

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЗАТУХАНИЯ ЗВУКА В ПОВЕРХНОСТНОМ  
ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СЛОЕ ВОДЫ

А. Н. Бархатов

Показано, что описанный ранее [1] метод исследования распространения звука в слоисто-неоднородной среде может быть успешно применен в лабораторных условиях для исследования ослабления звука в поверхностном изотермическом слое воды при наличии ниже этого слоя среды с отрицательным вертикальным градиентом скорости звука. Измеренные на опыте величины ослабления находятся в хорошем согласии с теоретическими.

В работе Л. М. Бреховских [2] решена методами волновой теории задача о распространении звука от точечного ненаправленного источника в слоисто-неоднородной среде, где скорость звука зависит от координаты  $z$  следующим образом:

$$c = c_0 \text{ при } 0 \leq z < H; \quad c = \frac{c_0}{\sqrt{1+2\eta(z-H)}} \text{ при } H \leq z < \infty \quad (1)$$

и остается неизменной в плоскостях, перпендикулярных  $z$ . Граница  $z=0$  предполагается полностью отражающей, что соответствует, например, случаю, когда полупространство  $z > 0$  является водой, а  $z < 0$  — воздухом.

Так как в практически интересных случаях распространения звука в слоисто-неоднородной среде величина  $\eta z \ll 1$ , то закон изменения (1) может быть сведен к виду

$$c(z) = c_0 [1 - \eta(z-H)] \text{ при } H \leq z < \infty, \quad (2)$$

а при  $H = 0$  — к частному случаю, рассмотренному Пекерисом [3].

Таким образом, в [2] решена задача о распространении звука в поверхностном однородном квазиизотермическом слое, расположенном над средой с постоянным вертикальным градиентом скорости звука.

Более подробно эта задача рассмотрена Л. М. Бреховских и И. Д. Ивановым в [4]; показано, что при распространении звука в однородном слое происходит своеобразное «затухание» звука, связанное с отсосом звуковой энергии в среду, где имеется градиент скорости звука. Величина ослабления звука характеризуется параметром

$$s = 1,64 \frac{H}{c_0} (\xi f^2)^{1/2},$$

где  $\xi = \eta c_0$ ,  $f$  — частота в герцах. Значение параметра  $s = 0$  соответствует случаю максимального ослабления (случай Пекериса).

В работе автора [1] описан метод лабораторного исследования закона ослабления звука с расстоянием в слоисто-неоднородной среде с постоянным вертикальным градиентом температуры, что практически означает также постоянство градиента скорости звука. Результаты измерений удовлетворительно согласуются с величинами ослабления звука, вычисленными по теории Пекериса.

Разработанный нами метод модельного исследования звукового поля в слоисто-неоднородной среде был применен также для изучения ослабле-

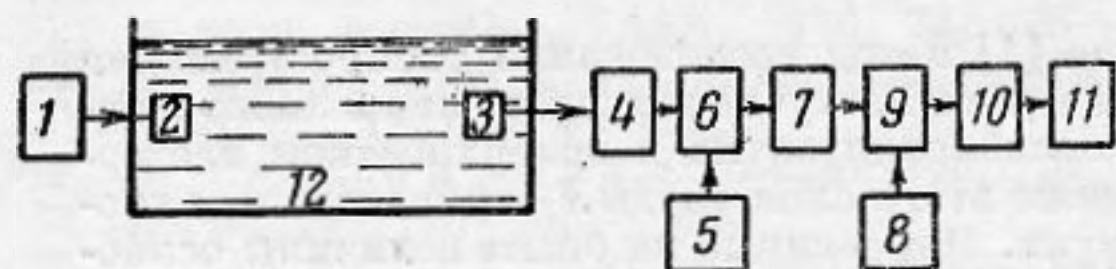


ния звука в водной среде, в которой имеет место следующее вертикальное распределение температуры:

$$t = t_0 \text{ при } 0 \leq z < H; \quad t = t_0 [1 - a(z - H)] \text{ при } z \geq H, \quad (3)$$

а изотермические поверхности горизонтальны.

Среду с таким распределением температуры по глубине с некоторым приближением можно считать подобной среде, где существует закон изменения скорости (2). Зависимость градиента скорости от координаты  $z$  при  $z \geq H$ , которая появляется при постоянном градиенте температуры, учитывается в вычислениях, как и в предыдущей работе, усреднением градиента скорости по глубине, на которой проводятся измерения.



Фиг. 1. Блок-схема установки:

1 — генератор импульсов высокой частоты, 2 — излучатель, 3 — приемник звукового давления, 4 — усилитель принимаемых сигналов, 5 — генератор селекторных импульсов, 6 — селекторный усилитель, 7 — пиковый детектор, 8 — генератор несущей частоты 10 кгц, 9 — модулятор, 10 — ограничитель по минимуму, 11 — логарифмический регистратор, 12 — ванна

образовывались в акустические при помощи излучателя в виде круглой пластинки из поляризованного титаната бария диаметром 7 мм. Звук принимался акустическим щупом, представляющим собой кубик из титаната бария размером  $2 \times 2 \times 2$  мм<sup>3</sup>; отсчет звукового деления производился в делениях сетки шкалы электронного осциллографа.

Перед проведением измерений в ванне устанавливался постоянный вертикальный температурный градиент. Далее следовало получить однородный по температуре поверхностный слой воды. Наиболее действенным способом для этого оказалось применение резкого понижения температуры в комнате в сочетании с ветром над поверхностью, создаваемым вентиляторами.

Таким образом удавалось получать изотермический слой толщиной от 2 до 10 см. Ниже этого слоя сохранялся отрицательный температурный градиент, который мало отличался от первоначального. Над ванной находился координатник, позволявший устанавливать акустический щуп в различных точках и измерять в них звуковое давление.

Однако способ исследования звукового поля по точкам имеет тот недостаток, что при больших размерах ванны требуется значительное время для проведения акустических измерений. Сами результаты измерений звукового поля по точкам могут оказаться недостаточно точными, если за время опыта изменятся условия распространения звука в ванне. Кроме того, снятие звукового поля по точкам требует дополнительной обработки результатов измерений.

Вместо исследования звукового поля по точкам можно применить метод автоматической записи звука вдоль ванны. Этот метод более подробно описывается в работе В. Я. Яшкова и автора [5]. В основу его положено использование генератора селекторных импульсов для выделения прямого акустического сигнала, приходящего на приемник звукового давления. Блок-схема установки представлена на фиг. 1.

На вход усилителя принимаемых импульсов 4 попадают сдвинутые по времени относительно друг друга: электрический импульс, который наводится генератором высокой частоты, напряжение от прямого акустического импульса и напряжение от импульсов, полученных в результате

Экспериментальная установка, состоящая из ванны с термическим, механическим и электроакустическим оборудованием, описана в [1]; она применялась ранее при исследовании звукового поля в области геометрической тени. Электрический генератор формировал импульсы продолжительностью около 40 мксек, заполненные частотой 530 кгц, которые пре-



отражений от дна ванны, стенок и др. Установка предназначена для выделения из этой суммы напряжений прямого акустического импульса. Для этого усилитель принимаемых импульсов должен открываться через промежутки времени, равные времени распространения импульса от излучателя до акустического щупа, и снова закрываться, как только проходит этот импульс. Время распространения импульса от излучателя до щупа зависит линейно от расстояния между ними. Необходимое для работы время задержки открывания усилителя относительно момента выработки импульса генератором автоматически меняется с изменением расстояния посредством расположенного вдоль ванны линейного сопротивления, по которому скользит при движении контакт, смонтированный на каретке со щупом. Для выделения нужного импульса из сигнала, принятого щупом, служит селекторный усилитель 6, соединенный с генератором селекторных импульсов 5. Подбирая момент открывания селекторного усилителя, можно выделить любой импульс, в том числе и первый акустический. Избранный селекторным усилителем сигнал-импульс подается на пиковый детектор 7, постоянная времени которого равна 0,05 сек. Каретка с акустическим щупом автоматически перемещается вдоль ванны с постоянной скоростью при помощи мотора с редуктором и шкивом и системы блоков. При скорости передвижения щупа, применявшейся в работе (7,5 см/сек), напряжение на нагрузке детектора успевает следовать за изменением амплитуды принимаемого высокочастотного импульса. Положительное напряжение, снимаемое с нагрузки детектора, поступает на катодный повторитель. На нагрузке катодного повторителя образуется напряжение, пропорциональное амплитуде избранного высокочастотного импульса. Это напряжение может быть использовано для автоматической записи звукового давления в линейном масштабе, например, при помощи шлейфового осциллографа.

Для получения записи звука в децибелах использован логарифмический регистратор уровня типа Неймана. Для этого измеряемое напряжение необходимо превратить в переменное напряжение с частотой, лежащей в пределах рабочих частот регистратора, и амплитудой, меняющейся пропорционально сигналу. Такое преобразование осуществляется при помощи модулятора 9 с задающим генератором 8 в виде симметричного мультивибратора, работающего на несущей частоте 10 кгц. Для устранения существующей в схеме нелинейности преобразования для малых сигналов введен ограничитель по минимуму 10. Ограничитель малых амплитуд не пропускает напряжение меньше 3 в. Выходное напряжение поступает на вход регистратора 11 и записывается в логарифмическом масштабе.

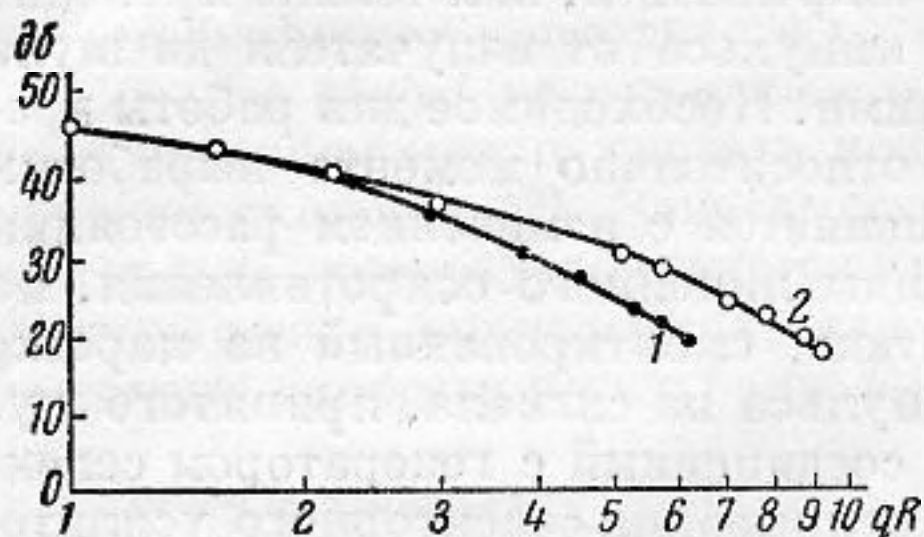
Контрольная проверка показала, что результаты, полученные при измерениях звукового поля по точкам и при помощи регистратора, совпадают. При проведении работы использованы оба метода.

Были поставлены опыты по измерению ослабления звука в поверхностном квазиизотермическом слое, ниже которого смоделирован описанным ранее способом постоянный отрицательный вертикальный градиент температуры. При этом подбирались такие условия эксперимента, чтобы можно было исследовать распространение звука при различных значениях параметра  $z$ , что осуществлялось при помощи комбинаций подходящей толщины однородного слоя и величины градиента скорости. Частота и продолжительность посылаемых импульсов не менялись во время всех опытов. Кроме того, изучалось влияние на ослабление относительных глубин погружения излучателя и приемника звука, которые в дальнейшем характеризуются соответственно числами  $m = \frac{h}{H}$  и  $n = \frac{z}{H}$ , где  $h$  и  $z$  — глубины погружения соответственно излучателя и приемника. В настоящей работе рассматривается звуковое поле, образованное источником, расположенным в однородном слое ( $m < 1$ ); поле наиболее полно исследовано также в пределах однородного слоя.

Многочисленные опыты, в которых параметр  $z$  изменялся в пределах от

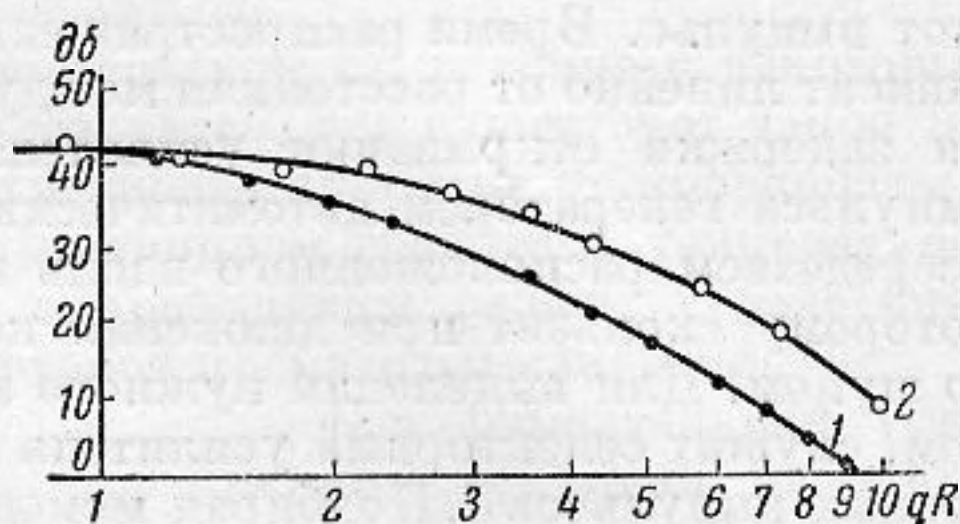


0,4 до 3,0, позволили обнаружить ряд закономерностей в распределении звукового поля. В ближней к излучателю области наблюдалась интерференционная картина, которая оказалась тем шире, чем больше значение параметра  $s$ . При удалении от излучателя чередование максимумов и миниму-



Фиг. 2. Кривые ослабления звука при различных значениях параметра —  $s < 1$ ,  
 $m = n = 0,25$ :

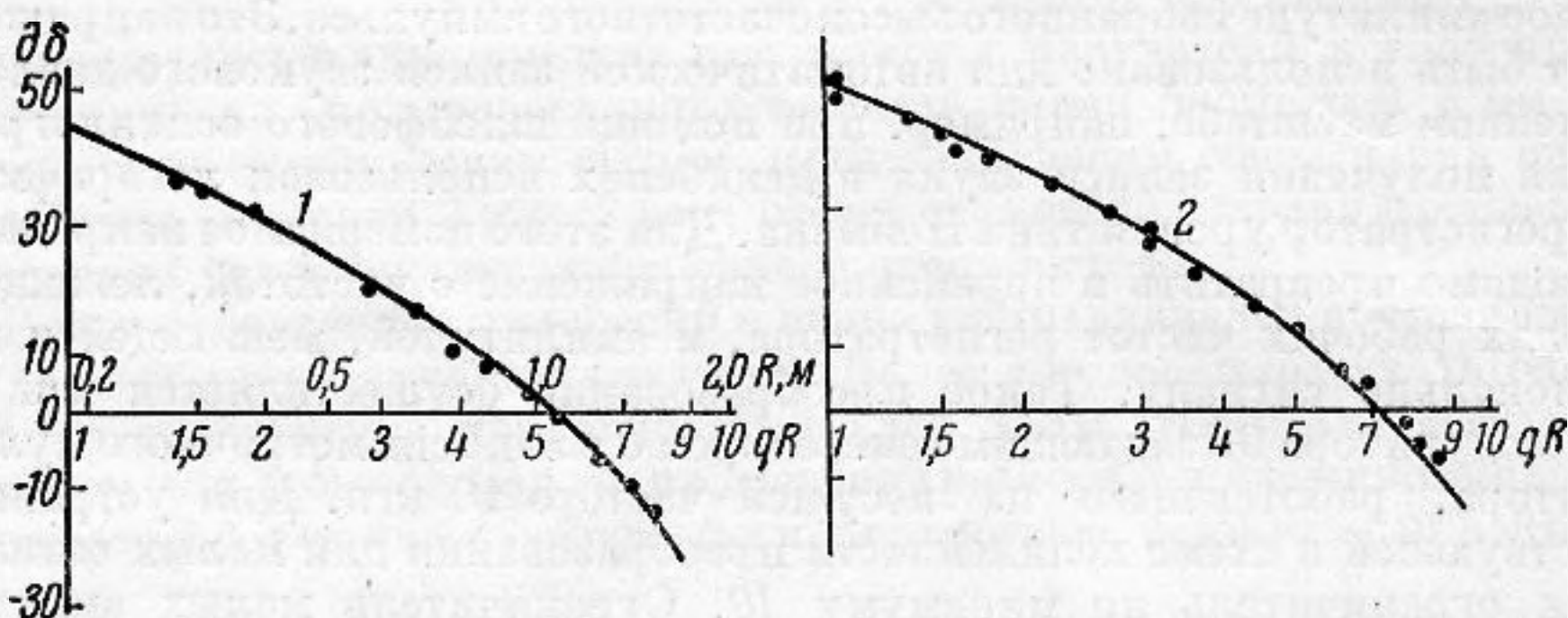
1 —  $H = 1$  см,  $a = 0,4^\circ/\text{см}$ ,  $s = 0,43$ ,  $q = 7,2$  1/м,  
2 —  $H = 2$  см,  $a = 0,3^\circ/\text{см}$ ,  $s = 0,85$ ,  $q = 7,2$  1/м,



Фиг. 3. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими:

1 —  $H = 1$  см,  $m = n = 0,5$ ,  $a = 0,5^\circ/\text{см}$ ;  
 $s = 0,36$ ,  $q = 5,2$  1/м, 2 —  $H = 2$  см,  $m = n =$   
 $= 0,25$ ,  $a = 0,4^\circ/\text{см}$ ,  $s = 0,68$ ,  $q = 4,7$  1/м

мов сменялось монотонным уменьшением интенсивности звука. В качестве примера на фиг. 2 приведены две экспериментальные кривые, показывающие зависимость ослабления звука от безразмерной величины  $qR$  при



Фиг. 4. Кривые ослабления звука на различных уровнях  $s = 1,23$ ,  $m = 0,2$ :  
1 —  $n = 0,4$ , 2 —  $n = 0,8$

различных значениях параметра  $q$  и одинаковых в обоих случаях величинах  $m$  и  $n$ .  $R$  есть расстояние до излучателя, а  $q$  имеет следующий вид [4]:

$$q = k_0 \left( \frac{3\eta}{k_0} \right)^{2/3}, \quad \text{где } k_0 = \frac{\omega}{c_0}.$$

Из сравнения кривых видно, что ослабление звука на единицу величины  $qR$  увеличивается при прочих равных условиях при уменьшении параметра  $s$ . Этот вывод находится в согласии с теорией [2, 4].

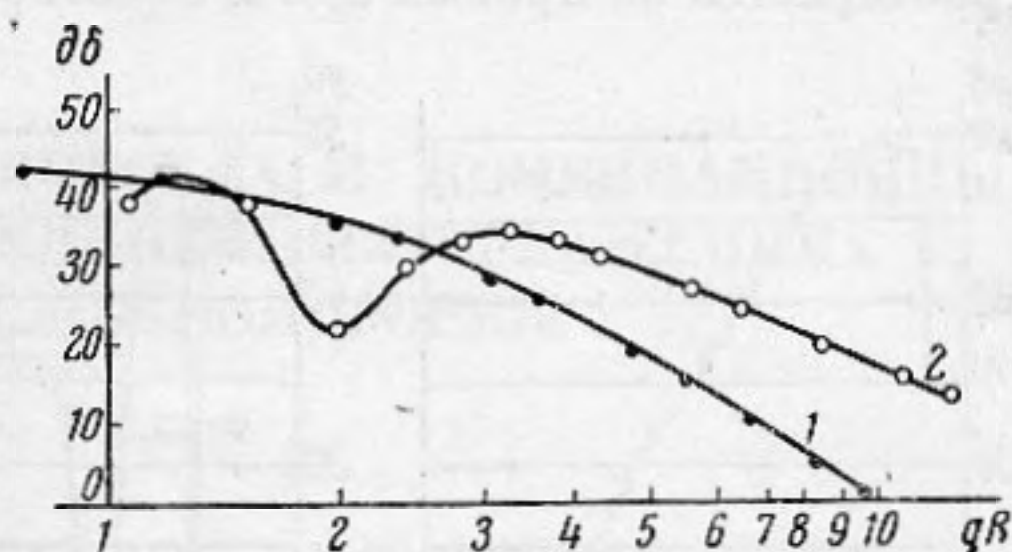
На фиг. 3 показана экспериментальная зависимость ослабления звука от относительной глубины погружения приемника. Из сравнения приведенных кривых видно, что внутри изотермического слоя величина ослабления тем больше, чем ближе от поверхности воды перемещается звукоприемник. Этот вывод также согласуется с теорией.

Более точное сравнение экспериментальных данных об ослаблении звука в однородном слое с теоретическими было выполнено для отдельных, произвольно выбранных экспериментов. На фиг. 4 приведены теоретические кривые ослабления звука, вычисленные (кривые построены по расчетам теоретического отдела Акустического института АН СССР) для двух



случаев распространения звука. Там же нанесены экспериментальные точки, которые, как это видно из фигуры, хорошо ложатся на теоретические кривые. Таким образом, можно считать, что теория распространения звука в рассматриваемой среде, изложенная в работах [2, 4], хорошо согласуется с опытом для малых значений параметра  $s$  ( $s < 1$ ).

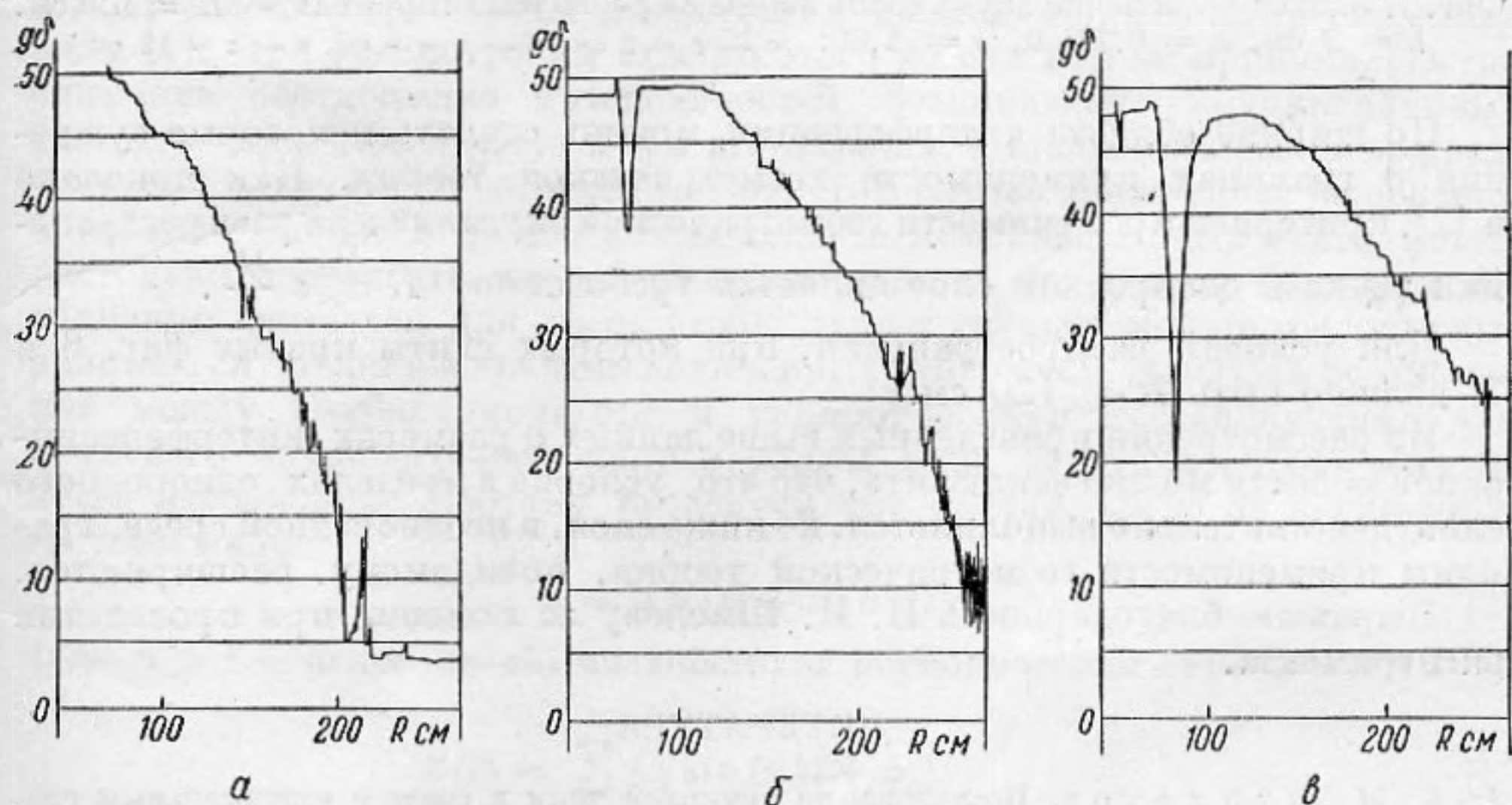
На фиг. 5 приведены две экспериментальные кривые ослабления, определенные при  $s > 1$ . Точное количественное сравнение подобных кривых с теоретическими не проводилось, но имеется возможность сопоставить кривые фиг. 5 с теоретической кривой  $\delta$  на фиг. 2 в [4], построенной при  $s = 1$ , так как значения величин  $m$  и  $n$  в сопоставляемых кривых одинаковы:  $m = 0,2$ ,  $n = 0,4$ . При  $s = 1$  среднее теоретическое затухание на единицу  $qR$  в промежутке от  $qR = 1$  до  $qR = 10$  равно 4,5 дб. Экспериментальные кривые фиг. 5



Фиг. 5. Кривые ослабления звука при различных значениях параметра —  $s > 1$ ,  $m = 0,2$ ,  $n = 0,4$ :

1 —  $H = 5$  см,  $a = 0,3^\circ/\text{см}$ ,  $s = 1,23$ ,  $q = 3,9^1/\text{м}$ ,  
2 —  $H = 9$  см,  $a = 0,4^\circ/\text{см}$ ,  $s = 3,0$ ,  $q = 4,5^1/\text{м}$

дают в тех же пределах величину ослабления при  $s = 1,2$  и  $3,0$  соответственно 4,7 и 3,2 дб. Сопоставление этих величин показывает, что при больших  $s$  на опыте получены величины ослабления, несколько преувеличенные по сравнению с теоретическими.



Фиг. 6. Записи ослабления звука вдоль ванны\* на различных глубинах —  $H = 4,5$  см,  $h = 2$  см,  $a = 0,53^\circ/\text{см}$ ;  $s = 1,74$ :

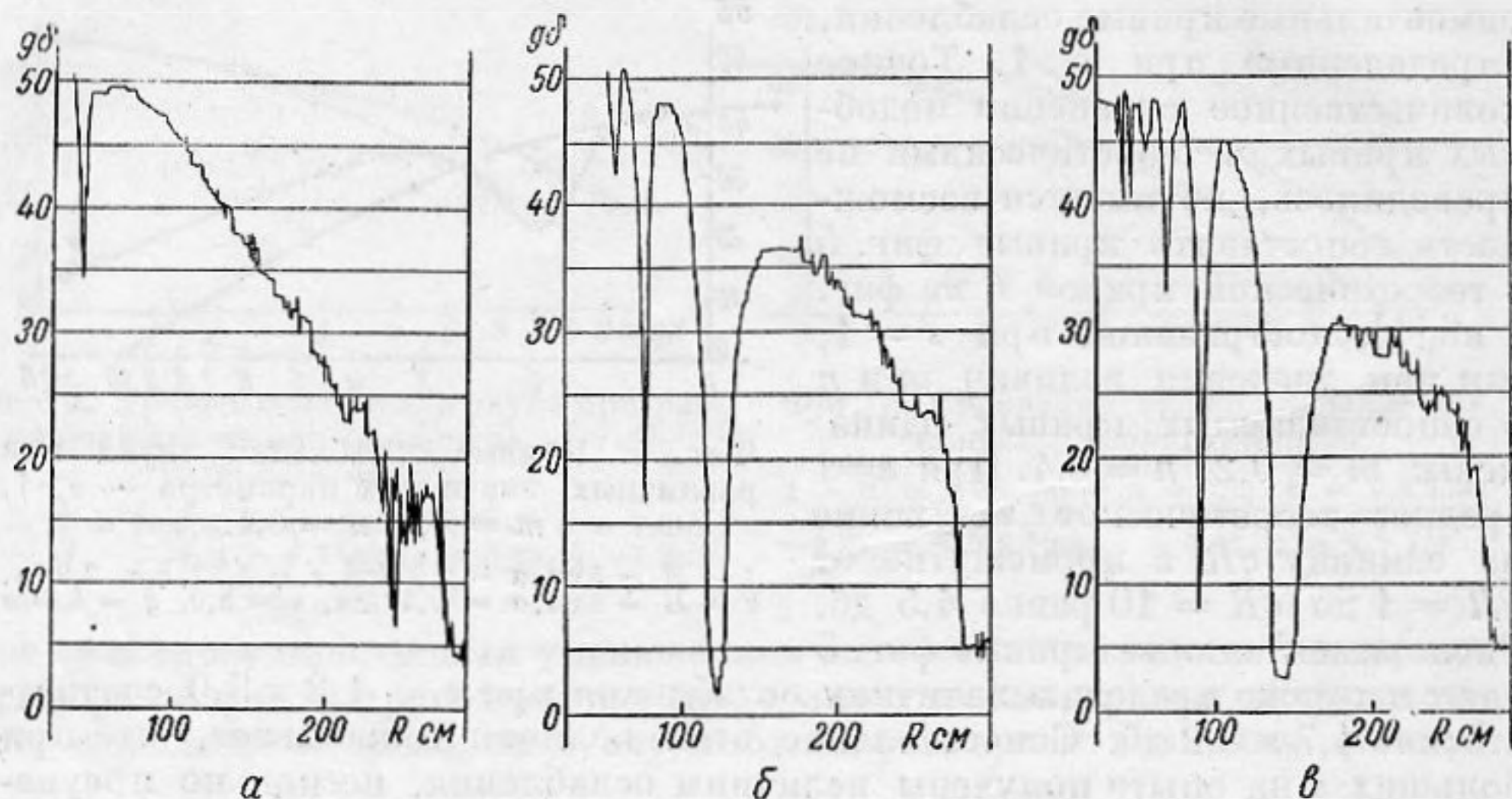
$a - z = 1$  см,  $b - z = 3$  см,  $v - z = 5$  см

Применение автоматической записи позволило относительно быстро, т. е. при практически неизменных условиях распространения звука, осуществить исследование звукового поля на различных горизонтах ( $n$  различно) при постоянном положении источника ( $m$  одинаково). Примеры записей на регистраторе приведены на фиг. 6 и 7. На оси  $x$  отложено расстояние до излучателя, на оси  $y$  — децибелы. Отдельные кривые ( $a, b, v$ ) были сняты на различных уровнях.

Нейманогаммы подтвердили полученные нами другим путем выводы о зависимости ослабления от глубины, на которой перемещается приемник внутри изотермического слоя (фиг 6  $a, b$ ). Из фиг. 6 и особенно фиг. 7,



в которой кривые *б* и *в* сняты на уровнях, лежащих в неоднородной среде, видно, что чем глубже проходит звукоприемник, тем область интерференционных экстремумов оказывается шире. Так, на фиг. 6 область максимумов и минимумов простирается: на кривой *а* приблизительно до 70 см, на кривой *б* до 100 см и на кривой *в* до 115 см. На фиг. 7 эта область простирается на кривых *а*, *б* и *в* соответственно до 80, 180 и 200 см.



Фиг. 7. Записи ослабления звука вдоль ванны на различных глубинах —  $H = 4,5$  см,  $h = 2$  см,  $a = 0,7^\circ/\text{см}$ ,  $s = 1,80$ :  $a - z = 2$  см,  $б - z = 8$  см,  $в - z = 12$  см

По ширине области интерференции можно сделать некоторые суждения о границах применимости геометрической теории. Как показано в [2], критерием применимости геометрической акустики при распространении звука в однородном слое является требование  $R \ll s \frac{H^2}{\lambda}$ .

Для условий распространения, при которых сняты кривые фиг. 6 и 7, должно быть  $R \ll 120$  см.

Из рассмотрения приведенных выше данных о размерах интерференционной области можно заключить, что это условие в пределах однородного слоя действительно выполняется, но ниже слоя, в неоднородной среде, границы применимости геометрической теории, повидимому, расширяются.

Выражаю благодарность И. И. Шмелеву за помощь при проведении эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Бархатов. Исследование звуковой тени в среде с вертикальным градиентом скорости звука. Акуст. журн., 1955, 1, 2, 121.
2. Л. М. Бреховских. Об одном случае распространения звука в неоднородной среде. ДАН, 1952, 87, 715.
3. С. Л. Pekeris. Theory of Propagation of Sound in a Half-Space of Variable Sound Velocity under Conditions of Formation of a Shadow Zone. J. Acoust. Soc. Am., 1946, 18, 295.
4. Л. М. Бреховских и И. Д. Иванов. Об одном особом виде затухания при распространении волн в слоисто-неоднородных средах. Акуст. журн., 1955, 1, 1, 23.
5. А. Н. Бархатов, В. Я. Яшков. Автоматическая запись звукового давления в незаглушенном бассейне. Уч. зап. Горьк. гос. университета, с. ф., 1954, 27, 150.

Исследовательский физико-технический  
институт  
Горьковского государственного  
университета

Поступила в редакцию  
25 марта 1955 г.