АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VI 1960 Вып. 4

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДВОДНОГО ГРУНТА НА ВЫСОКИХ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ

Н. А. Грубник

Описывается методика измерения коэффициента отражения звука от подводного грунта в функции частоты и угла падения. Приведены данные об акустических свойствах некоторых грунтов, полученные по описанной методике в озерных и морских условиях.

В последние годы был опубликован ряд работ [1—3] по исследованию акустических свойств подводного грунта, причем наметилось два основных направления исследований. Первое направление предусматривает непосредственно измерение скорости распространения продольных волн в грунте. При этом измерения проводятся как с грунтами, находящимися в естественном залегании, так и с образцами грунта, извлеченными на поверхность моря. Второе объединяет исследования акустических свойств грунта путем изучения звукового поля над грунтом. Здесь измеряется коэффициент отражения звуковых волн от поверхности грунта или входной нормальный импеданц последнего.

Опыты первого типа всегда влекут за собой нарушение структуры грунта, а следовательно, и его акустических свойств, в то время, как опыты второго вида лишены этого недостатка и, следовательно, более точно характеризуют свойства исследуемого грунта. Нами было предпринято исследование акустических свойств подводного грунта в рамках второго направления.

Для измерения коэффициента отражения был выбран метод стоячей волны. Подобные измерения в архитектурной акустике осуществляются при помощи акустических интерферометров, представляющих собой трубу, внутренний диаметр которой мал по сравнению с длиной волны звука. С одного конца эта труба замкнута образцом исследуемого звукопоглощающего материала, на другом — устанавливается источник звука. Величину модуля коэффициента отражения звука от исследуемого образца вычисляют по формуле

$$a = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}},$$

где $p_{\max}$ и $p_{\min}$ — звуковые давления, измеренные соответственно в пучности и узле стоячей волны. Применение подобного устройства в нашем случае затруднительно и может повлечь за собой нарушение структуры исследуемого грунта. Поэтому нами был применен вариант метода стоячих волн с использованием свободно распространяющихся сферических волн [4].

Пусть точечный излучатель звука удален от поверхности исследуемого грунта по нормали на расстояние H, при котором выполняются неравенства $kH \gg 1$ и $z \ll H$, где $k = \omega/c$ — волновое число, z — расстояние от поверхности грунта до наиболее удаленной точки наблюдения. Тогда распределение звукового давления вдоль нормали к поверхности грунта в обозначениях, приведенных на фиг. 1, где *1* — излучатель звука, *2* — звукоприемник, нижнее (заштрихованное) полупространство — грунт, верх-

нее — вода, запишется так:

$$p \sim \frac{e^{ik(H-z)}}{H-z} + A\frac{e^{ik(H+z)}}{H+z} = \frac{e^{ikH}}{H}\left(\frac{1}{1-\frac{z}{H}}e^{-ikz} + \frac{1}{1+\frac{z}{H}}Ae^{ikz}\right). \quad (1)$$

Коэффициент отражения может быть представлен в виде $A = ae^{i\alpha}$.

Разложим в степенной ряд члены, содержащие z/H, и полагая, что $z/H \ll 1$, пренебрежем членами порядка выше первого. Тогда выражение (1) примет вид:

$$p \sim \frac{e^{ikH}}{H}\left[\left(1+\frac{z}{H}\right)e^{-ikz} + \left(1-\frac{z}{H}\right)ae^{i(kz+\alpha)}\right],$$

откуда следует, что

$$a = \frac{1-b}{1+b} \quad (2)$$

и

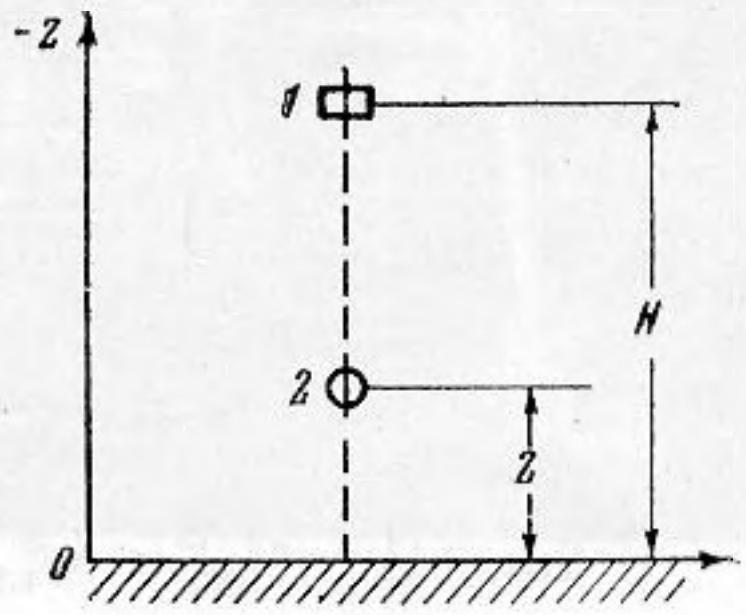
$$\alpha = -2kz_0 + \arcsin\frac{1-a^2}{2kHa}, \quad (3)$$

где

$$b = \frac{z_p}{H}\left(1-\frac{p_{\min}^2}{p_{\max}^2}\right) + \sqrt{\frac{z_p^2}{H^2}\left(1-\frac{p_{\min}^2}{p_{\max}^2}\right) + \frac{p_{\min}^2}{p_{\max}}},$$

— расстояние между отражающей границей и минимумом звукового давления в стоячей волне, z_p — расстояние до наиболее удаленной от грунта точки наблюдения.

В реальных условиях звуковое давление в точке наблюдения будет создаваться не только прямой волной и волной отраженной поверхностью грунта, но также волнами, отраженными от свободной поверхности воды. При глубине водоема H_0, много большей z, влиянием свободной поверхности воды на величину звукового давления у дна водоема можно пренебречь и считать водный слой бесконечным полупространством. С уменьшением глубины роль волн, отразившихся от свободной поверхности, возрастает. Естественно, что наибольшее влияние будет оказывать волна, испытавшая однократное отражение от свободной поверхности, и волна, претерпевшая двукратное отражение сперва от грунта, а затем от свободной поверхности. Элементарный расчет, отвечающий условиям наших опытов и произведенный с учетом сферического расхождения волн, показывает, что при $H_0 = 8$ *м*, $H = 2$ *м* и $a = 0{,}3$, звуковое давление в волне, претерпевшей однократное отражение от свободной поверхности воды, будет на 9 *дб* ниже, чем в волне, отраженной от грунта, в то время как звуковое давление в волне, претерпевшей отражение от грунта и от поверхности воды, будет на 20 *дб* ниже величины звукового давления в волне, однократно отраженной от грунта. Отсюда видно, что роль волны, испытавшей отражение от грунта и поверхности воды, практически несущественна, в то время как волна, отраженная только свободной поверхностью воды, может существенным образом участвовать в процессе формирования звукового поля у дна. Поэтому необходимо принимать меры для ослабления отражения звука свободной поверхностью воды. В наших опытах это осуществлялось путем применения экранированных излучателей. Оценка экспериментальных ошибок, вызванных отражением



Фиг. 1

звуковых волн от свободной поверхности воды, показывает, что для приведенных выше условий опыта, без экранирования излучателя, ошибка в измерениях коэффициента отражения составляет $\pm 10\%$; применение экранированного излучателя уменьшает ошибку до $\pm 3\%$.

Выражение для коэффициента отражения плоской волны может быть записано в виде

$$ae^{i\alpha} = \frac{m_0 e^{i\psi}\cos\vartheta - \sqrt{n_0^2 e^{2i\varphi} - \sin^2\vartheta}}{m_0 e^{i\psi}\cos\vartheta + \sqrt{n_0^2 e^{2i\varphi} - \sin^2\vartheta}}, \tag{4}$$

где

$$m_0 e^{i\psi} = \frac{\rho_1}{\rho_0}, \quad n_0 e^{i\varphi} = \frac{c_0}{c},$$

ϑ — угол падения звуковой волны, ρ_1 — плотность грунта, ρ_0 — плотность воды, c_1 — скорость звука в грунте и c_0 — скорость звука в воде.

Как показано в [5], формула (4) в ряде случаев может быть применена и при отражении сферических волн. Условия наших опытов отвечают требованию применимости формулы (4). Это дает нам право использовать указанную формулу для вычисления свойств исследуемой среды на основании опытных данных о коэффициенте отражения. Формулы, необходимые для этих вычислений, имеют вид:

$$\psi = \frac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\frac{g_1 d_1 - g_2 d_2}{g_1 q_1 - g_2 q_2}, \tag{5}$$

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sin^2\vartheta_2 - \sin^2\vartheta_1}{g_1(q_1\cos 2\psi + d_1\sin 2\psi) - g_2(q_2\cos 2\psi + d_2\sin 2\psi)}}, \tag{6}$$

$$\varphi = \frac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\frac{g_1 m_0^2(q_1\sin 2\psi - d_1\cos 2\psi)}{g_1 m_0^2(q_1\cos 2\psi + d_1\sin 2\psi) + \sin^2\vartheta_1}, \tag{7}$$

$$n_0 = \sqrt{\frac{m_0^2 g_1(q_1\cos 2\psi + d_1\sin 2\psi) + \sin^2\vartheta_1}{\cos 2\varphi}}, \tag{8}$$

где

$$g_{1,2} = \frac{\cos^2\vartheta_{1,2}}{(1 + a_{1,2}^2 + 2a_{1,2}\cos\alpha_{1,2})^2},$$

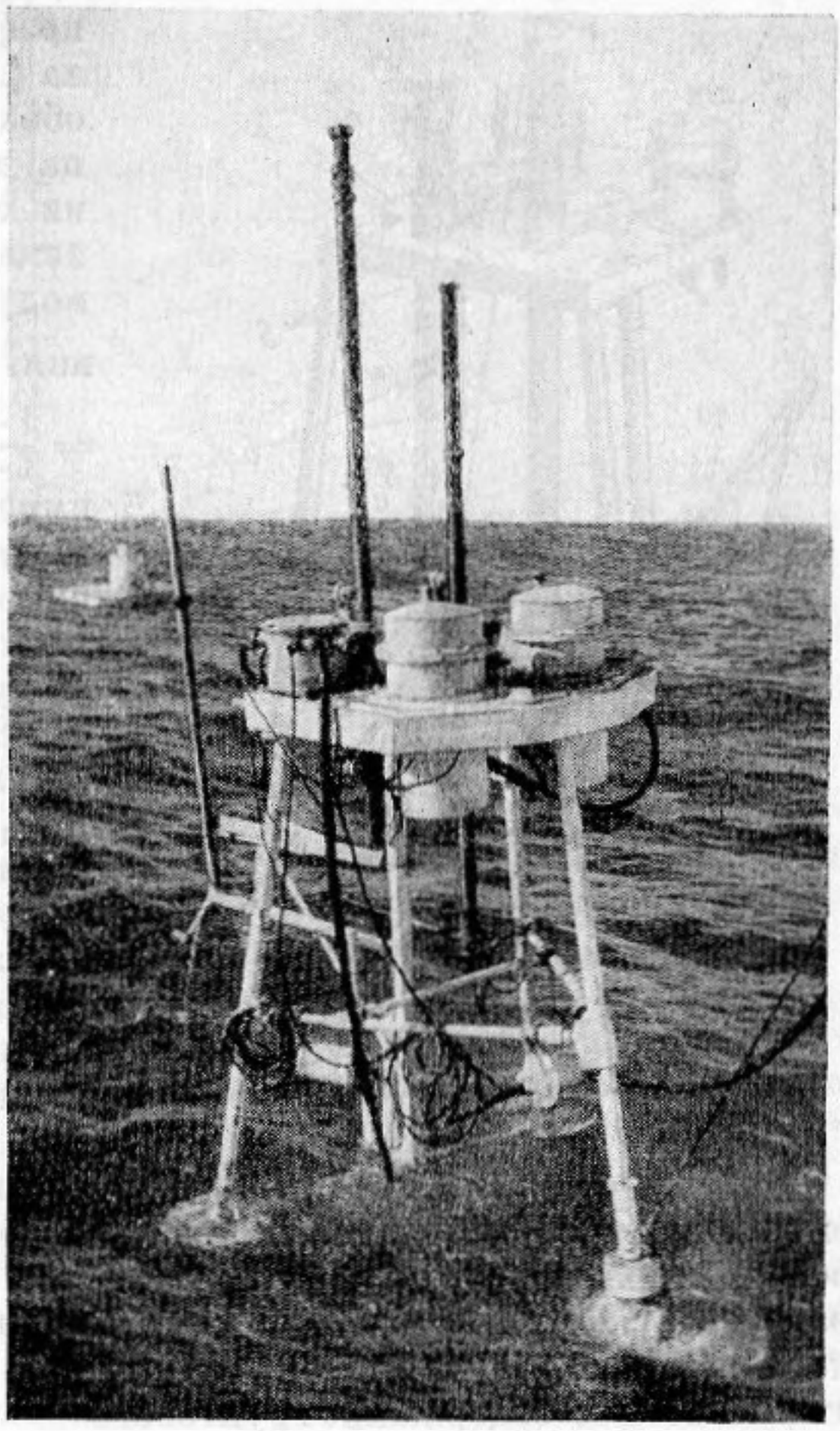
$$q_{1,2} = (1 - a_{1,2}^2)^2 - 4a_{1,2}^2\sin^2\alpha_{1,2}, \quad d_{1,2} = 2a_{1,2}(1 - a_{1,2}^2)\sin\alpha_{1,2}.$$

Из приведенных формул видно, что m_0, n_0, ψ и φ можно вычислить только в том случае, если a и α будут измерены, по крайней мере, при двух подходящим образом подобранных значениях ϑ. В силу этого, экспериментальная установка, при помощи которой проводятся подобные опыты, должна содержать в себе координатное устройство, обеспечивающее непрерывную регистрацию распределения звуковых давлений вдоль нормали к поверхности грунта, при различных углах падения звуковой волны на грунт.

Координатное устройство, применяемое в наших опытах, имеет вид, приведенный на фиг. 2. Схема этого устройства показана на фиг. 3. Здесь *1* — станина устройства, *2* — диски, предупреждающие увязание устройства в грунт, *3* и *4* — водонепроницаемые корпуса, в которых заключены механизмы электропривода; эти механизмы осуществляют вращение гаек *5*, что обеспечивает перемещение по вертикали винтов *6*. Винты использовались для вертикального перемещения звукоприемника, а иногда и излучателей; на схеме показан также звукоприемник *7*, укрепленный к головке винта при помощи поперечной штанги *8*. Излучатель *9* с экра-

ном, укрепленный на поворотной штанге *10*, перемещался по угловой координате при помощи троса *11*, соединенного с одним из винтов.

Координатное устройство позволяло задавать любое угловое положение (в пределах 0—80°) излучателя по отношению к нормали к грунту и перемещать звукоприемник вдоль нормали к поверхности грунта. Остановка винта несущего звукоприемник в крайних верхней и нижней точках выполнялась автоматически при помощи концевых выключателей. Схема электрической части установки приведена на фиг. 4. Здесь *1* — звуковой генератор, *2* — усилитель, *3* — излучатель, *4* — звукоприемник, *5* — предварительный усилитель, *6* — электромагнитное реле, *7* — гетеродинный фильтр, *8* — измерительный усилитель, *9* — регистратор логарифмического уровня звукового давления, *10* — электронный осциллоскоп, *11* — электропривод координатного устройства. Как видно из схемы электрической части установки, регистрация полезного сигнала могла осуществляться только при включенном электроприводе, т. е. во время движения звукоприемника. Это позволяло, по известной длине пути звукоприемника, вычислить масштаб записи на ленте регистратора. Точность указанных вычислений составляла 0,2%. Измерения коэффициента отражения проводились на частотах от 2 до 10 *кгц* с интервалами в 1 *кгц*. Для более тщательного обследования указанной полосы частот в некоторых случаях эти интервалы выбирались равными 200 или 500 *гц*.



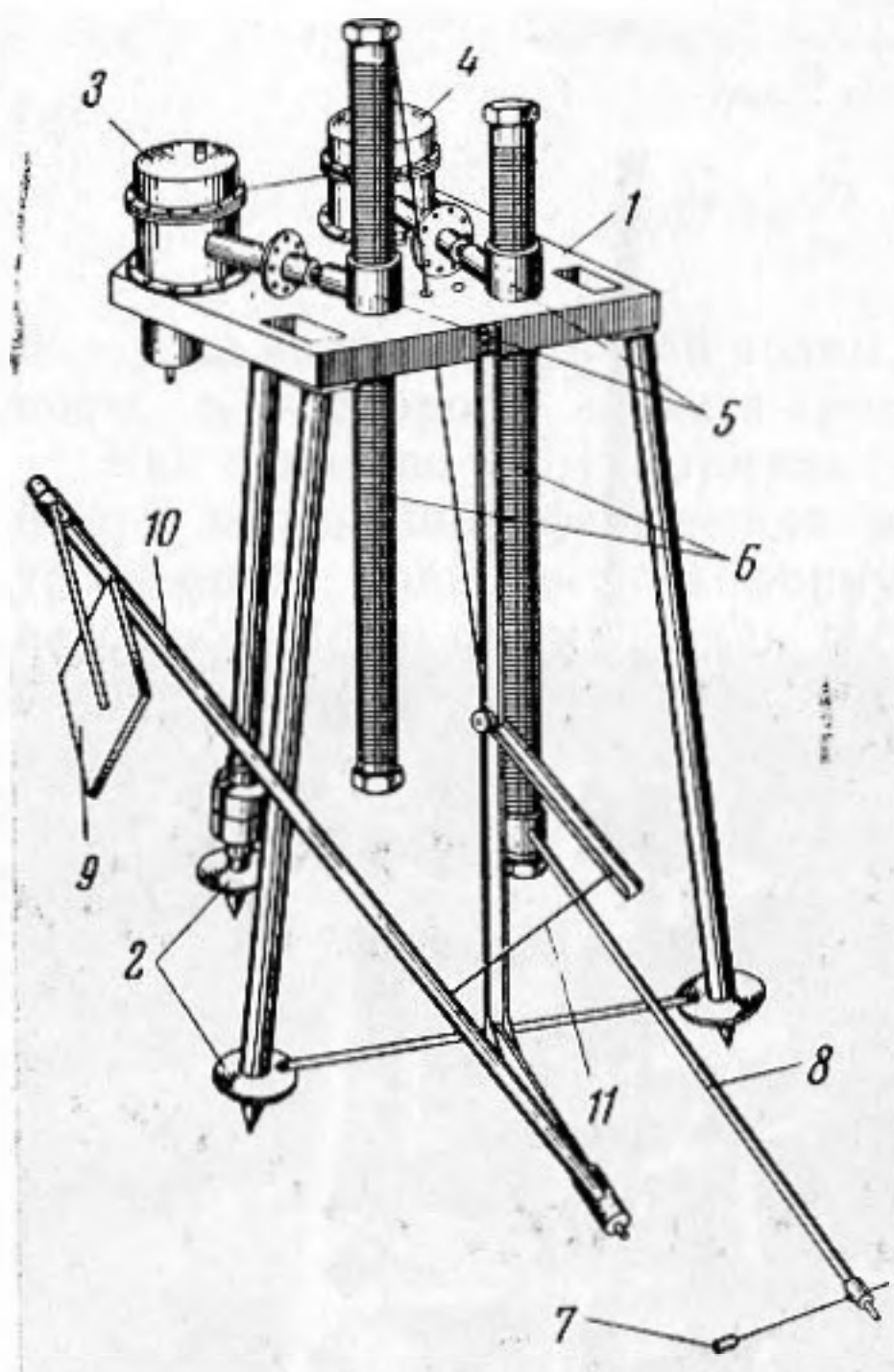
Фиг. 2

Описанные здесь опыты были поставлены летом 1955 г. на акватории Волжской научной станции Акустического института АН СССР на Московском море [6]. Выбор этого района был обусловлен наличием здесь различных по своему характеру грунтов. Коренной массив грунта в данном районе всюду составлен тяжелыми моренными суглинками. Измерения проводились в трех пунктах акватории; в точке *I* верхний слой грунта был песчаный при толщине массива песка около 1—2 *м*. Плотность песка составляла 1,86 $г \cdot см^{-3}$. В точке *II* верхний слой был песчано-илистый с плотностью 1,7 $г \cdot см^{-3}$. Наконец, в точке *III* поверхностный слой состоял из ила с плотностью 1,6 $г \cdot см^{-3}$. Глубина слоя воды в точке *I* составляла 6—8 *м*, в точках *II* и *III* — 11—14 *м*. Данные о составе грунта были получены путем анализа буровых колонок и поверхностных проб. Места, в которых производились измерения, были выбраны с горизонтальным и достаточно ровным дном. Предварительное обследование дна, с этой

точки зрения, производилось при помощи лота; в отдельных случаях водолазами проводилось более тщательное обследование дна.

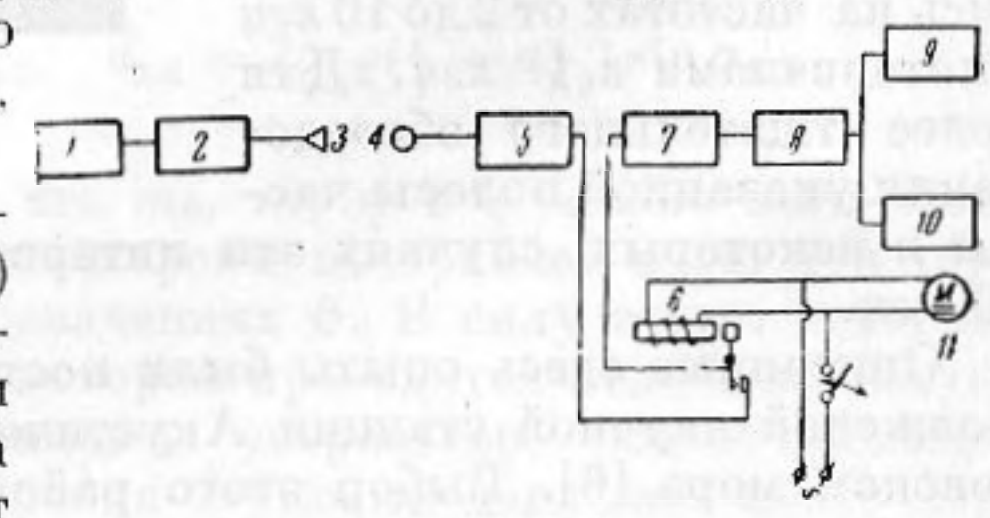
Измерения на Московском море во всех трех точках производились только с целью определения нормального коэффициента отражения.

Эти измерения показали, что для песчаного грунта (точка *I*) средние значения модуля и фазы коэффициента отражения соответственно равны 0,76 и 0,96 π. Частотный ход модуля коэффициента отражения приведен на фиг. 5. Каждый значок на фигуре обозначает среднее из 5—6 измерений на данной частоте. Различные значки соответствуют различным местам измерений. На основании данных о модуле и фазе коэффициента отражения, по известной формуле $\frac{Z}{\rho_0 c_0} = \frac{1+A}{1-A}$ (Z — входной нормальный импеданц грунта), были вычислены модуль и фаза входного нормального импеданца грунта, а также скорость распространения звука в грунте. Модуль входного импеданца равен $0{,}228 \cdot 10^5$ *г·см⁻²·сек⁻¹*, а его фаза составляет 24°; скорость звука в грунте $c_1 = 200$ *м/сек* *. Эти данные показывают, что исследуемый грунт представляет собой среду, отражение звука от которой подобно отражению от мягкой границы раздела двух сред. Из этого следует, что сжимаемость грунта значительно больше, чем сжимаемость воды. Естественно предположить, что увеличение сжимаемости грунта обусловлено наличием газовых включений, которые вместе с водой заполняют поры в грунтовом скелете. Если считать, что объемное распределение воды и газа в порах грунта достаточно равномерно, можно, используя выражение $c^2 = 1/K_1\rho_1$ (K_1 — сжимаемость грунта), вычислить объемное содержание грунтового газа. Наши вычисления показали, что оно составляет около 0,3%.



Фиг. 3

Измерения коэффициента отражения от илистого песка (точка *II*) показали, что среднее значение модуля коэффициента отражения в этом случае равно 0,68 (фиг. 6), а фаза коэффициента отражения составляет 0,76 π. При этом модуль и фаза входного нормального импеданца соответственно равны $0{,}63 \cdot 10^{-5}$ *г·см⁻²·сек⁻¹* и —58°. Скорость звука в данном грунте составляет 730 *м·сек⁻¹*.

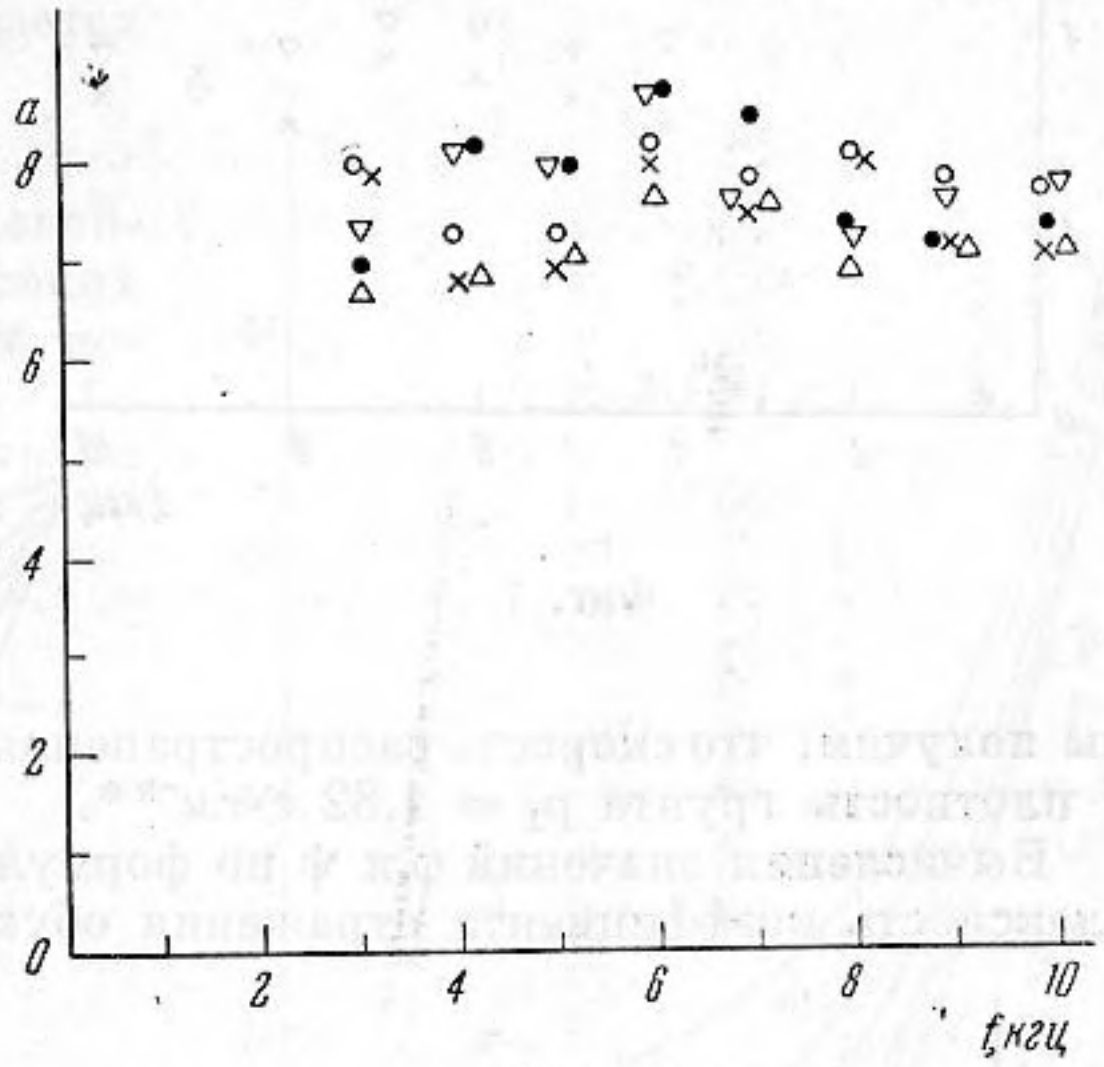


Фиг. 4

Измерения, проведенные на илистом грунте (точка *III*), показали, что среднее значение модуля коэффициента отражения здесь равно 0,36 (фиг. 7), а фаза коэффициента отражения составляет 0,61 π. Модуль и фаза входного импеданца соответственно равны 1,16 *г·см⁻²·сек⁻¹* и

* На возможность существования подводных грунтов, имеющих скорость звука порядка 200 *м·сек⁻¹* и меньше, было указано В. С. Нестеровым.

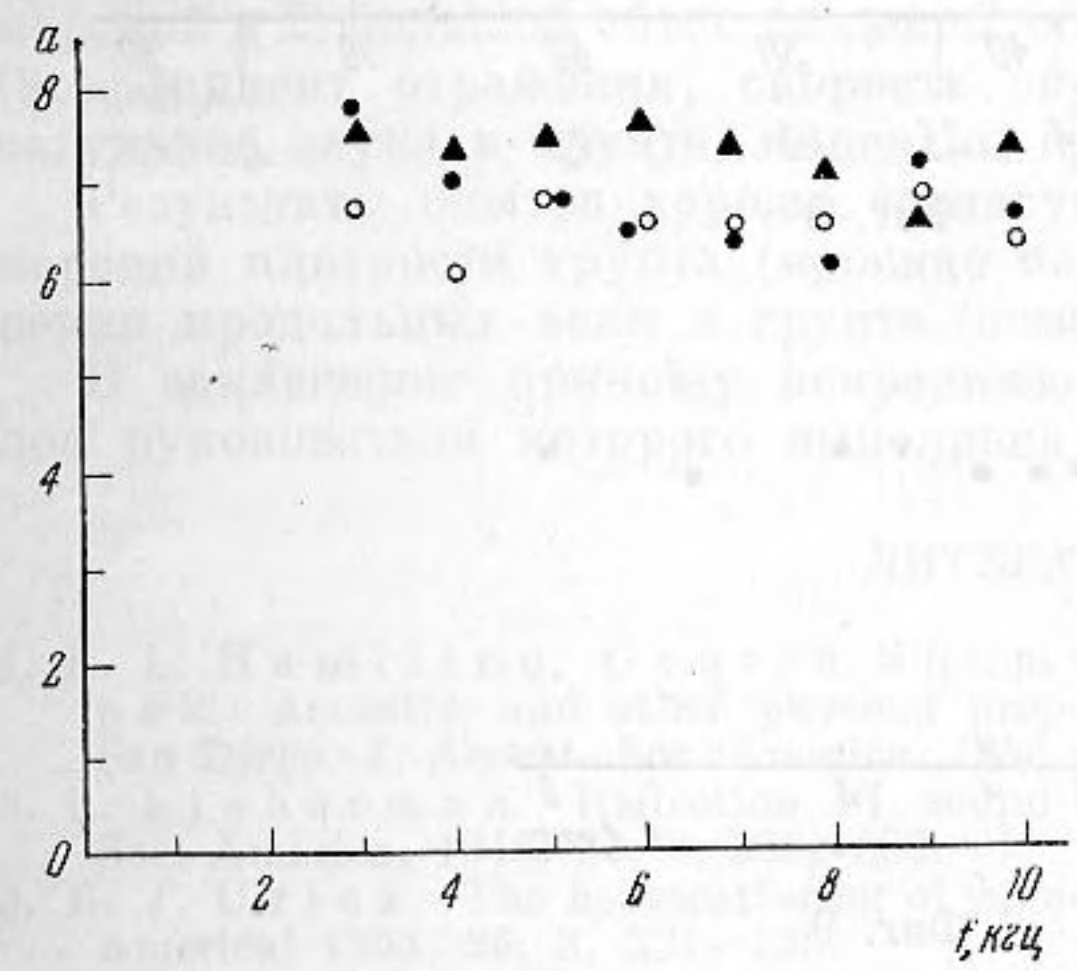
— 40°; скорость в грунте составляет 1000 *м·сек*$^{-1}$. Грунт в точках *II* и *III*, как и в точке *I*, ведет себя как «мягкая» среда. Однако здесь наблюдаются значительно большие, чем в песчаных грунтах, скорости распространения звука. Мы предполагаем, что увеличение скорости звука в песчано-илистых и илистых грунтах обусловлено главным образом меньшим содержанием в них газа.



Фиг. 5

При измерениях фазы коэффициента отражения было установлено, что отражение звука происходит не от естественной границы раздела вода —грунт, а как бы от поверхности, находящейся несколько ниже этой границы. Из этого следует, что тонкий поверхностный слой исследованных нами грунтов представляет собой среду, акустические свойства которой мало отличаются от акустических свойств воды. Толщина этого слоя — назовем его прозрачным — составляет для песчаных грунтов 2÷3 *см*. С возрастанием илистости толщина прозрачного слоя в районе наших измерений также возрастала. В тех местах, где грунт представлял собой массив ила с глубиной залегания не менее 60 *см*, толщина этого слоя составляла уже 4÷8 *см*.

Опыты на Московском море показали, что описанная выше методика вполне пригодна для исследования акустических свойств подводного грунта, а экспериментальная установка дает возможность измерить модуль и фазу коэффициента отражения.

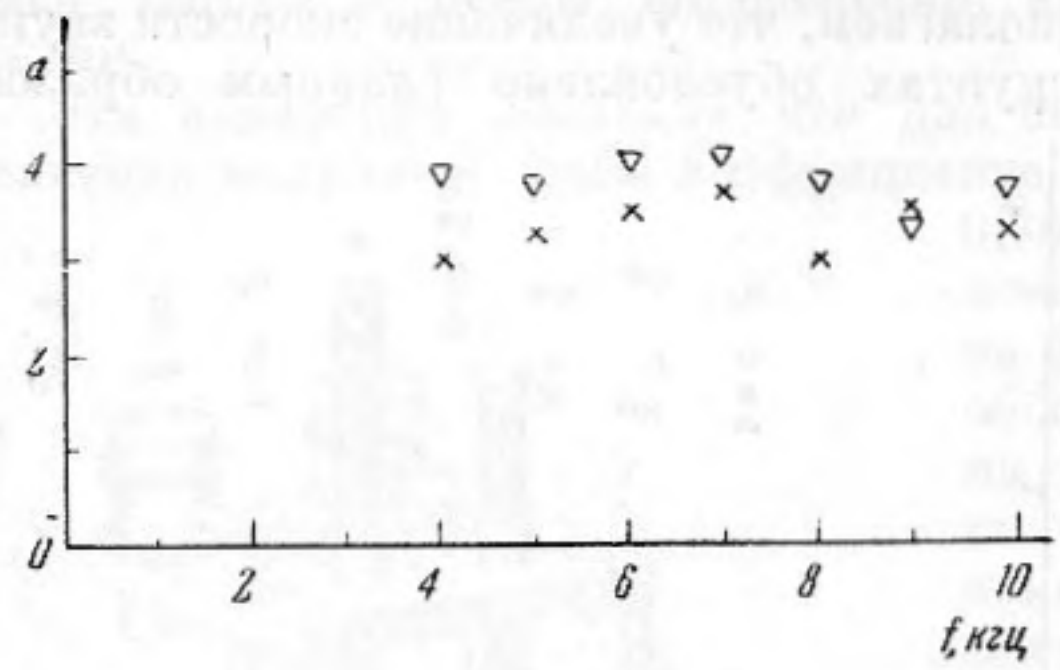


Фиг. 6

Следующим этапом наших опытов были измерения акустических свойств морского грунта. Эти измерения были поставлены осенью 1956 г. на Каспийском море в районе банки «Нефтяные камни». Грунт в районе проведения измерений представлял собой глинистый массив толщиною не менее 5 *м*. В отличие от измерений на Московском море, измерения производились с целью определения не только частотной, но и угловой характеристики коэффициента отражения.

Частотная зависимость модуля нормального коэффициента отражения приведена на фиг. 8. Как видно из графика, подавляющее число экспериментальных точек лежит в пределах 0,3—0,4. Среднее, из всех приведенных на фиг. 7 значений модуля коэффициента отражения, составляет 0,35. Частотная характеристика фазы нормального коэффициента отражения приведена на фиг. 9. Экспериментальные точки лежат в полосе от +0,005 π до —0,075 π; среднее значение фазы коэффициента отражения

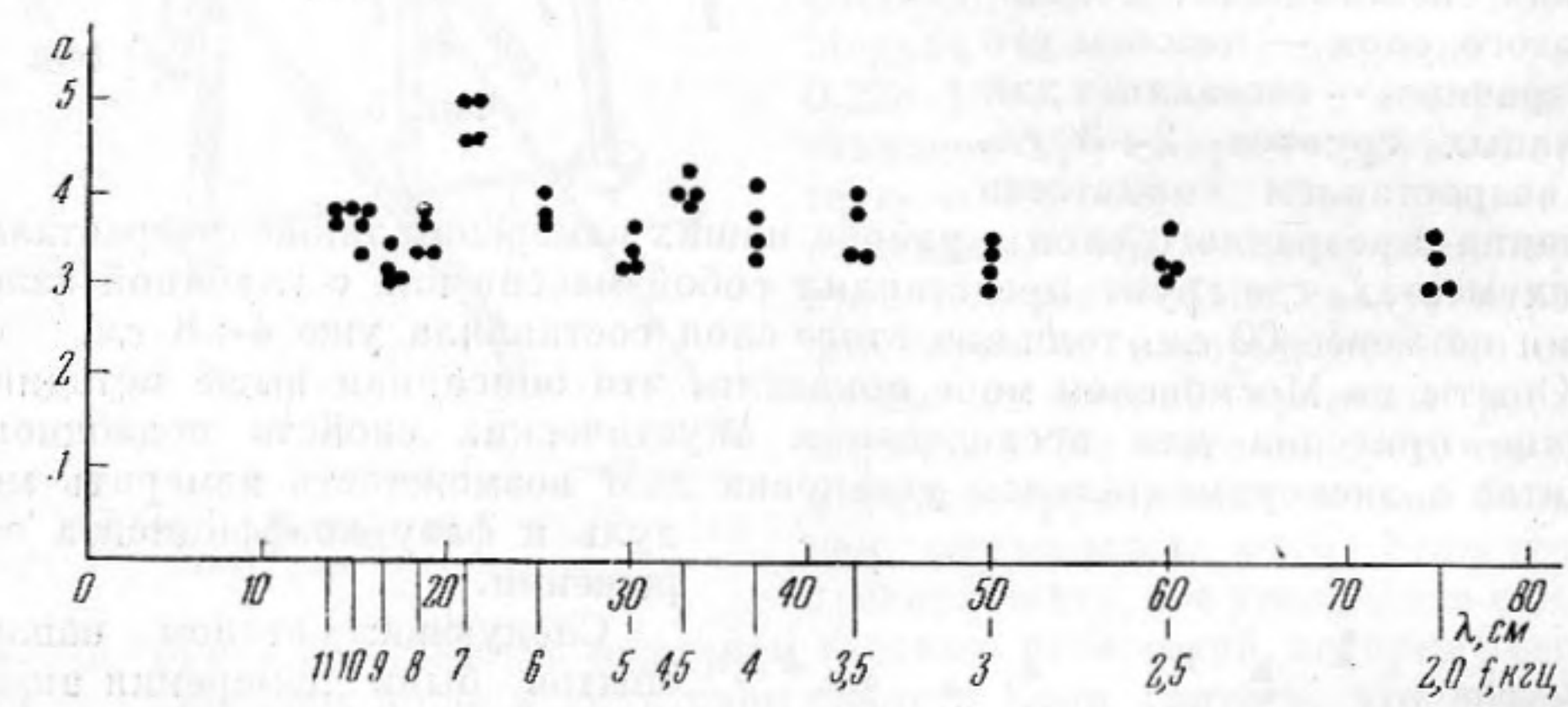
составляет — 0,04 π. На основании приведенных данных о модуле и фазе коэффициента отражения были вычислены входной нормальный импеданц и скорость звука в грунте. Модуль входного импеданца оказался равным $3{,}17 \cdot 10^5$ *г·см*$^{-2}$·*сек*$^{-1}$, а фаза —4°. При помощи формул (6) и (8) были также вычислены n_0 и m_0. Они равны, соответственно, 0,85 и 1,79.



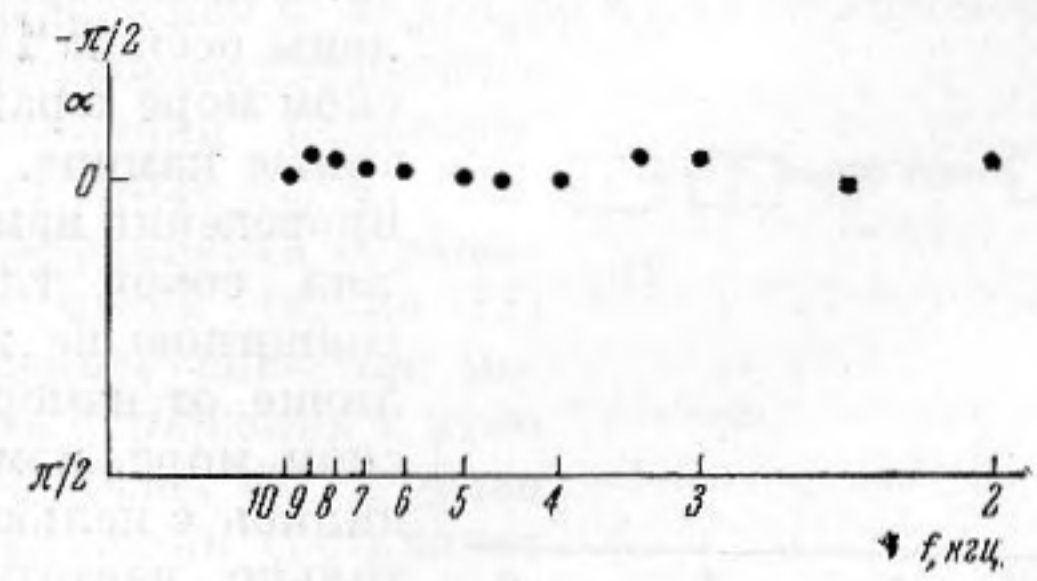
Фиг. 7

Гидрологические данные о районе измерений, а также наши опыты показывают, что скорость звука в воде в данное время года меняется от 1480 *м·сек*$^{-1}$ до 1490 *м·сек*$^{-1}$ (среднее значение 1486 *м·сек*$^{-1}$), а плотность воды составляет 1,02 *г·см*$^{-3}$. На этом основании, с учетом приведенных значений n_0 и m_0, мы получим, что скорость распространения звука в грунте $c_1 = 1755$ *м·сек*$^{-1}$ и плотность грунта $\rho_1 = 1{,}82$ *г·см*$^{-3}$ *.

Вычисления значений φ и ψ по формулам (5) и (7) показали, что комплексность коэффициента отражения обусловлена главным образом комплексностью показателя преломления. Расчет показал, что мнимая часть показателя преломления составляет около 8% от действительной, что соответствует φ = — 5°.



Фиг. 8



Фиг. 9

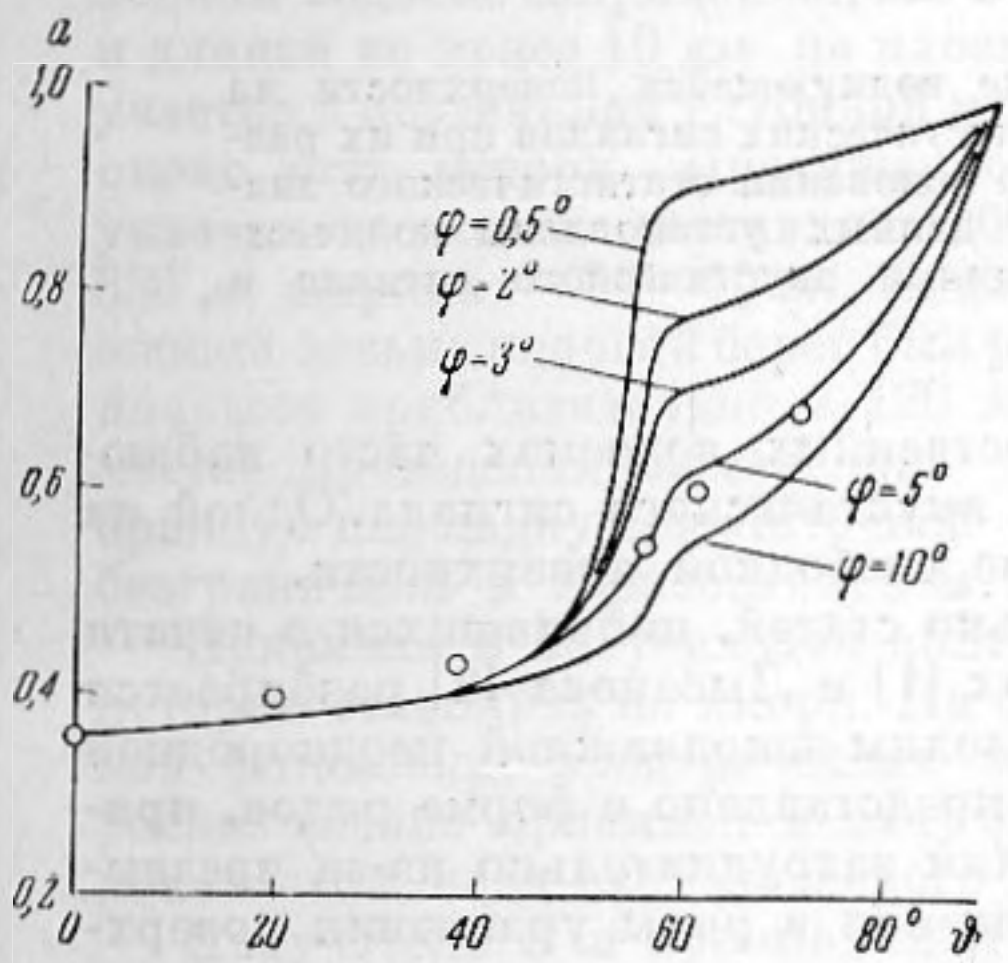
---

* Заметим, что геологические исследования, проведенные Управлением геологических изысканий Министерства нефтяной промышленности АзССР [7] в том же районе, показали среднее значение плотности верхнего слоя грунта 1,8 *г · см*$^{-3}$ и скорость звука в пределах от 1650 *м · сек*$^{-1}$ до 1800 *м · сек*$^{-1}$.

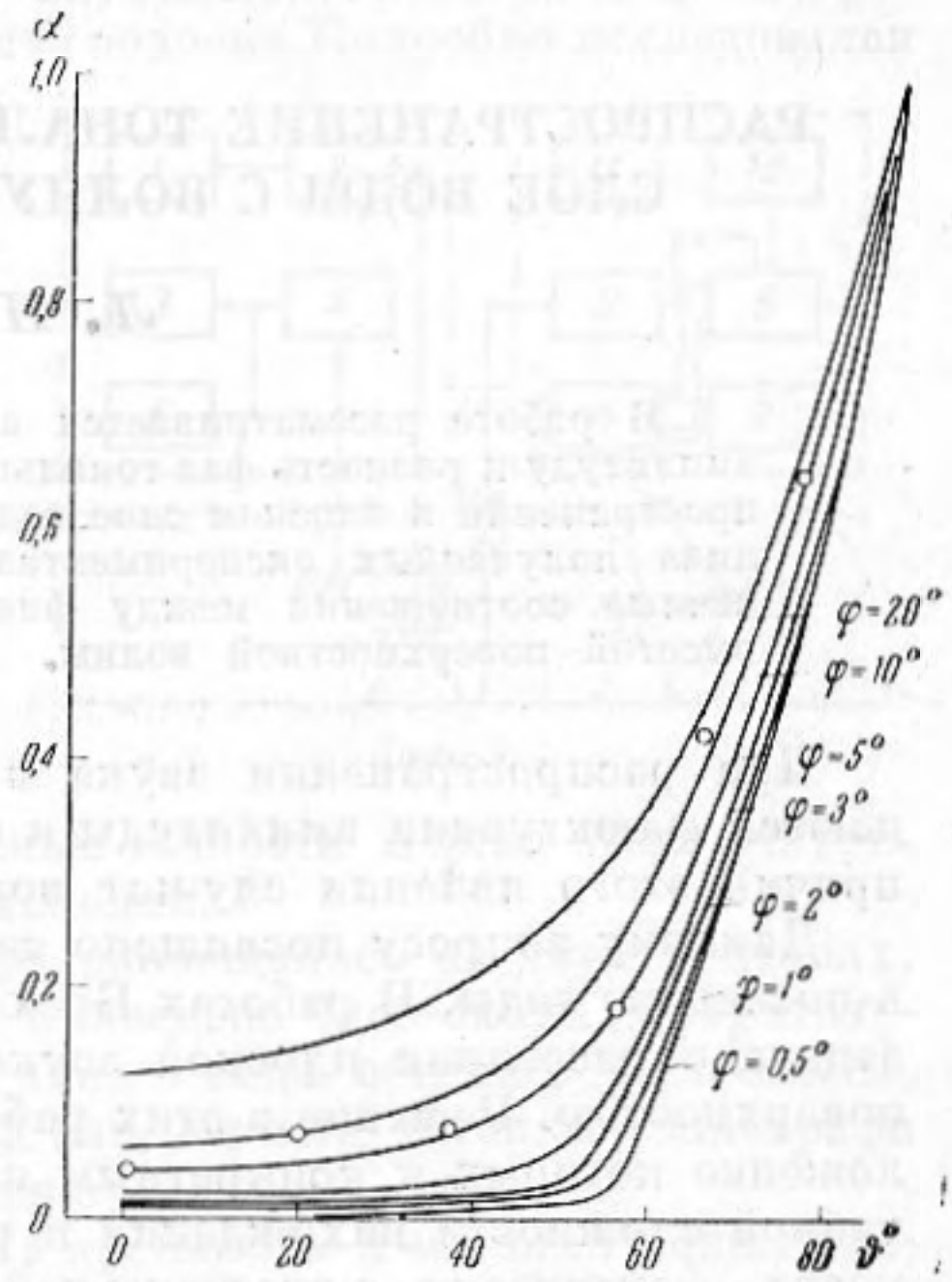
На фиг. 10 и 11 приведены теоретические кривые, параметрами которых выбраны: $m_0 = 1{,}79$; $n_0 = 0{,}85$ и $\varphi = -0°30'$; $-1°$; $-3°$; $-5°$; $-10°$. На этих же графиках нанесены усредненные по частоте данные о модуле и фазе коэффициента отражения, полученные опытным путем. Удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом наблюдается при $\varphi = -5°$.

Выводы

Для измерения акустических свойств подводного грунта на высоких звуковых частотах может быть использован метод стоячих волн. К достоинствам этого метода исследования подводного грунта следует отнести: 1) сравнительно высокую точность измерений и 2) большой объем сведений об акустических свойствах грунта (коэффициент отражения, скорость звука в грунте, плотность грунта, затухание звука в грунте, импеданц грунта).



Фиг. 10



Фиг. 11

Результаты опытов хорошо согласуются с результатами прямых измерений плотности грунта (морские измерения) и скорости распространения продольных волн в грунте (измерения в озерных условиях).

В заключение приношу искреннюю благодарность В. С. Григорьеву, под руководством которого выполнена настоящая работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. L. Hamilton, George Shumway, H. W. Menard, C. J. Shipek. Acoustic and other physical properties of shallow — water sediments of San Diego. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 1, 1—15.
2. L. Lieberman. Reflection of sound from coastal sea bottoms. J. Acoust. Soc. America, 1948, 20, 3, 305—309.
3. R. J. Urick. The backscattering of sound from a harbor bottom. J. Acoust. Soc. America, 1954, 26, 2, 231—235.
4. Н. А. Грубник. Измерение акустического сопротивления (импеданца) грунта дна (дипломная работа). Акустический ин-т АН СССР, 1952.
5. Л. М. Бреховских. Волны в слоистых средах (§ 19, 227—229). М., Изд-во АН СССР, 1957.
6. Н. А. Грубник. Измерение коэффициента отражения от подводного морского грунта. Отчет Акустического ин-та АН СССР, 1958.
7. Отчет Управления геологических изысканий МНП АзССР (на правах рукописи).

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
11 марта 1959 г.