АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 5

УДК 534.231

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НЕНАПРАВЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА В СЛОЕ ПРЕСНОГО ВОДОЕМА

М. Д. Бронтвейн, Л. Н. Захаров, С. А. Ильин, Т. Н. Шуринова

Рассмотрен метод определения производительности ненаправленного, малого по сравнению с длиной волны, источника звука в плоском слое с неидеальной границей на основе измерения полного потока акустической мощности. Приведены результаты таких измерений в условиях пресноводного водохранилища в случае испытания электродинамического излучателя.

При градуировке излучателей и звукоприемников, как правило, стремятся создать условия свободного поля. Однако с понижением частоты это приводит к существенным затруднениям и практически приходится проводить работы в ограниченных акваториях, где необходим учет влияния границ. Градуировка излучателей в ограниченных средах представляет более трудную задачу, чем градуировка звукоприемников. Основной характеристикой ненаправленных пульсирующих источников звука, размеры которых малы по сравнению с длиной волны, является производительность (объемная скорость). Акустическая модель таких источников представляется в виде малой (по сравнению с длиной волны) пульсирующей сферы (монополя) с эквивалентной объемной скоростью, определяемой, например, из равенства звукового давления источника и его модели в волновой зоне.

При определении производительности источников звука в условиях ограниченных сред необходимо учитывать влияние границ как на звуковое поле, так и на работу самого источника. Учет влияния границ на звуковое поле монополя (с постоянной объемной скоростью) для случая глубокого моря и слоя с абсолютно отражающими границами, проведенный в рамках лучевой акустики, содержится в работах [1, 2].

Для определения влияния границ на работу источника необходимо знать его механический импеданц, особенности конструкции и механизм, выравнивающий действие статического давления. Однако для целого ряда излучателей, обладающих высоким механическим импеданцем, действием границ на их работу можно пренебречь. Это, в первую очередь, относится к широко распространенным низкочастотным источникам с механическим приводом.

В рамках данной работы мы рассмотрим способ определения производительности ненаправленных пульсирующих, малых по сравнению с длиной волны, источников звука в слое пресного водоема с неидеальной нижней границей на частотах, длина волны которых соизмерима с глубиной водоема. Акустическую модель таких источников представим в виде монополя.

Процедура наших измерений в соответствии с работой [3] состоит в определении полного потока мощности источника через замкнутую по-

верхность. Эта поверхность может быть расположена в непосредственной близости от источника, что практически исключает влияние помех и неоднородностей среды на точность измерений. Если пренебречь потерями в среде, окружающей источник, то в этом случае полный поток акустической энергии будет равен акустической мощности, излучаемой источником. Учитывая это, представим выражение, определяющее акустическую мощность источника, согласно работе [3], в виде

$$W_{\text{ак}}=\frac{\omega\rho}{8\pi}Q[\operatorname{Im}\Phi]_{s=s_{\text{ист}}}=\frac{\omega\rho}{8\pi}Q^2[\operatorname{Im}\Psi]_{s=s_{\text{ист}}}, \tag{1}$$

где ω — круговая частота, ρ — плотность среды, Q — производительность, $\Phi=Q\Psi$ — потенциал скорости, $S_{\text{ист}}$ — координаты источника. Исходя из формулы (1) определение производительности сводится к измерению полного потока акустической мощности и расчета мнимой части потенциала в точке источника.

Для расчета $\operatorname{Im}\Psi$ воспользуемся представлением поля в слое воды в виде суммы отраженных полей [4], полагая нижнюю границу в виде полупространства, заполненного однородной жидкостью, акустические свойства которой будем характеризовать коэффициентом отражения плоской волны $V=V(\vartheta)$, где ϑ — угол падения:

$$\Psi=\sum_{l=0}\sum_{j=1}\Psi_{lj}, \tag{2}$$

$$\Psi_{lj}=ik\int_0^{\pi/2+j\infty}J_0(kr\sin\vartheta)\,e^{ikZ_{lj}\cos\vartheta}V_{lj}\sin\vartheta\,d\vartheta. \tag{3}$$

Здесь $J_0(kr\sin\vartheta)$ — функция Бесселя нулевого порядка, r — горизонтальная дальность от источника до точки наблюдения, $Z_{l1}=2lH+Z+Z_0$, $Z_{l2}=2lH+Z-Z_0$, $Z_{l3}=2(l+1)H-Z-Z_0$, $Z_{l4}=2(l+1)H-Z+Z_0$, H — глубина слоя, Z, Z_0 — возвышения соответственно источника и приемника над нижней границей слоя $V_{l1}=(-V)^l$, $V_{l2}=(-V)^{l+1}$, $V_{l3}=(-V)^l$, $V_{l4}=(-V)^{l+1}$. Верхняя граница слоя полагается плоской и акустически мягкой. Поскольку $\operatorname{Im}\Psi$ необходимо вычислить в точке расположения источника, то нас будут интересовать углы падения, близкие к нормальным.

Вычисление интеграла (3) в этом случае можно произвести асимптотически лишь в окрестности точки $\vartheta_{lj}=0$ (ϑ_{lj} — угол падения в приближении геометрической оптики для волны с индексами l, j). Имея в виду, что

$$r=R_{lj}\sin\vartheta_{lj};\ Z_{lj}=R_{lj}\cos\vartheta_{lj};\ R_{lj}=\sqrt{r^2+Z_{lj}^2},$$

произведем в формуле (3) замену переменной

$$\tau=\sqrt{2ikR_{lj}\cos\vartheta_{lj}}\sin\vartheta/2. \tag{4}$$

После преобразований получим

$$\Psi_{lj}=\frac{\exp(ikR_{lj}\cos\vartheta_{lj})}{R_{lj}\cos\vartheta_{lj}}-2\int_0^\infty\varphi(\tau)e^{-\tau^2}d\tau, \tag{5}$$

где

$$\varphi_{(\tau)}=J_0[kR_{lj}\sin\vartheta_{lj}\sin\vartheta_{(\tau)}]V[\vartheta(\tau)]\tau. \tag{6}$$

Вычисляя интеграл (5) асимптотически и ограничиваясь членами порядка $1/(kR_{lj})^{3/2}$, имеем

$$\Psi_{lj}=\frac{\exp(ikR_{lj}\cos\vartheta_{lj})}{R_{lj}\cos\vartheta_{lj}}\left[V_{lj}(0)-\frac{(kR_{lj}\sin\vartheta_{lj})^2}{2ikR_{lj}\cos\vartheta_{lj}}V_{lj}(0)+\right.$$
$$\left.+\frac{V_{lj}''(0)}{ikR_{lj}\cos\vartheta_{lj}}+\frac{\sqrt{\pi}V_{lj}'''(0)}{(2ikR_{lj}\cos\vartheta_{lj})^{3/2}}+0\left(\frac{1}{k^2R_{lj}^2}\right)\right]. \tag{7}$$

Асимптотический ряд (7) можно использовать в области малых углов ϑ_{lj}, т. е. там, где $kR_{lj}\sin\vartheta_{lj}\ll 1$. В частности, при $\vartheta_{lj}=0$ (нормальное падение)

$$\Psi_{lj}=\frac{\exp(ikR_{lj})}{R_{lj}}\left[V_{lj}(0)+\frac{V_{lj}''(0)}{ikR_{lj}}+\frac{\sqrt{\pi}V'''(0)}{(2ikR_{lj})^{3/2}}+\right.$$
$$\left.+0\left(\frac{1}{k^2R_{lj}^2}\right)\right]. \tag{8}$$

Первый член в скобках соответствует приближению геометрической оптики, последующие члены учитывают дифракционные поправки, которые возрастают при понижении частоты.

Ряд (8) был использован для расчета отдельных слагаемых суммы (2), при этом для каждого отраженного поля оценивалось необходимое число членов ряда из того условия, чтобы абсолютная величина первого отброшенного члена ряда не превышала $0{,}005|V(0)|$.

Расчет $\operatorname{Im}\Psi$ как функции глубины погружения источника был произведен на ЭВМ в предположении, что

$$V(\vartheta)=\frac{m\cos\vartheta-\sqrt{n^2-\sin^2\vartheta}}{m\cos\vartheta+\sqrt{n^2-\sin^2\vartheta}}. \tag{9}$$

Здесь $m=\rho_1/\rho_0$, $n=c_0/c_1$; ρ_1, c_1, ρ_0, c_0 — соответственно плотности и скорости звука в нижнем полупространстве и в слое. В сумме (2) мы ограничились значением индекса $l_{\max}=6$.

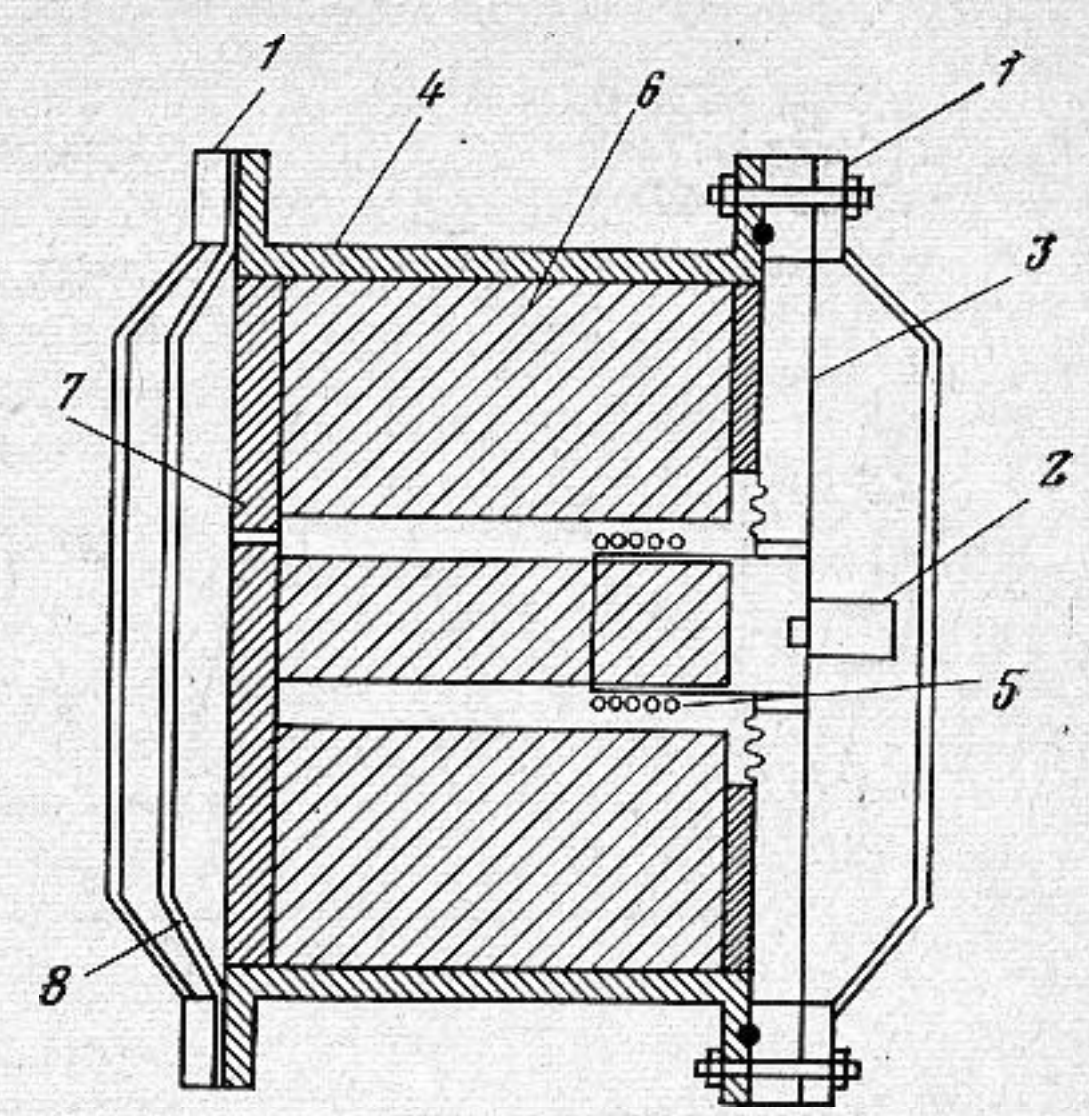
Экспериментальные работы по определению акустической мощности излучателя производились на плоском участке пресного водохранилища. Глубина места была равна 8,5 м.

Метод измерений состоял в определении потока мощности через основание и боковую поверхность цилиндра, ось которого проходила через точку расположения излучателя. Расчет полного потока мощности производился по формуле

$$W_{\text{ак}}=2\pi\int_0^R rp(r)U_{\text{в}}(r)\,dr\Big|_{h=H}+2\pi R\int_0^H p(h)U_r(h)\,dh\Big|_{r=R}, \tag{10}$$

где первый интеграл определяет поток акустической мощности через основание цилиндра, уходящий в дно, а второй — поток мощности, распространяющийся в горизонтальном направлении, r — горизонтальное расстояние, p — звуковое давление, $U_{\text{в}}$, U_r — компоненты колебательной скорости. Таким образом, для экспериментального определения акустической мощности излучателя достаточно измерить распределение горизонтального потока мощности на расстоянии R и распределение вертикального потока мощности, уходящего в дно, при изменении горизонтального расстояния до излучателя от 0 до R. Измерения проводились следующим образом. Излучатель устанавливался на фиксированной глубине и при помощи специального устройства мог перемещаться в горизонтальном направлении. Ось излучателя при проведении опытов была ориентирована в вертикальной плоскости. Векторный приемник и приемник звукового

давления, помещенный вблизи от него, совместно с предварительным усилителем устанавливался на подъемном механизме, который обеспечивал их перемещение по вертикали в пределах толщины водного слоя. Сигналы с приемников после усиления подавались на перемножающее устройство, выходное напряжение которого непрерывно записывалось на ленте самописца. При записи горизонтального потока энергии лента самописца двигалась синхронно с перемещением приемников по вертикали, при этом горизонтальное расстояние до излучателя и глубина погружения излучателя сохранялись постоянными. При записи донного потока приемники устанавливались на дно, а излучатель перемещался по горизонтали. В этом случае движение ленты самописца синхронизировалось с горизонтальным перемещением излучателя. Длина трассы, на которой определялся вертикальный поток мощности, составляла 6 м. Обработка экспериментальных записей проводилась согласно выражению (10). Измерения акустической мощности были проведены в диапазоне от 90 до ~300 Гц при критической частоте слоя, равной ~85 Гц.

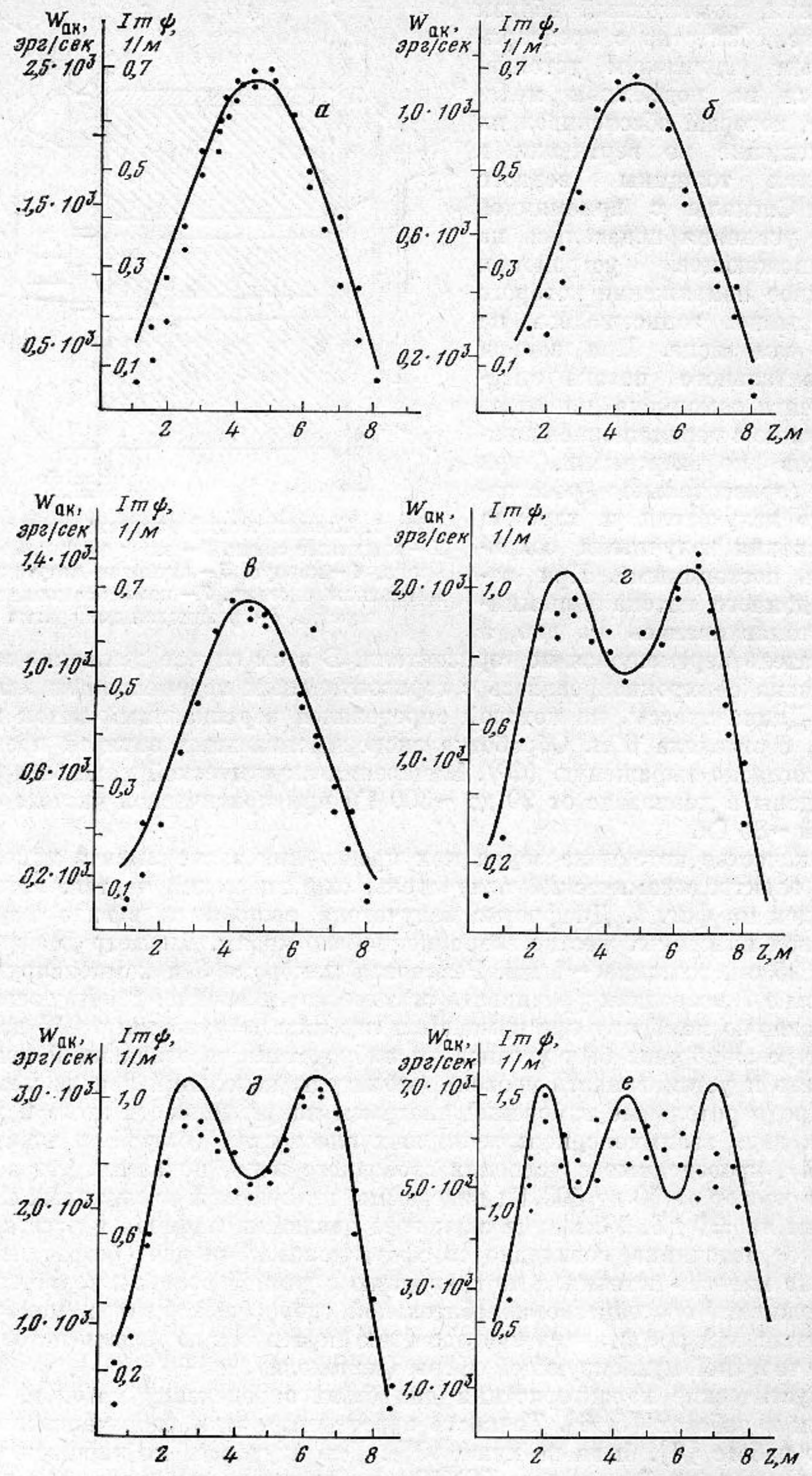


Фиг. 1. Схематический чертеж излучателя: *1* – защитные сетки, *2* – вибродатчик, *3* – мембрана, *4* – корпус, *5* – звуковая катушка, *6* – магнитная система, *7* – компенсационное отверстие, *8* – резиновая диафрагма

В качестве источника звука при проведении эксперимента использовался электродинамический излучатель, схематический чертеж которого приведен на фиг. 1. Диафрагма излучателя выполнена в виде круглой латунной пластины, жестко закрепленной по краям. Диаметр диафрагмы равен 25 см, толщина ~1 мм. Резиновая мембрана *8* и компенсирующее отверстие *7* позволяли уравнивать статическое давление, действующее на излучающую мембрану при изменении глубины погружения от 0,5 до 8 м. В центре мембраны был установлен вибродатчик, позволяющий контролировать и устанавливать уровень амплитуды колебаний центра мембраны. Предварительные измерения диаграмм направленности этого излучателя в двух взаимноперпендикулярных плоскостях (осевой и экваториальной), проведенные в условиях свободного поля, показали, что в диапазоне частот от 70 до 500 Гц диаграммы отличаются от круговых не более чем на ±1 дБ. Убывание звукового давления, начиная с расстояния 30 см от источника, совпадало со сферическим. Эти два обстоятельства, а также малость источника по сравнению с длиной волны и возможность поддерживать постоянство колебательной скорости в центре мембраны позволили нам представить при расчетах акустическую модель источника в виде точечной пульсирующей сферы (монополя).

Акустические характеристики дна были определены методом, описанным в работах [5, 6]. Точность определения этих характеристик, согласно работе [6], была не хуже 10%. Дно изучалось на площади водохранилища, равной примерно 50×50 м². На основании этих измерений мы выбрали акустическую модель дна в виде изотропного полупространства, заполненного жидкостью, с параметрами: $\rho_1=1{,}6$ г/см³, $c_1=100$ м/с.

Расчет $\mathrm{Im}\,\Psi$ был произведен по формуле (8) для однородного жидкого грунта с плотностью $\rho_1=1{,}6$ г/см³, скорость звука бралась равной 50, 100 и 150 м/с. Как показал расчет, увеличение скорости звука от 50 до



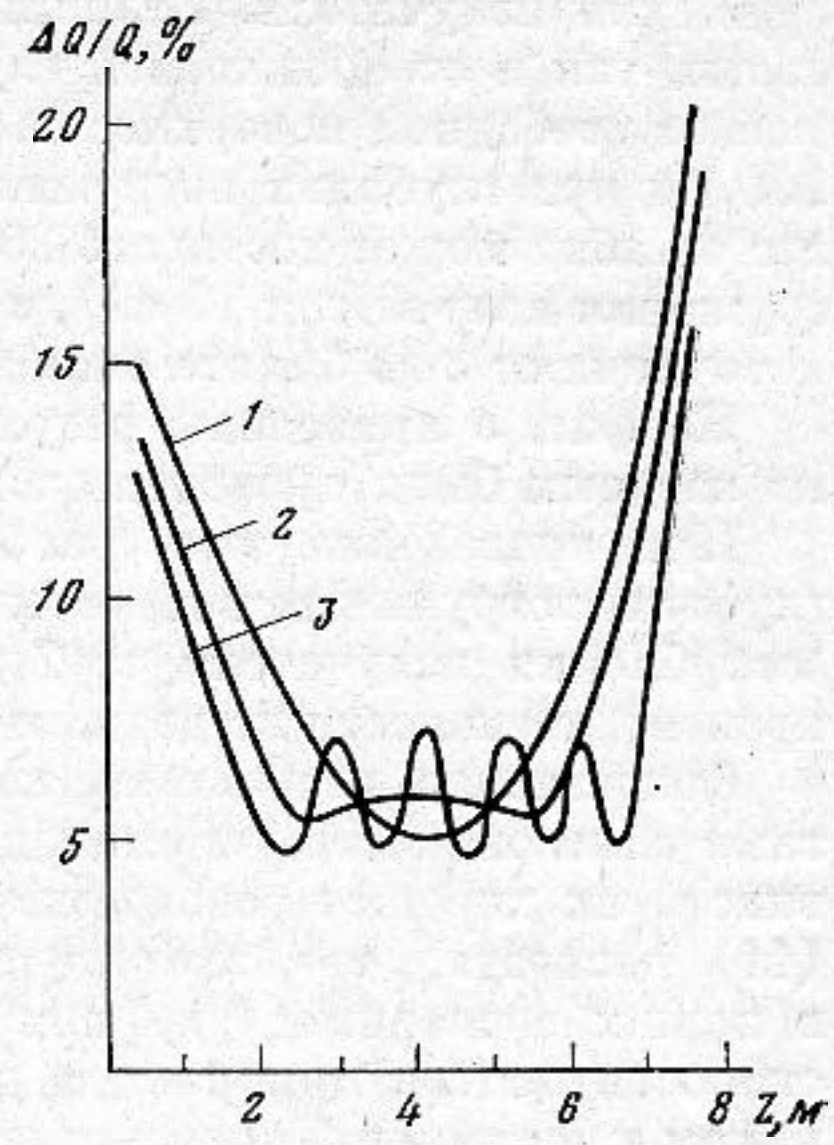
Фиг. 2. Рассчитанные значения величины Im Ψ (сплошные кривые) и экспериментально определенный полный поток акустической мощности излучателя: частота измерения 90 Гц (*а*), 125 (*б*), 140 (*в*), 200 (*г*), 250 (*д*), 315 Гц (*е*)

150 м/с приводит к изменению величины Im Ψ не более чем на 0,5 дБ (при глубинах погружения источника от 0,5 до 7 м). Таким образом, даже значительная ошибка при определении скорости звука в подстилающей среде приводит к малым ошибкам в расчете производительности источника звука.

Экспериментальные результаты измерений акустической мощности электродинамического излучателя в зависимости от глубины его погружения приведены на фиг. 2. Там же приведены расчетные кривые для величины Im Ψ при $\rho_1=1{,}6$ г/см³ и $c_1=100$ м/с.

На основе определенного полного потока акустической мощности и расчета мнимой части потенциала по формуле

$$Q=2\sqrt{2\pi W_{ак}/\omega\rho\,\mathrm{Im}\,\Psi}. \tag{11}$$



Фиг. 3. Расчетное значение относительной ошибки определения акустической производительности источника. Кривая *1* – частоты 90, 125, 140 Гц; кривая *2* – 200, 250 Гц; кривая *3* – 315 Гц

была определена производительность источника. Для вычисления производительности использовалась область изменения погружения источника от 2 до 6 м, где расхождения между экспериментальными точками и теоретической кривой минимальны. Полученные результаты и погрешности измерений Δ, % приведены ниже

f, Гц	90	125	140	200	250	315
Q, см³/с	101	70	74,2	63,8	67,3	83
Δ, %	12	10	12	6	3,1	5,2

Оценим точность наших измерений производительности источника. Относительная ошибка измерений производительности источника звука $\Delta Q/Q$ равна

$$\frac{\Delta Q}{Q}=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta W_{ак}}{W_{ак}}+\frac{\Delta\,\mathrm{Im}\,\Psi}{(\mathrm{Im}\,\Psi)^2}\right).$$

Ошибка в определении полной акустической мощности источника $\Delta W_{ак}$ на основании выражения (10) будет складываться из ошибок определения потока акустической энергии через основание цилиндрической поверхности в дно и ошибке в определении горизонтального потока мощности. Поскольку в наших условиях поток акустической энергии в дно не превышает 10% от величины горизонтального потока, то ошибка измерений полного потока энергии определяется в основном ошибкой в измерении горизонтального потока. Отсюда

$$\frac{\Delta W_{ак}}{W_{ак}}\simeq\frac{\Delta R}{R}+\frac{\Delta H}{H}+\frac{\Delta p}{p}+\frac{\Delta U}{U},$$

в нашем случае величины относительных ошибок составили $\Delta R/R\simeq1{,}5\%$; $\Delta H/H\simeq1\%$; $\Delta p/p\simeq1\%$; $\Delta U/U\approx1\%$. Таким образом, суммарная ошибка в измерении полного потока энергии составляет примерно 4,5% и не зависит от глубины погружения источника. Ошибка в измерении параметров грунта в пределах 10% приведет к относительной ошибке при определении величины Im Ψ не более чем на 0,7%. Кроме того, при расчете Im Ψ необходимо учесть влияние неточности определения глубины по-

гружения излучателя. Величина этой ошибки будет зависеть как от частоты, так и от абсолютной глубины погружения источника, отсчитываемой от свободной поверхности. Например, для диапазона частот от 200 до 250 Гц при глубинах погружения излучателя от 0,5 до 3 м и от 6 до 8 м эта ошибка может достигать 25% (при точности определения глубины погружения излучателя 10 см), с другой стороны, при глубинах погружения источника от 3 до 6 м эта ошибка не превышает 5%.

На фиг. 3 приведены результаты расчетов ошибки $\Delta Q/Q$, для частот, на которых были проведены экспериментальные измерения.

При проведении этих расчетов мы полагали точность определения глубины погружения излучателя равной 10 см. Из фиг. 3 следует, что при заглублении излучателя от 2 до 6 м суммарная ошибка в определении производительности не должна превышать 10%.

Сопоставляя результаты измерений акустической мощности с расчетами мнимой части потенциала, представленными на фиг. 2, нетрудно видеть их хорошее совпадение. Это дает право на основании формулы (11) полагать, что электродинамический излучатель, использованный в наших экспериментах, при поддержании постоянной колебательной скорости центра мембраны в диапазоне от 90 до 300 Гц является источником с постоянной производительностью.

В заключение авторы благодарят С. Н. Ржевкина за внимательное отношение к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бреховских Л. М.* Излучение источника звука в воде, расположенного на небольшой глубине. Докл. АН СССР, 1945, *47*, 6, 412–416.
2. *Андреев Н. Н., Бреховских Л. М., Розенберг Л. Д.* Влияние глубины погружения источника звука в воде на его излучение. Докл. АН СССР, 1945, *47*, 6, 417–419.
3. *Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н., Иванов В. Е., Ильин С. А., Киршов В. А., Поневаж В. П., Хайло Ю. В.* Векторный приемник как измерительное устройство. Доклад на VII Всесоюзной акустической конференции, М., 1973, Ж1в–2, 10–13.
4. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М., «Наука», 1973.
5. *Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н.* О методе определения акустического сопротивления грунта в пресных водоемах. Акуст. ж., 1974, *20*, 4, 531–535.
6. *Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н., Иванов В. Е.* О волновых числах и разности фаз между компонентами поля в трехслойном волноводе. Акуст. ж., 1979, *25*, 4, 507–514.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
физический факультет,
кафедра акустики

Поступила
25 ноября 1976 г.
Окончательный вариант
12 февраля 1979 г.