

УДК 534.231:534.614

ВЕКТОРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Л. Н. Захаров, С. Н. Ржевкин

Излагаются результаты разработки новых методов и аппаратуры для векторно-фазовых измерений в гидроакустических полях. Создание малогабаритных векторных приемников, позволяющих измерять компоненты вектора колебательной скорости и их разности фаз со звуковым давлением, привело к постановке и решению ряда обратных задач гидроакустики, заключающихся в определении акустических и геометрических параметров источника путем векторно-фазовых измерений вдали от источника.

Предложен метод определения производительности источников посредством измерения потока акустической мощности через замкнутую поверхность и метод определения импеданца грунта и коэффициента отражения в функции частоты и угла падения. Показана возможность определения координат источника звука посредством векторно-фазовых измерений в одной точке при размерах приемника, ничтожно малых по сравнению с длиной волны. Исследованы пространственные характеристики шумов моря в прибрежных районах и выяснены причины асимметрии шумового поля, вызываемые излучением звука прибойной зоной.

Полное описание звукового поля можно дать, если известен в аналитической форме потенциал скоростей $\Psi(x, y, z, t) = \Phi(x, y, z) \exp(i\omega t)$. В стационарном, гармоническом поле звуковое давление p и колебательная скорость v_s в некотором направлении S определяются из соотношений $p = i\omega\rho\Phi$; $v_s = -\text{grad}_S \Phi$. Методы экспериментального определения звукового давления хорошо разработаны, для этой цели существует надежно отградуированная аппаратура. Измерение колебательной скорости представляет более сложную задачу, и существующие методы дают лишь качественное ее решение. Определение интенсивности звука (вектора Умова), т. е. плотности потока акустической мощности требует измерения величины p , v и разности фаз φ между ними с последующим усреднением по времени согласно выражению:

$$(1) \quad \bar{J} = \overline{pv_s \cos \varphi}.$$

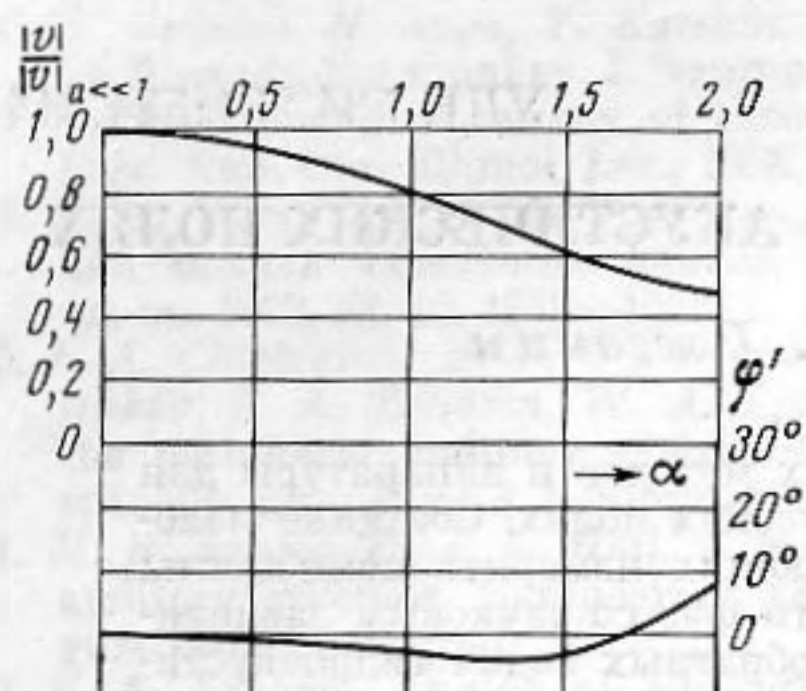
В метрологическом плане эта задача как для газообразной, так и для жидкой среды пока еще ждет своего разрешения, и аппаратуры для таких измерений не существует.

Определение \bar{J} теоретическим путем возможно лишь в случае простейших полей. В поле плоской монотональной волны или в дальнем поле сферической волны с амплитудой звукового давления p_0 $|\bar{J}| = p_0^2/2\rho c$. При наличии нескольких тональных компонент или в шумовом поле в ряде случаев можно выполнить энергетическое суммирование и ввести в формулу средний квадрат звукового давления $\overline{p^2}$.

Если в звуковом поле имеет место отражение или дифракция, то между p и v может возникать разность фаз и вычисление \bar{J} следует производить по формуле (1). А это возможно лишь в том случае, если имеется аналитическое выражение функции Φ , которое далеко не всегда удается представить

в удобной для расчета форме. Таким образом, определение важной характеристики звукового поля — потока мощности через некоторую поверхность представляет достаточно сложную задачу как в теоретическом, так и в экспериментальном плане и, как следствие этого, основной измеряемой величиной в звуковом поле практически является лишь звуковое давление.

В результате работ, проведенных на кафедре акустики физического факультета МГУ, были развиты методы и созданы приборы для измерения



Фиг. 1

компонент колебательной скорости в гидроакустическом поле и фазовых соотношений между ними и звуковым давлением. Эти работы привели к постановке и решению ряда интересных задач. Выяснилось, что векторно-фазовые измерения могут служить источником получения важной дополнительной информации об акустических явлениях.

Приемник колебательной скорости.

Идея измерения колебательной скорости в звуковом поле зародилась давно. В знаменитой работе Рэля [1] показана возможность измерения среднего квадрата колебательной скорости в звуковой волне и определения с помощью этой величины

интенсивности звука (диск Рэля). В работе Каррьеера [2] предложен оптический метод измерения амплитуды колебаний частиц среды путем наблюдения в микроскоп движения частиц дыма. В гидродинамике идеальной жидкости [3] выводится соотношение между амплитудой колебательной скорости частиц в звуковой волне v_0 и амплитудой скорости вынужденных колебаний жесткой сферы v :

$$(2) \quad v = \frac{3\rho_0}{2\rho + \rho_0} v_0,$$

где ρ_0 и ρ — плотность жидкости и сферы. В это соотношение не входит ни частота, ни размеры сферы. При частоте, равной нулю, это соотношение теряет силу, так как в идеальной жидкости, согласно парадоксу Эйлера — Д'Аламбера, при любой скорости потока сфера может двигаться, не испытывая сопротивления, также с любой скоростью.

Из (2) следует, что при $\rho = \rho_0$ амплитуды v и v_0 равны; при $\rho \ll \rho_0$ (газовый пузырек в жидкости) ($v \approx 3v_0$ *); при $\rho \gg \rho_0$ $v \approx 0$. В результате более полного анализа вопроса [4] было показано, что в формулу (2) должна войти зависимость от волнового параметра $\alpha = ka = \omega a / c_0$ (здесь k — волновое число, a — радиус сферы, ω — круговая частота, c_0 — скорость звука в жидкости):

$$(3) \quad v(\alpha) = \frac{3\rho_0}{2\rho + \rho_0 \mu} \frac{e^{i\delta(\alpha)}}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^4}{4}}} v_0,$$

где $\mu = 2 \left[\frac{2 + \alpha^2}{4 + \alpha^4} - i \frac{\alpha^3}{4 + \alpha^4} \right]$; $\delta(\alpha)$ — вспомогательная фазовая функция, та-

булированная в книге Морза «Колебания и звук» [5]. При $\alpha \ll 1$ формула (3) превращается в формулу (2). На фиг. 1 показано как зависит величина

* В этом случае ускорение будет также в три раза больше. Аналогичный результат получится для аэростата, наполненного газом более легким, чем воздух, он будет подниматься с ускорением $\approx 3g$.

$\frac{v(\alpha)}{v(\alpha)_{\alpha \ll 1}}$ от α при $\rho=2,7$; на графике представлена также разность фаз φ' между v и v_0 в функции от α .

Наличие простого соотношения (2) навело одного из авторов * на мысль использовать полую сферу (со средней плотностью $\bar{\rho}$) как гидроакустический приемник. Для измерения амплитуды колебаний сферы внутрь ее помещался пьезоэлектрический преобразователь в виде плоской гибкой пластины, оклеенной кристаллами сегнетовой соли. Колебания сферы создают вынужденные колебания пластины и деформацию пьезоэлементов, пропорциональную амплитуде колебаний в падающей волне. Между амплитудой колебаний пластины s_0 и звуковым давлением в плоской волне p имеет место соотношение

$$(4) \quad s_0 = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \frac{v}{i\omega} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{i\omega \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]} \left(\frac{3\rho_0}{2\bar{\rho} + \rho_0}\right) \left(\frac{p}{\rho_0 c_0}\right),$$

где p — амплитуда звукового давления, ω_0 — резонансная частота пластины. При $\omega \ll \omega_0$ амплитуда s_0 и пропорциональная ей разность потенциалов пьезопреобразователя растет пропорционально ω ; при $\omega \gg \omega_0$ она обратно пропорциональна ω .

Наличие у описанного устройства предусмотренной конструкцией фиксированного направления возможного перемещения преобразователя придает ему направленность: амплитуда колебаний зависит от угла β между направлением волны и осью возможных колебаний пластины согласно закону

$$(5) \quad s = s_{\max} \cos \beta.$$

Приемник описанного типа можно назвать дипольным. Его диаграмма направленности имеет форму двух соприкасающихся окружностей (восьмерка). Фазы принимаемых сигналов, проходящих вдоль некоторой линии в противоположных направлениях, будут иметь обратные знаки.

Предварительные опыты с таким приемником, проведенные под руководством С. Н. Ржевкина в 1951 г. показали возможность определения направления прихода низкочастотных акустических волн в море, частота которых имела порядок нескольких герц. Эти волны возникали, вероятно, в штормовых районах, находящихся на расстоянии сотен километров. Таким образом, выяснилась возможность применения описанного приемника колебательной скорости для обнаружения и определения направления прихода низкочастотных гидроакустических сигналов при размере приемного устройства, значительно меньших длины волны.

В 1956 г. появилась работа американских авторов [6], в которой была описана конструкция приемника, аналогичная описанной выше. Теоретический расчет чувствительности приемника, как показано в работе [4], учитывает не все необходимые свойства системы.

Усовершенствование приемника колебательной скорости. Векторный приемник **. Дипольная диаграмма направленности приемника колебательной скорости дает возможность определения направления на источник звука при низких звуковых и инфразвуковых частотах, причем размеры приемника могут составлять весьма малую долю длины волны. Однако малый коэффициент концентрации приемника, равный трем, не позволяет достичь

* С. Н. Ржевкина.

** Описываемые ниже работы были выполнены в период с конца 50-х до середины 60-х годов при активном участии научных сотрудников кафедры акустики Ф. В. Рोजина, О. С. Тонаканова, В. А. Киршова и квалифицированных техников В. Д. Русина, И. Н. Исаева, А. В. Болотникова и Г. В. Романова.

большой точности. Из опыта выяснилось кроме того, что получить правильную форму дипольной диаграммы с острым минимумом при $\beta=90^\circ$ не удается.

В результате детальных исследований было установлено, что главным источником искажения диаграммы направленности приемника являются резонансные колебания оболочки и несовпадение центра масс и центра плавучести с геометрическим центром сферы. Последнее обстоятельство удалось устранить путем применения рациональной конструкции пьезопреобразователей.

Расчет дифракционных поправок (формула 3) показывает, что приемник диаметром 5 см должен иметь равномерную чувствительность по амплитуде скорости до 15 кГц, однако искажение диаграммы вследствие появления изгибных резонансных колебаний оболочки не позволяет работать выше 2—3 кГц. Устранить этот недостаток удалось в результате создания монолитной конструкции корпуса приемника.

Важнейшим усовершенствованием явилось применение конструкции так называемого трехкомпонентного приемника, в общем сферическом корпусе которого расположена система из трех пьезопреобразователей (датчиков) с взаимно перпендикулярными осями. Каждый из каналов на выходе трех датчиков может независимо регистрировать компоненты вектора колебательной скорости. В отсутствие разности фаз между компонентами вектора v_x, v_y, v_z можно легко определить суммарный вектор колебательной скорости:

$$(6) \quad |v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

При наличии разности фаз между компонентами колебательной скорости суммарный вектор не существует, поскольку движение частиц среды, а равно и движение сферы — приемника, происходит не по прямой линии, а по эллиптической траектории. Приемник с тремя ортогональными датчиками был назван векторным приемником.

Дальнейшим шагом в развитии вектор-фазовых измерений, потребовавшим проведения ряда метрологических исследований и усовершенствования конструкции приемника, было создание методики определения разности фаз $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ между компонентами колебательной скорости и звуковым давлением. Это позволило предложить способ измерения потока акустической мощности в некотором направлении s , вводя в (1) активные компоненты вектора колебательной скорости и определяя модуль суммарной активной колебательной скорости как

$$(7) \quad |v_s| = \sqrt{(v_x \cos \varphi_x)^2 + (v_y \cos \varphi_y)^2 + (v_z \cos \varphi_z)^2}.$$

Определение чувствительности векторного приемника. Методы определения чувствительности приемников звукового давления хорошо разработаны и осуществляются в метрологических учреждениях, методы же градуировки приемников колебательной скорости еще только начинают разрабатываться.

Для ориентировочного определения чувствительности гидроакустического приемника колебательной скорости может служить вибрационный стол. Однако при таком методе не учитываются многие особенности приемника, погружаемого в воду. Можно производить градуировку в воздушной звукомерной камере путем сравнения с эталоном звукового давления в дальнем поле сферической волны. Этот способ, как и предыдущий, не учитывает специфику водной среды и, кроме того, требует использования весьма сильных звуков, что может привести к трудно учитываемым нелинейным искажениям.

Для надежной градуировки необходимо создать гидроакустическое поле, в котором точно известна связь между давлением и скоростью в звуковой волне. В работах [7, 8] показана возможность создания плоской волны в

замкнутом отрезке прямоугольной толстостенной трубы или в прямоугольном объеме. Такие, весьма громоздкие, устройства весом в несколько сот килограмм позволяют производить градуировку в диапазоне низких звуковых и инфразвуковых частот.

Имеется возможность градуировки в ближнем поле колеблющейся сферы, помещаемой на небольшой глубине в открытом гидробассейне. Сфера должна приводиться в колебания внутренним механизмом, например несбалансированным мотором; амплитуду ее колебаний на низких частотах можно измерить оптическим методом. Ближнее поле колеблющейся сферы убывает обратно пропорционально кубу расстояния от центра и на небольшом участке может считаться постоянным. При размещении сферы на достаточном удалении от поверхности и стенок их влияние на ближнее поле можно сделать весьма малым.

В работе [9] предложен метод градуировки в плоском водном слое, осуществимый на ряде гидроакустических полигонов, в частности на полигоне кафедры акустики на Клязьминском водохранилище. Для выполнения градуировки по глубине слоя проводятся непрерывные «разрезы» с целью регистрации поля давления p , горизонтальной v_x и вертикальной v_z компоненты колебательной скорости. Между квадратами осредненных по глубине величин имеет место соотношение:

$$(8) \quad \bar{p}^2 = [\overline{v_x^2} + \overline{v_z^2}] \rho_0^2 c_0^2.$$

Это выражение позволяет определить чувствительность векторного приемника.

Определение чувствительности векторных приемников возможно также в открытом лабораторном бассейне путем снятия ряда «разрезов» поля давления и сравнения с эталонным гидрофоном. При снятии разрезов по координатным осям приемник ориентируется последовательно по осям x , y , z .

Для получения диаграмм направленности векторных приемников целесообразно использовать достаточно протяженный плоский водный слой, где можно пренебречь отражением звука в горизонтальном направлении.

Измерение разности фаз между компонентами колебательной скорости и давлением осуществляется путем применения фазометрических приборов на выходе пьезопреобразователей. Для правильного решения этой задачи необходимо, чтобы напряжения на выходе преобразователей правильно отражали фазовые соотношения в звуковом поле. Иными словами, необходимо, чтобы фазовые характеристики всех элементов электроакустического тракта были стабильны и не вносили искажений фазы принимаемых сигналов. Выполнение фазометрических измерений требует весьма тщательного изготовления надежных конструкций приемников и значительного объема метрологической работы.

Некоторые задачи гидроакустики. 1. Измерение потока акустической энергии через замкнутую поверхность, окружающую источник, позволяет получить простое решение некоторых задач гидроакустики. При отсутствии или малости потерь в среде поток звуковой энергии через замкнутую поверхность постоянен. Важную характеристику источника звука — производительность Q можно определить, если в слое водохранилища с акустически мягким дном измерить средний по глубине H поток мощности $\langle \bar{J} \rangle$ через цилиндрическую поверхность, окружающую источник. Величина Q определяется, согласно [10], выражением

$$(9) \quad Q = \sqrt{\frac{\langle \bar{J} \rangle H^2 R}{4\pi\rho_0\omega \sum_n e^{-m_n''R} \sin^2(l_n h)}}$$

где h — глубина погружения излучателя. R — радиус цилиндрической поверхности; m'' — мнимая часть горизонтального волнового числа порядка n и l_n — вертикальные волновые числа, которые могут быть определены, если известны акустические параметры грунта. Определение величины Q для точечного источника требует измерения по вертикальному разрезу звукового давления, горизонтальной составляющей скорости и разности фаз между ними, после чего расчет ведется по формуле (9). Знание производительности источника Q позволяет производить расчеты амплитуды звуковых сигналов, распространяющихся на дальнейе расстояние в море.

2. Использование векторного приемника существенно упрощает задачу определения акустических параметров грунта. Это преимущество проявляется в первую очередь на низких звуковых частотах, в случаях когда коэффициент отражения звука от дна V , являющийся функцией частоты и угла падения, сильно зависит от слоистой структуры грунта. Измерение коэффициента отражения интерференционным методом с использованием поля давления может приводить к значительным ошибкам из-за осцилляции V в зависимости от угла падения. Значительно точнее можно определить коэффициент отражения путем непосредственного измерения звукового давления и вертикальной составляющей скорости $|v_z|$ на границе вода—грунт. Модуль коэффициента отражения $|V|$ и его фаза φ связаны с эквивалентным импедансом грунта следующими соотношениями:

$$(10) \quad |V|e^{-i\varphi} = \frac{Z_{\text{экр}} - Z_0}{Z_{\text{экр}} + Z_0}; \quad Z_{\text{экр}} = \frac{p}{v_z} = \frac{|p|}{|v_z|} e^{i\varphi_z},$$

где $Z_{\text{экр}}$ — удельный акустический импеданс грунта, Z_0 — удельный акустический импеданс водного слоя и φ_z — разность фаз между звуковым давлением и вертикальной составляющей колебательной скорости.

На предельно низких частотах, когда длина волны и глубина слоя — величины одного порядка, определение акустических характеристик дна можно производить измерением разности фаз между компонентами колебательной скорости и звуковым давлением. Измеренные разности фаз можно связать с вертикальными волновыми числами или, при выбранной модели грунта, с его акустическими параметрами. В частности, для однородного жидкого полупространства с пониженной скоростью звука можно получить выражение для расчета волнового сопротивления грунта $\rho_1 c_1$:

$$(11) \quad \rho_1 c_1 = \frac{\omega \rho_0 H}{\text{tg } \varphi (p v_z)} \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi n z}{H}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi n z}{H}\right) - \frac{2\pi n z}{H}} \right],$$

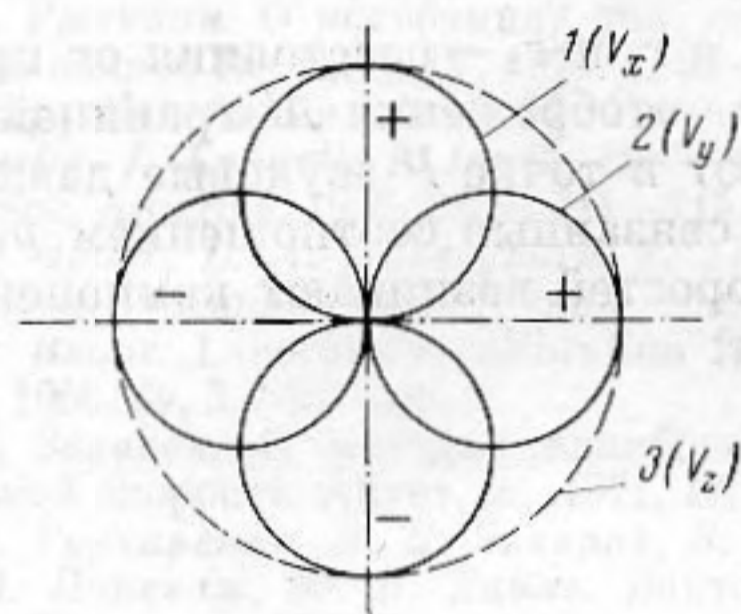
где n — номер нормальной волны, на которой производятся измерения, z — глубина погружения приемника, H — глубина слоя и φ_z — разность фаз между p и v_z .

3. В условиях безграничного пространства полярный угол источника звука ϑ и его азимут $|\Psi|$ определяются из соотношений:

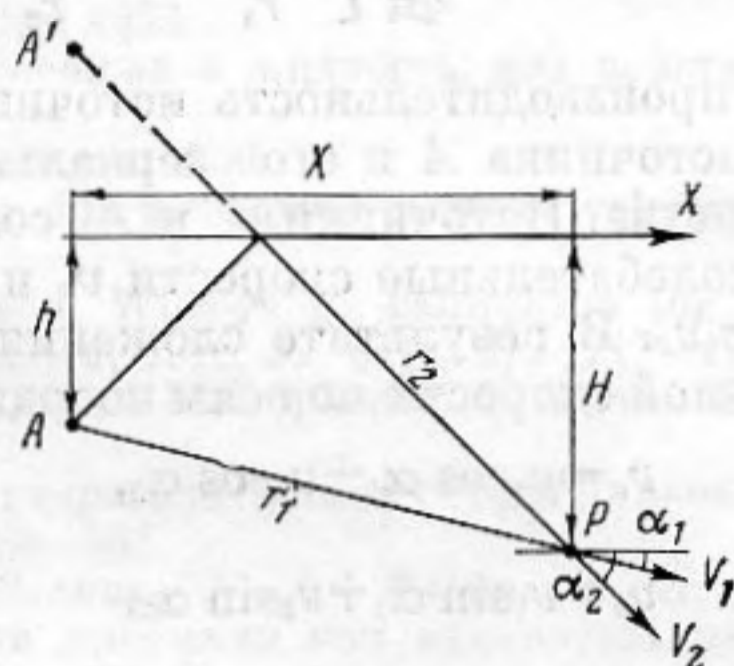
$$(12) \quad \text{tg}^2 \vartheta = \frac{|v_x|^2 + |v_z|^2}{|v_z|^2} \quad \text{и} \quad \text{tg } \Psi = \frac{v_y}{v_x}.$$

Реализация измерений в условиях водного слоя, когда (в аспекте лучевых представлений) возникают мнимые источники, наталкивается на трудности. На далеком расстоянии от источника, где вертикальную компоненту скорости можно считать малой и ограничиться лишь соотношениями между горизонтальными компонентами, решение задачи вполне осуществимо. Напряжения на выходе скрещенных под углом 90° горизонтальных приемных каналов векторного приемника v_x и v_y будут либо коррелированы по фазе

(в одной паре противоположных квадрантов на фиг. 2), либо антикоррелированы (в другой паре). Если направление прихода волны перемещается через границу двух соседних квадрантов диаграмм направленности, то разность фаз напряжения на выходе каналов v_x и v_y меняется на 180° , коэффициент же корреляции изменяет знак на обратный. Крутизна этого перехода тем больше, чем больше соотношение сигнал/помеха. Направления, в которых происходит скачок разности фаз или коэффициента корреляции, совпадают с направлением дипольных осей приемников и, поскольку по каждой оси имеются два противоположных направления, в пределах полной окружности может быть четыре направления скачка фазы. Однозначное опреде-



Фиг. 2



Фиг. 3

ление квадранта, в котором лежит направление на источник, может быть достигнуто путем учета посредством логического блока всех комбинаций разности фаз между горизонтальными компонентами v_x и v_y и вертикальной компоненты v_z , создающей опорное напряжение, не зависящее от направления сигнала. Точность определения направления на источник звука (или шума) данным методом за счет накопления сигнала при корреляционной обработке может достигать углового градуса при соотношении сигнал/помеха ≈ 1 . Существенно, что величина приемной базы (в данном случае — диаметра сферы) значительно меньше длины волны.

4. Характеристики направленности шумов моря. Векторные приемники целесообразно применять для изучения шумовых полей моря, что особенно перспективно в области самых низких частот, где создание направленных приемных систем представляет большие трудности. В качестве количественных характеристик шумового поля используется их спектр и диаграмма направленности. Этими характеристиками пользуются для обоснования моделей источников, порождающих шумовое поле. Можно считать доказанным, что в звуковом диапазоне основным источником шума естественного происхождения являются колебания водной поверхности. Этот источник можно представлять как набор точечных излучателей со случайной фазой, равномерно расположенных на поверхности и обладающих диаграммой направленности вида $\cos^n \theta$, где θ — угол с вертикалью, а $n \approx 1$ при спокойной поверхности и возрастает до нескольких единиц при сильном волнении.

Пространственные корреляционные функции поля колебательных скоростей можно использовать для получения дополнительной информации об особенностях излучателей, порождающих это поле. Свойства функции взаимной корреляции сигналов ортогональных горизонтальных приемников можно использовать как критерий равномерности распределения источников по поверхности. Как показано в работе [11], в случае равномерного распределения источников по поверхности коэффициент пространственной корреляции по двум горизонтальным ортогональным каналам векторного приемника равен нулю. Любая асимметрия в распределении источников по поверхности приведет к отклонению функции взаимной корреляции кана-

лов v_x и v_y от нулевого значения. Путем таких измерений были открыты аномалии пространственных характеристик шумов моря в прибрежных зонах. В работе [12] показано, что шумы, возникающие в прибойной зоне у берега моря, вызывают характерное изменение спектрального состава шума.

5. Определение расстояния до источника звука и глубины его погружения. В случае безграничного, однородного жидкого полупространства звуковое давление точечного, тонального источника A , находящегося на глубине h (фиг. 3) и на горизонтальном расстоянии x от приемника, помещенного в точке P на глубине H , можно определить по формуле:

$$(13) \quad p = i\omega\rho_0 \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{e^{-ikr_1}}{r_1} - \frac{e^{-ikr_2}}{r_2} \right],$$

где Q — производительность источника, а r_1 и r_2 — расстояния от приемника до источника A и его зеркального отображения A' границей полупространства. Источники A и A' создают в точке P звуковые давления p_1 и p_2 и колебательные скорости v_1 и v_2 , связанные соотношением $p_1 = \rho_0 c_0 v_1$ и $p_2 = \rho_0 c_0 v_2$. В результате сложения скоростей возникают компоненты колебательной скорости по осям координат:

$$(14) \quad \begin{aligned} v_x &= v_1 \cos \alpha_1 + v_2 \cos \alpha_2, \\ v_z &= v_1 \sin \alpha_1 + v_2 \sin \alpha_2, \end{aligned}$$

где α_1 и α_2 — углы, составляемые v_1 и v_2 с осью x .

Показано, что, исходя из выражения (14), можно установить связь между измеряемыми на опыте величинами: амплитудой звукового давления p , компонентами колебательной скорости v_x и v_z , их разностями фаз со звуковым давлением φ_x и φ_z и геометрическими величинами x и h , подлежащими определению. Эти соотношения имеют вид:

$$(15) \quad g_x^2 \frac{(n-m)^2}{1+m^2} = \frac{x^2 (\Delta_1 - \Delta_2)^2}{(\Delta_2 r_1 - \Delta_1 r_2)^2} = M^2,$$

$$g_z^2 \frac{(n-m)^2}{1+n^2} = \frac{(\Delta_1 - \Delta_2)^2}{(r_1 - r_2)^2} = N^2,$$

где $g_x = \frac{|v_x|}{|p|} \rho_0 c_0$ и $g_z = \frac{|v_z|}{|p|} \rho_0 c_0$ — безразмерные проводимости по осям x и z .

В первые члены выражений (15) входят величины v_x , v_z , φ_x , φ_z , зависящие от частоты, но их комбинации, выраженные вторыми членами, являются частотно-инвариантными и зависят только от геометрических величин.

Уравнения (15) позволяют определить расстояние до источника x и глубину его погружения h по глубине погружения приемника H и величинам M^2 и N^2 , определяемым из опыта

$$(16) \quad x^2 = \frac{M^2}{N^2} (1 - N^2)^2 H^2,$$

$$h^2 = [M^2 + N^2 - M^2 N^2] H^2.$$

Для полного определения положения источника необходимо еще знать его азимут. Последний можно определить, как описывалось выше, путем измерения разности фаз между горизонтальными компонентами вектора колебательной скорости.

Таким образом, выясняется возможность решения при помощи векторно-фазовых измерений ряда интересных задач гидроакустики.

Изложенные в данной статье соображения показывают перспективность исследований векторно-фазовой структуры акустических полей как источника получения информации о различных процессах, происходящих в этих полях, и источниках, их возбуждающих.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J. Rayleigh*. О приборе для измерения интенсивности воздушных колебаний. *Phil. Mag.*, 1882, 14, 186.
2. *M. Z. Carriere*. Ультрамикроскопический анализ воздушных колебаний. *J. Phys. et Radium*, 1929, 10, 198.
3. *Г. Лэмб*. Гидродинамика. М., Гостехтеориздат, 1947; *Л. Ландау, Е. Лифшиц*. Механика сплошных сред. М., Гостехтеориздат, 1953.
4. *С. Н. Ржевкин*. О колебаниях тел, погруженных в жидкость, под действием звуковой волны. *Вестн. МГУ*, 1971, 1, 52—61.
5. *Ф. Морз*. Колебания и звук. М., Гостехтеориздат, 1949.
6. *C. Leslie, J. Kendall, J. Jones*. Hydrophone for measuring particle velocity. *J. Acoust. Soc. America*, 1956, 28, 4, 711—715.
7. *B. V. Bauer, L. A. Abbagnaro, J. Shumann*. Wide-range calibration for pressure-gradient hydrophones. *J. Acoust. Soc. America*, 1972, 51, 5 (ч. 2), 1717—1724.
8. *B. V. Bauer*. Laboratory calibration for gradient hydrophones. *J. Acoust. Soc. America*, 1966, 39, 3, 585—586.
9. *Л. Н. Захаров*. О методах калибровки гидроакустических приемников колебательной скорости. *Акуст. ж.*, 1971, 17, 4, 558—562.
10. *Б. И. Гончаренко, Л. Н. Захаров, В. Е. Иванов, С. А. Ильин, В. А. Кирилов, В. П. Поневаж, Ю. В. Хайло*. Векторный приемник как измерительное устройство. Доклад на VIII Всес. акуст. конф. М., 1973.
11. *Л. Н. Захаров, В. А. Кирилов, Ф. В. Рожин*. Пространственно-корреляционные функции компонент колебательной скорости для двух моделей звукового поля. *Акуст. ж.*, 1972, 18, 1, 49—52.
12. *Л. Н. Захаров, В. А. Кирилов*. О подводных шумах береговой зоны моря. Доклад на VIII Всес. акуст. конф. М., 1973.

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

Поступила
18 января 1974 г.