(V, D)$ на оси Z , и для каждой частоты получим упрощенную модель гидрофона в виде точечного активного элемента с чувстви-

тельностью на прием M'_H , и системы из M точечных отражателей с коэффициентами отражения \dot{w}_m и известными координатами. При $w_m \ll 1$ ($m = 1, \dots, M$) квадрат модуля приведенного переходного импеданса может быть представлен следующей функцией $2M + 1$ неизвестных параметров $Z_{PH_0}, w'_1, w''_1, \dots, w'_M, w''_M$:

$$Z_{PH}^2(r) = Z_{PH_0}^2 \left(1 + 2 \sum_{m=1}^M y_m(r_{PH}) \times \right. \\ \left. \times (w'_m \cos(kv_m(r_{PH})) - w''_m \sin(kv_m(r_{PH}))) \right), \quad (8)$$

где:

$$v_m = r_{PRm} + r_{RmH} - r_{PH}, \\ y_m(r_{PH}) = \frac{r_{PH}}{r_{PRm} + r_{RmH}},$$

$$w'_m = \text{Re}(\dot{w}_m), \quad w''_m = \text{Im}(\dot{w}_m), \quad m = 1, \dots, M.$$

Нетрудно убедиться, что задача определения неизвестных в выражении для $Z_{PH}^2(r)$ сводится к хорошо изученной задаче оптимальной линейной фильтрации для уравнения измерения вида:

$$\mathfrak{R}_0 + \sum_{m=1}^M \mathfrak{R}'_m y_m(r_{PH_i}) \cos(kv_m(r_{PH_i})) - \\ - \sum_{m=1}^M \mathfrak{R}''_m y_m(r_{PH_i}) \sin(kv_m(r_{PH_i})) = \mathfrak{S}_i + \epsilon_i,$$

где: ϵ_i – случайная погрешность,

$$\mathfrak{S}_i = Z_{PH}^2(r)_i,$$

а компоненты вектора неизвестных параметров имеют вид:

$$\mathfrak{R}_0 = Z_{PH_0}^2, \\ \mathfrak{R}'_m = 2w'_m Z_{PH_0}^2, \\ \mathfrak{R}''_m = 2w''_m Z_{PH_0}^2.$$

Рассмотрим подробнее случай оценивания параметров приведенного переходного импеданса с учетом неопределенности δ в расстояниях между центрами активных элементов преобразователей r_{PH_i} . Предположим, что преобразователи устанавливаются на расстояниях d_{PH_i} друг от друга, значения которых выбраны произвольным образом, но определяются однозначно (например, как расстояние между точками подвеса гидрофона и

излучателя). Учитывая, что $\delta = d_{PH_i} - r_{PH_i}$, в предположении, что $\delta \ll d_{PH_i}$, получим следующее выражение для $Z_{PH}^2(d)$:

$$Z_{PH}^2(d) = Z_{PH}^2(r) + 2 \frac{\delta}{d_{PH} - \delta} Z_{PH}^2(r).$$

Тогда уравнение измерения можно записать в виде, удобном для решения методом итераций:

$$\mathfrak{R}_0 + \sum_{m=1}^M \mathfrak{R}'_m y_m(d_{PH_i} - \delta) \cos(kv_m(d_{PH_i} - \delta)) - \\ - \sum_{m=1}^M \mathfrak{R}''_m y_m(d_{PH_i} - \delta) \sin(kv_m(d_{PH_i} - \delta)) + \\ + \tilde{\delta} \frac{2\mathfrak{S}_i}{d_{PH_i}} = \mathfrak{S}_i + \eta_i, \quad (9)$$

$$\text{где: } \mathfrak{S}_i = Z_{PH}^2(d)_i, \quad \eta_i = \frac{(r_i - \delta)}{r_i} \epsilon_i.$$

На первой итерации оценки $\mathfrak{R}_0, \mathfrak{R}'_1, \mathfrak{R}''_1, \dots, \mathfrak{R}'_M, \mathfrak{R}''_M, \tilde{\delta}$ вычисляются в предположении $\delta = 0$. На последующих итерациях решения уравнения (9) находят при подстановке вместо δ значения $\tilde{\delta}$, полученного на предыдущей итерации. В качестве простого критерия останова можно использовать “сходимость” оценок $\tilde{\delta}$ к постоянной величине.

После завершения итерационной процедуры значения Z_{PH_0} и Z_{PH_∞} рассчитываются по формулам:

$$Z_{PH_0} = \sqrt{\mathfrak{R}_0},$$

$$Z_{PH_\infty} =$$

$$= \sqrt{\mathfrak{R}_0 + \sum_{m=1}^M (\mathfrak{R}'_m \cos(kr_{RmH}) - \mathfrak{R}''_m \sin(kr_{RmH}))}.$$

Приведенные переходные импедансы $Z_{PT_0}, Z_{PT_\infty}, Z_{TH_0}, Z_{TH_\infty}$ определяются аналогично. Предложенный способ позволяет получать значения приведенного переходного импеданса активных элементов преобразователей Z_{PH_0} и приведенного переходного импеданса преобразователей в дальней зоне Z_{PH_∞} , а также рассчитывать зависимость приведенного переходного импеданса от расстояния между преобразователями $Z_{PH}(r)$. На рис. 2 и рис. 6 непрерывными линиями изображены аппроксимации пространственных

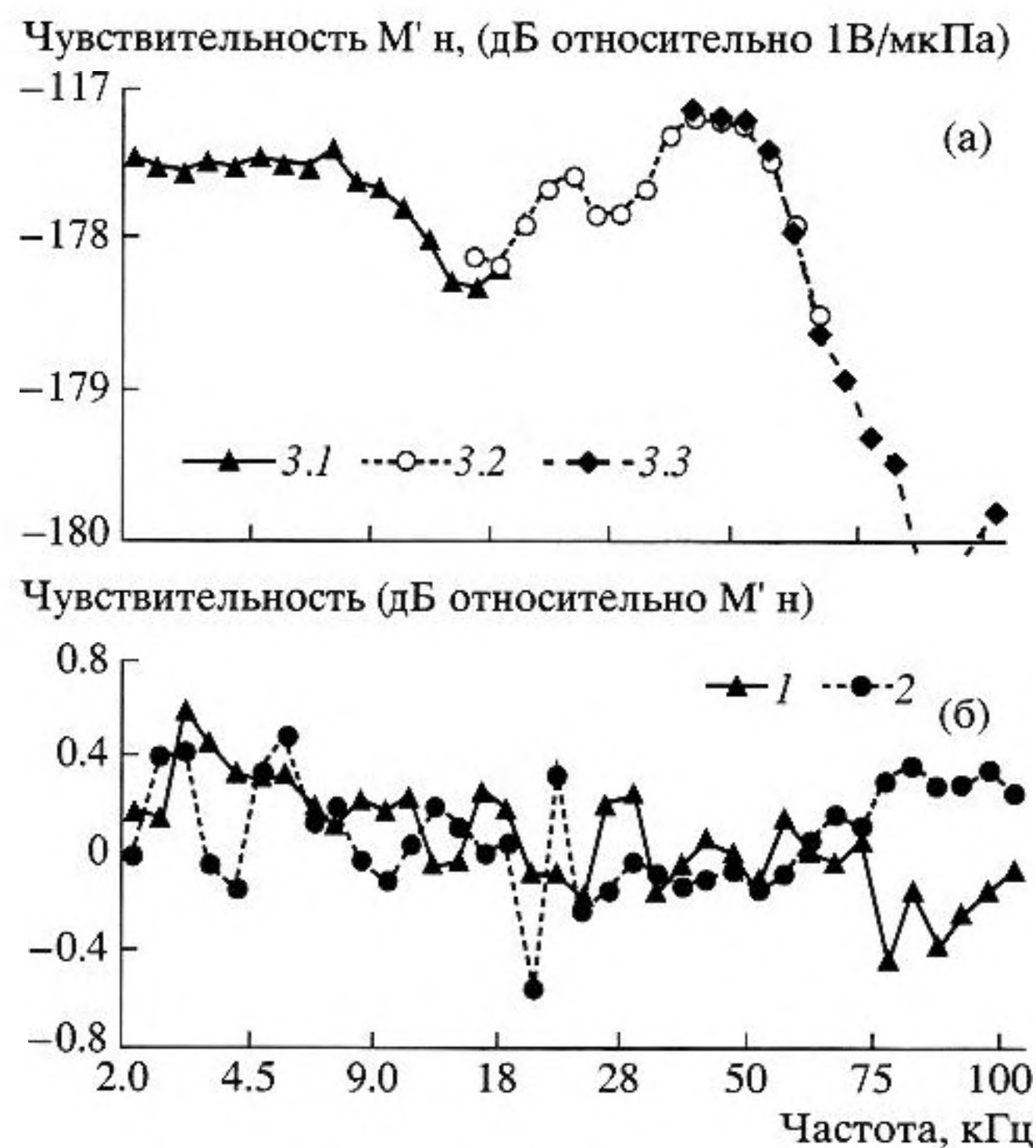


Рис. 10. Результаты градуировок гидрофона *H 52-50* в свободном поле с использованием предлагаемой процедуры (а) и по традиционной методике (б).

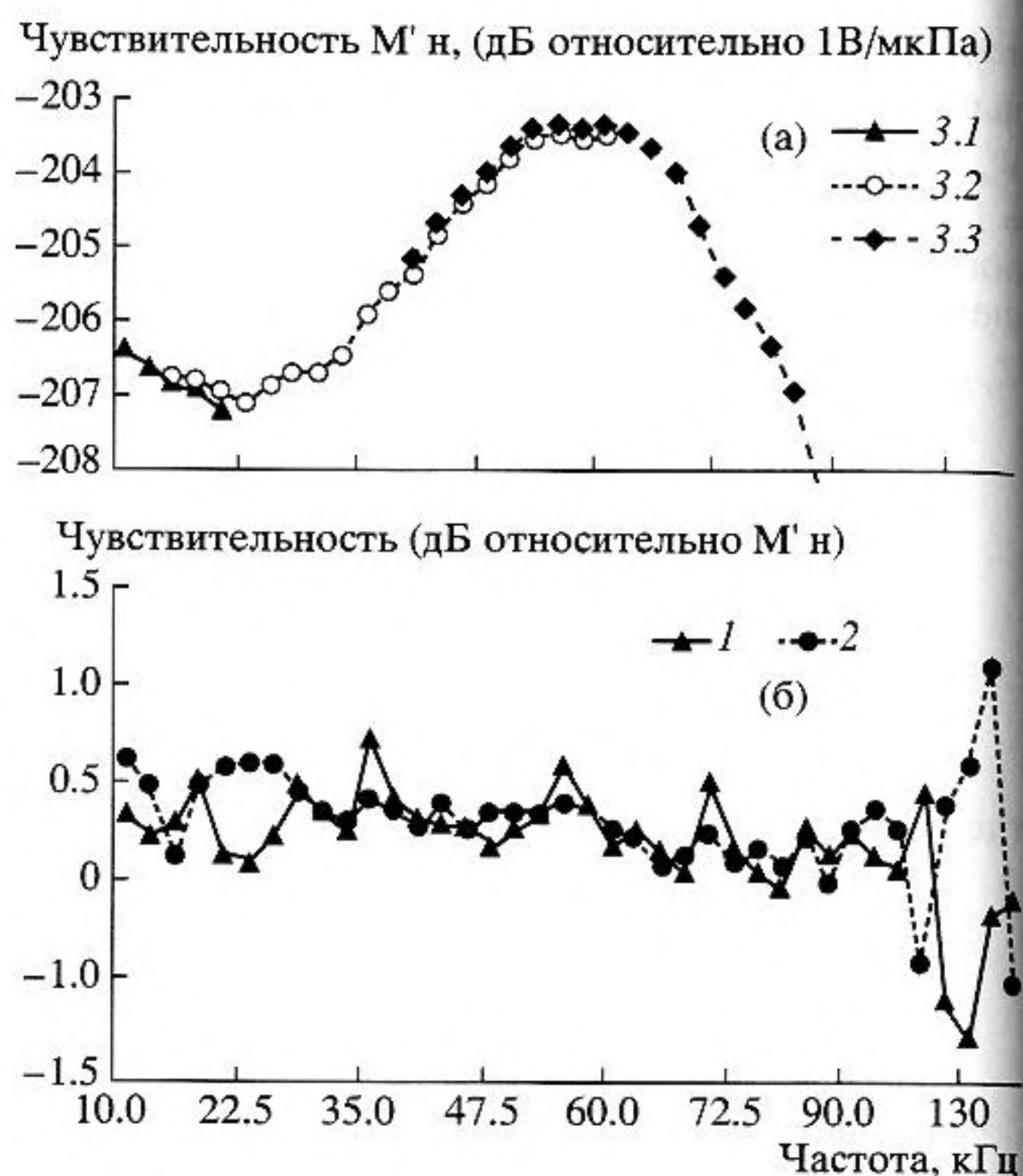


Рис. 11. Результаты градуировок гидрофона *B&K 8104* в свободном поле с использованием предлагаемой процедуры (а) и по традиционной методике (б).

зависимостей приведенных переходных импедансов, рассчитанные с использованием уравнения (8) после подстановки в него оценок неизвестных параметров, полученных в результате решения уравнения измерения. Представленные аппроксимации, полученные при использовании моделей отражающей поверхности гидрофонов в виде набора точечных отражателей, показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными.

После того, как значения Z_{PH_0} , Z_{PH_∞} , Z_{PT_0} , Z_{PT_∞} , Z_{TH_0} , Z_{TH_∞} определены, чувствительность на прием активного элемента градуируемого гидрофона M'_H рассчитывают по формуле:

$$M'_H = \left(\frac{2r_0 Z_{PH_0} Z_{TH_0}}{pf Z_{PT_0}} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Формула для расчета чувствительности гидрофона M_H с учетом влияния его конструкции приобретает следующий вид:

$$M_H = \left(\frac{2r_0 Z_{PH_\infty} Z_{TH_\infty}}{pf Z_{PT_\infty}} \right)^{1/2}.$$

На рис. 10а и рис. 11а приведены результаты градуировок гидрофонов *H 52-50* и *B&K 8104* в свободном поле, выполненных в лабораторном гидроакустическом бассейне рассмотренным вы-

ше способом. Кривыми 3.1, 3.2, 3.3 представлены значения M'_H , полученные по формуле (10) в трех частотных поддиапазонах, в каждом из которых применялись различные типы вспомогательных преобразователей и обеспечивались зоны перекрытия частот градуировки (см. области перекрытия кривых 3.1, 3.2, 3.3). Для гидрофона *H 52-50* частотные поддиапазоны составляли 2–20 кГц (кривая 3.1), 16–65 кГц (кривая 3.2) и 40–100 кГц (кривая 3.3). Для гидрофона *B&K 8104* частотные поддиапазоны составляли 10–20 кГц (кривая 3.1), 15–60 кГц (кривая 3.2) и 40–150 кГц (кривая 3.3). Частоты перекрытия выбирались на участках, в которых зависимость чувствительности градуируемых гидрофонов от частоты имеет явно выраженные особенности. Результаты градуировки, полученные с использованием различных типов вспомогательных преобразователей, различаются на частотах перекрытия не более чем на 0.07 дБ для гидрофона *H 52-50* и не более чем на 0.16 дБ для гидрофона *B&K 8104* (в зонах частотного перекрытия кривые 3.1, 3.2, 3.3 на рис. 10а и 11а практически совпадают). Полученные для обоих гидрофонов частотные зависимости M'_H являются достаточно “гладкими”, изменяющимися монотонно, и в отличие от результатов, характерных для традиционной методики градуировки, не содержат скачкообразных флуктуаций на со-

седних частотах, что свидетельствует о достоверности полученных результатов и корректности предложенной процедуры. Результаты градуировок, выполненных по традиционной методике с использованием формулы (1), представлены на рис. 10б и 11б в дБ относительно значений M'_H кривыми 1 и 2. Кривые 1 и 2 получены на двух различных эталонных установках, реализующих стандартную процедуру метода взаимности в свободном поле. Результаты, представленные кривыми 2, получены при фиксированных расстояниях между преобразователями. Кривые 1 представляют результаты градуировок, при которых электрические переходные импедансы определялись как среднее значение результатов измерений, выполненных на двух различных расстояниях между преобразователями. Значения чувствительности гидрофонов, полученные для обеих установок, существенно отличаются от значений M'_H . Различия в результатах достигают 0.6 дБ для гидрофона H 52-50 и 1.2 дБ для гидрофона B&K 8104. Поведение кривых 1 и 2 на рис. 10б и 11б имеет нерегулярный характер и проявляет влияние погрешностей измерений, обусловленных искажениями акустического поля в гидроакустическом бассейне. Вывод особенно очевиден для гидрофона H 52-50 в области низких частот, где

частотная характеристика чувствительности имеет равномерный участок (см. рис. 10а).

Проведенные исследования показали, что предложенная процедура позволяет в значительной мере уменьшить погрешности, обусловленные искажениями акустического поля, а также неопределенностью расстояний между центрами активных элементов преобразователей. Можно ожидать также, что предложенная процедура позволит существенно ослабить ограничения, накладываемые размерами гидроакустических бассейнов, при градуировке средств гидроакустических измерений больших габаритов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Isaev A.E.* Precise calibration of hydrophones in laboratory water tank. *Proc. Institute of Acoustics, UK*. V. 25. Pt 1. 2003.
2. Calibration of hydrophones, IEC STANDARD Publication 565, Geneva, International Electrotechnical Commission, 1977.
3. *Еняков А.М., Лихачев С.М., Платонов В.А.* (Россия), Юань Вэнчжун, Ван Ю Бин, Ли Чжун Квин (Китай). Сличения результатов градуировок гидрофонов на эталонах России и Китая. *Измерительная техника*, № 6. 2000. С. 63-67.
4. *Rasmussen K.* "Acoustic center of Condenser Microphones", The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark. Report no. 5, 1973.

Reduction of the Error of Hydrophone Calibration with Respect to the Field in a Hydroacoustic Tank by the Reciprocity Method

A. E. Isaev, A. N. Matveev, V. A. Smelov, and A. I. Shchelkunov

State Metrological Center of Hydroacoustic Measurements, All-Russia Scientific Research Institute for Physical-Technical and Radio-Technical Measurements, Mendeleevo, Moscow oblast, 141570 Russia

e-mail: Isaev@vniiftri.ru

Abstract—A hydrophone calibration procedure that considerably reduces the error caused by the acoustic field distortions in a hydroacoustic tank is proposed. The procedure is based on the definition of the reduced electric transfer impedances of transducers (i.e., the electric transfer impedances reduced to the spherical wave propagation law) and consists in measuring the electric transfer impedances for different distances between hydroacoustic transducers. The sensitivity of the hydrophone under calibration is calculated from the far-field values of the reduced electric transfer impedances. The latter are determined using a mathematical model of the hydrophone in the form of a system that contains a point sensing element and a finite number of point sources of acoustic signals (point reflectors). A method of determining the number and coordinates of the point reflectors from the analysis of the acoustic "images" of hydrophone's reflecting surface is proposed. The measuring technique, the algorithms of mathematical processing, and the results of experimental studies are considered. A comparative analysis of the results of the hydrophone calibration with respect to the field by the reciprocity method is performed for the cases of using the conventional technique and the proposed method.