АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VII 1961 Вып. 2

НЕКОТОРЫЕ ОПЫТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА В СЛОИСТОЙ СРЕДЕ, ОГРАНИЧЕННОЙ ВОЛНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А. Н. Бархатов, Ю. Н. Черкашин, В. Я. Яшков

Разработан метод и собрана установка для исследования в модельных условиях влияния волнистой поверхности на распространение звука в жидкости. Работа выполнялась при помощи двух видов волнистой поверхности: бегущей по поверхности жидкости волны; неподвижной модели волны с коэффициентом отражения, равным — 1. Пространственный период волнистой поверхности был в 10—50 раз, а высота в 3—6 раз больше длины звуковой волны. Исследовано влияние волнистой поверхности на величину ослабления звука в области тени в слоистой среде антиканального типа с поверхностным однородным слоем и без него. В последнем случае влияния волн на закон изменения звукового давления с расстоянием от излучателя не обнаружено. При наличии однородного поверхностного слоя было обнаружено дополнительное ослабление звука в области эффективной тени, связанное с рассеянием на волнистой поверхности.

Приводятся примеры расчета дополнительного ослабления звука.

Распространению звука в однородной среде при наличии неровной поверхности посвящено большое количество теоретических работ. Проводились также экспериментальные исследования звукового поля в однородной среде, ограниченной волнистой или нерегулярной поверхностью (см., например, [1—4]). Некоторые из указанных работ были выполнены в модельных условиях [1, 3, 4].

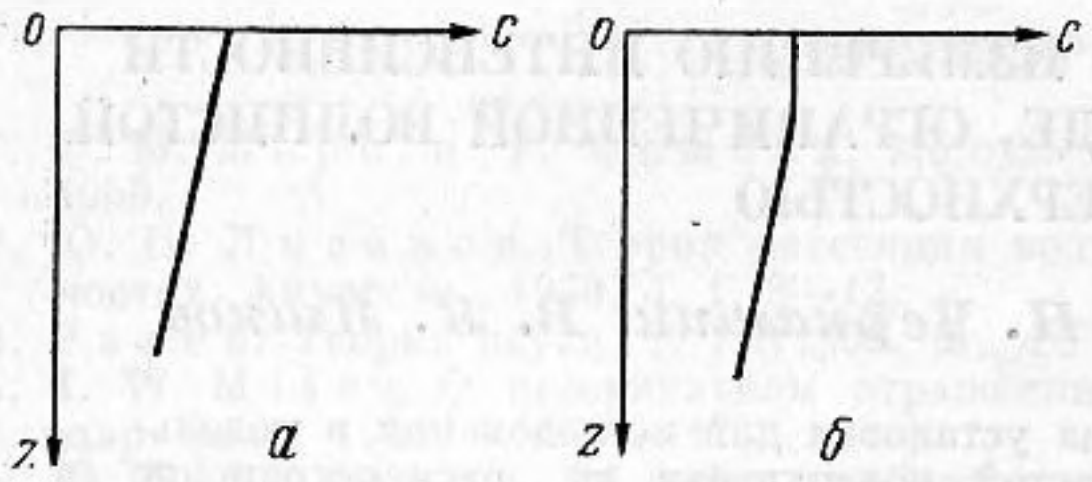
Более трудным является случай распространения звука в слоисто-неоднородной среде с неровной граничной поверхностью. В общем виде эта задача, насколько нам известно, теоретически не решена. В частности, остается невыясненным вопрос о влиянии структуры неровной поверхности на величину ослабления звукового давления на единицу расстояния при удалении от излучателя в слоистых средах с различными законами вертикального распределения скорости звука. В этой связи может быть упомянута краткая заметка Мичама [5] о вычислении интенсивности звука в канале, верхней границей которого является неровная поверхность, причем скорость звука в среде меняется настолько медленно, что допустимы лучевые представления.

В настоящей работе для изучения влияния волнистой поверхности на величину ослабления звука в области тени используется ранее разработанный одним из авторов метод моделирования в экспериментальной ванне слоисто-неоднородных сред антиканального типа [6, 7].

Измерения проводились на частотах 415 и 530 *кгц* при длительности импульса 50 *мксек* с частотой повторения 150 импульсов в секунду. Угол расхождения звукового пучка составлял 20° по главному лепестку характеристики направленности. В качестве звукоприемников использовались элементы из поляризованной керамики титаната бария двух видов: 1) кубик, размером $2\times2\times2$ *мм*^{3} и 2) полый цилиндр с размерами: длина образующей 3 *мм*, внешний диаметр 4 *мм*, толщина стенок 0,5 *мм*.

Звукоприемник укреплялся на каретке, которая при помощи приводного механизма могла с постоянной скоростью перемещаться вдоль ванны по направляющим координатника.

Напряжение, снимаемое со звукоприемника, усиливалось и автоматически регистрировалось, для чего использовалось одно из следующих звукозаписывающих измерительных устройств: шлейфовый осциллограф; логарифмический регистратор уровня типа Неймана; фотоприставка, позволяющая проводить непрерывную запись на движущуюся пленку импульса, выделенного путем стробирования на экране электронного осциллографа. Можно было также снимать звуковое давление по точкам, перемещая каретку со звукоприемником вручную.



Фиг. 1

Наибольшую трудность при постановке эксперимента представляло формирование волнистой граничной поверхности без нарушения вертикального распределения скорости звука в водном слое. Опыты проводились в наполненной водой ванне с незаглушенными стенками, длиной 320 *см*, шириной и глубиной по 60 *см*, изготовленной из органического стекла толщиной 8 *мм*. Вертикальный градиент скорости звука создавался путем образования в ванне описанным ранее способом [6, 7] градиента температуры. Использованные при опытах законы распределения скорости звука в зависимости от глубины показаны схематически на фиг. 1, *а*, *б*.

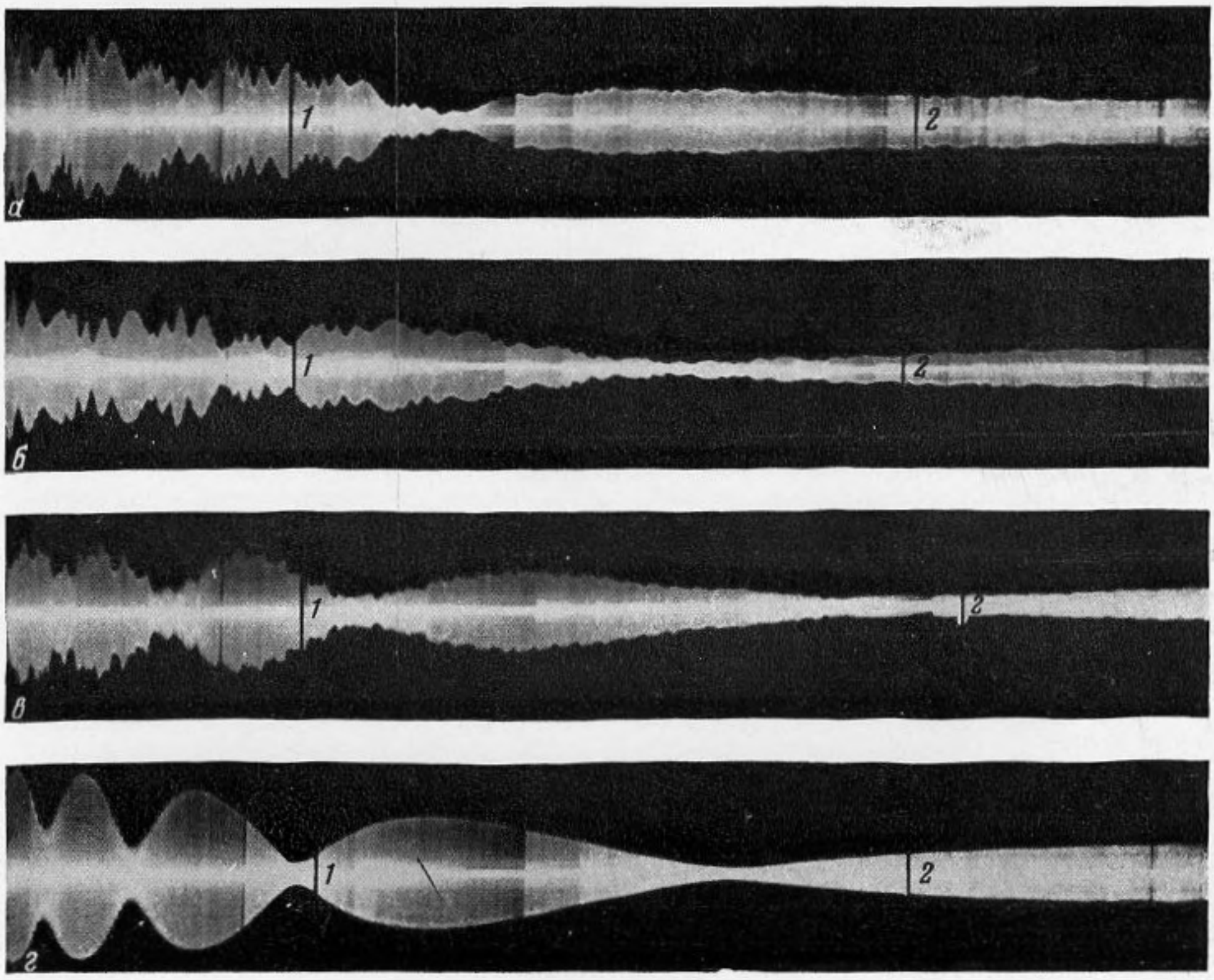
Влияние волн на распространение звука в средах указанного вида исследовалось на двух типах поверхностей: подвижной (бегущая и стоячая волны на воде); застывшей (модель волны, наложенная на поверхность воды).

Волны на воде получались при помощи погруженной в воду на одном из концов ванны плоской линейки, приводимой в колебательные движения от электромотора с помощью кривошипного механизма. Периодически поднимаясь и опускаясь в воду, линейка образовывала на поверхности почти плоские волны, которые распространялись вдоль ванны к ее другому концу. Длина поверхностной волны равнялась в разных опытах 10—25 *см* при амплитуде колебаний около 5—10 *мм*.

Благодаря отражению волн от противоположной стенки ванны, вскоре после пуска механизма, волны принимают характер стоячих, если не предусмотреть мер для гашения волны, падающей на стенку.

Следует также указать, что постановка опытов с подвижной волнистой поверхностью при наличии в воде градиента скорости звука сопряжена с той существенной трудностью, что волнение на поверхности очень быстро приводит к возмущению первоначального распределения скорости звука, в результате перемешивания воды у поверхности. Наблюдение над изменением с течением времени градиента температуры под действием поверхностных волн показывает, что распределение температуры в ванне может считаться неизменным с точностью до 0,1° лишь в течение первых 2—3 *мин*. после начала волнения. На этой стадии опыта слоистость среды нарушается слабо, что было проверено одновременным измерением вертикального распределения температуры в различных местах ванны. Так, в точках, удаленных по горизонтали друг от друга на расстояние 2 *м*, различие в температуре на одном горизонтальном уровне никогда не превышало 0,5°. При больших температурных градиентах по вертикали (0,5—1°/*см*) указанную величину горизонтального градиента можно было не принимать во внимание.

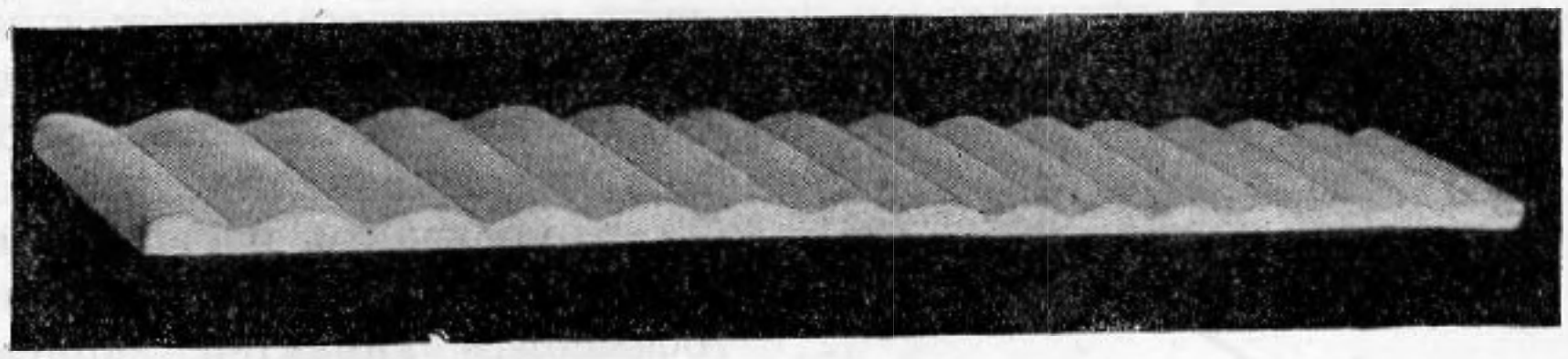
Чтобы избежать влияния на распространение звука вторичного, трудно контролируемого эффекта, связанного с искажением первоначального распределения скорости звука, необходимо было ограничивать продолжительность опыта 2—3 *мин*. Заметим, кроме того, что движение поверх-



Фиг. 3

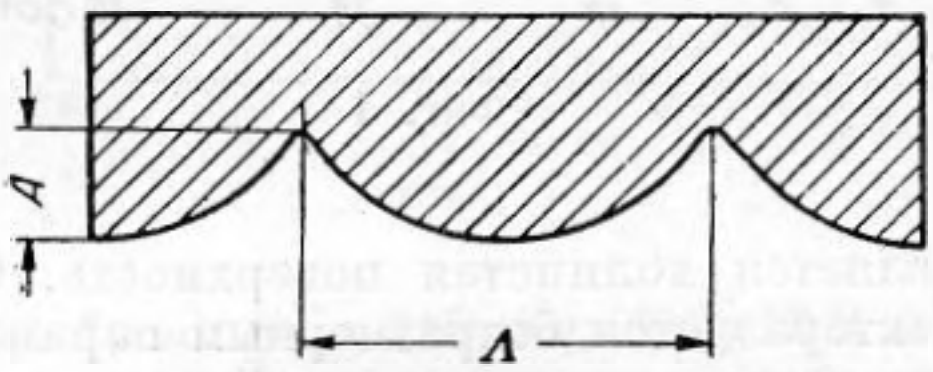
ностной волны затрудняет исследования, так как из-за некоторой нестационарности процесса оно вносит в результаты измерения зависимость от времени.

Можно упростить задачу, а также избежать нежелательного возмущающего действия поверхностных волн на слоистую среду, если воспользоваться неподвижной моделью волнистой поверхности. С этой целью из



Фиг. 2, *а*

пенопласта были изготовлены модели волн с трохоидальным профилем (фиг. 2, *а*, *б*). Модель накладывалась на поверхность воды, покрывая ее почти полностью. Через открытую у края ванны часть поверхности воды под модель волны подводился звукоприемник, соединенный тонкой изогнутой трубкой с кареткой на координатнике.



Фиг. 2, *б*

Пенопласт в качестве материала для модели волн был выбран потому, что на частотах звука, используемых в эксперименте, условия на границе вода — пенопласт достаточно близко совпадают с условиями на границе вода — воздух. Это было проверено путем измерения коэффициента отражения звука от плоской поверхности пенопласта при различных углах падения. Было определено также распределение звукового давления в поле, созданном одним и тем же излучателем в однородной среде (воде), граничащей в одном случае с воздухом, и в другом — с плоской поверхностью пенопласта. В пределах точности эксперимента в обоих случаях получалось одинаковое распределение звукового давления в ванне. Пенопласт легко поддается механической обработке и ему можно придать любую форму. Поверхность модели, после того как она была вырезана, подвергалась шлифовке. Микроскопическое исследование показало, что обработанная поверхность содержит шероховатости размером 0,1—0,2 *мм*, т. е. раз в 30 меньше длины звуковой волны.

В работе использовались модели волн, имеющие следующие размеры: 1. Пространственный период $\Lambda_0 = 16$ *см*, высота волны $A_0 = 2$ *см*; 2. $\Lambda_0 = 16$ *см*, $A_0 = 1$ *см*; 3. $\Lambda_0 = 4$ *см*, $A_0 = 1$ *см*.

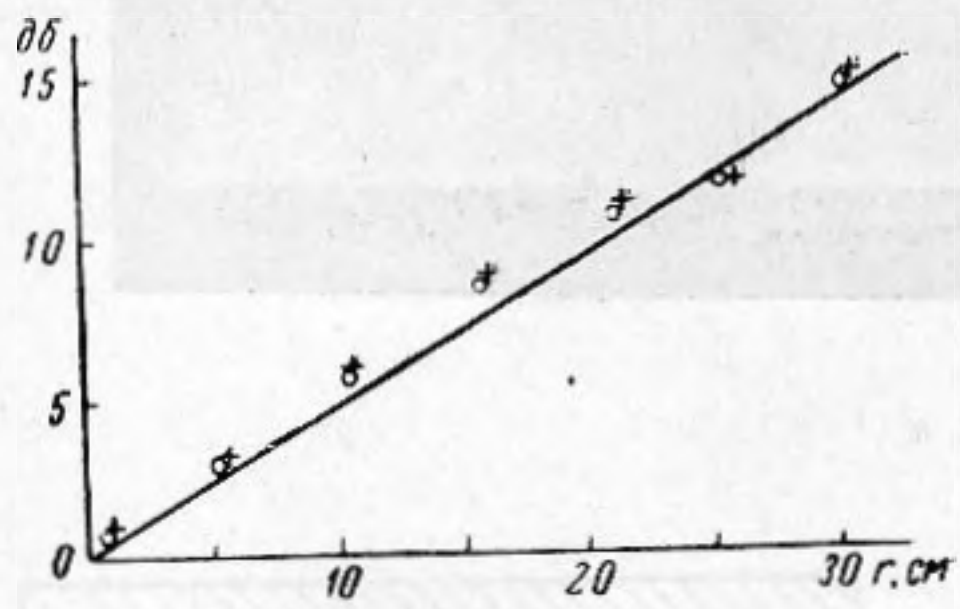
Таким образом, пространственный период волны был по меньшей мере на один порядок больше длины звуковой волны; высота модели была больше длины звуковой волны в 3—6 раз.

Для дополнительной проверки пригодности моделей волн из пенопласта для моделирования волн на границе воды с воздухом сначала был поставлен имеющий методическое значение опыт по изучению влияния волнистой поверхности на поле в однородной среде.

Соответствующие записи, полученные при помощи фотоприставки к электронному осциллографу, приводятся на фиг. 3 для случая, когда излучатель и приемник погружены на 6 *см* ниже среднего горизонтального сечения волнистой поверхности. Фиг. 3,*а*, *б*,*в* относятся соответственно к моделям 1, 2 и 3. Для сравнения на фиг. 3, *г* приведена запись при плос-

кой граничной поверхности. Расстояние от излучателя на фотографиях указано в метрах. Обращает на себя внимание мелкая структура, накладывающаяся на интерференционную картину поля.

В связи с тем, что все записи были получены в области применимости лучевой акустики, возможна геометрическая трактовка явления. Для вычисления поля в среде каждый пространственный период разбивался на малые абсолютно отражающие прямоугольные площадки, и полное поле находилось путем суммирования элементарных полей от этих малых площадок и прямого поля от источника звука.



Фиг. 4

Вычисления, которые здесь не приводятся, позволяют полностью объяснить характер записи для однородной среды, в том числе образование мелкой структуры и ее зависимость от пространственного периода и высоты волновой модели.

Ниже излагаются результаты измерения поля в области тени в воде, верхней границей которой является волнистая поверхность. Среда исследуемого типа (фиг. 1) характеризуется безразмерным параметром [8]

$$s = \frac{1}{3} k_0 H \left(\frac{3a}{k_0}\right)^{1/3},$$

где

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0}, \quad a = \frac{1}{c_0}\frac{dc}{dz},$$

c_0 — скорость звука в воде у поверхности, H — толщина поверхностного однородного слоя. В наших опытах параметр s изменялся от 0 до 1,5, а в отдельных опытах был значительно больше.

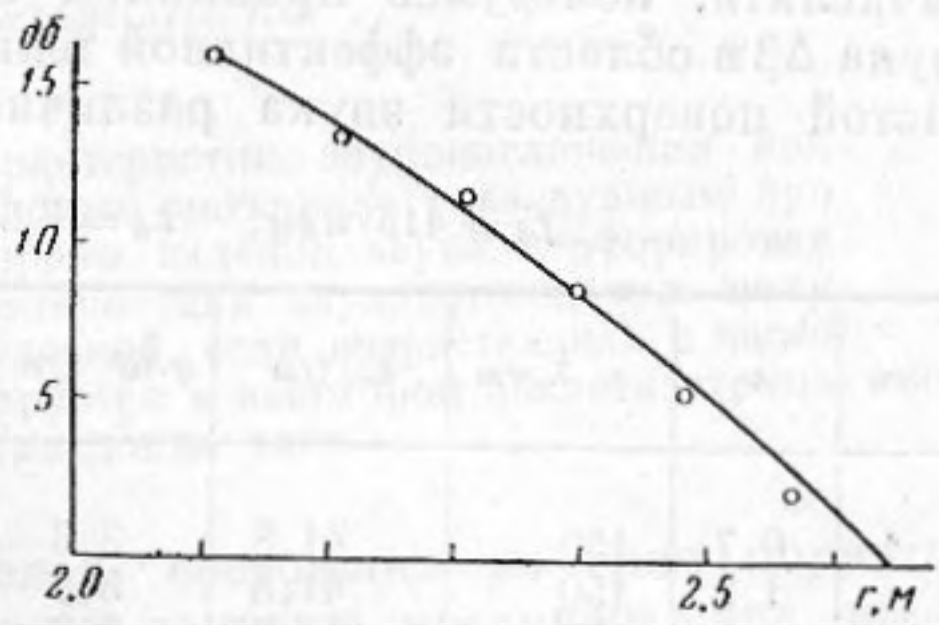
Для случая отсутствия поверхностного однородного слоя ($H = 0$, $s = 0$) были поставлены эксперименты как при волнах, бегущих по поверхности воды, так и при наложенной на поверхность волновой модели. Из сравнения записей изменения звукового давления вдоль ванны, полученными в случае ровной поверхности, с соответствующими записями при наличии волн, следует, что и те, и другие в общем выражают одинаковый закон изменения звукового давления. Однако на кривых, снятых при волнистой поверхности, заметно наложение колебаний с пространственным периодом поверхностной волны. Такая пространственная модуляция записи является следствием колебания границы геометрической тени в результате отражения звука от волнистой поверхности.

На фиг. 4 изображено затухание звука в децибелах в области тени в зависимости от расстояния r от границы геометрической тени. Точками показаны результаты, относящиеся к случаю плоской поверхности воды, крестиками — результаты при наличии поверхностных волн длиной 18 *см* и высотой 1 *см*. На график наносились усредненные по времени значения звукового давления в каждой точке. Условия эксперимента были следующие: $a = 0{,}2$; $H = 0$, частота $f = 530$ *кгц*; глубина погружения соответственно излучателя и приемника $h = z = 6$ *см*. Из фигуры видно, что такие поверхностные волны не изменяют закона спадания интенсивности звука в области геометрической тени, которое в основном происходит по теоретическому закону (сплошная прямая на графике).

Переходя к изучению влияния волнистой поверхности на звуковое поле в области эффективной тени в среде с однородным поверхностным слоем ($s > 0$), можно предполагать, что волнистая поверхность благодаря

рассеянию звуковых волн будет способствовать наблюдаемому в такой среде отсосу энергии из поверхностного слоя в нижележащую среду. Это должно привести к дополнительному, по сравнению со случаем плоской поверхности, ослаблению звука в указанной среде на достаточно большом расстоянии от излучателя, т. е. в области эффективной тени.

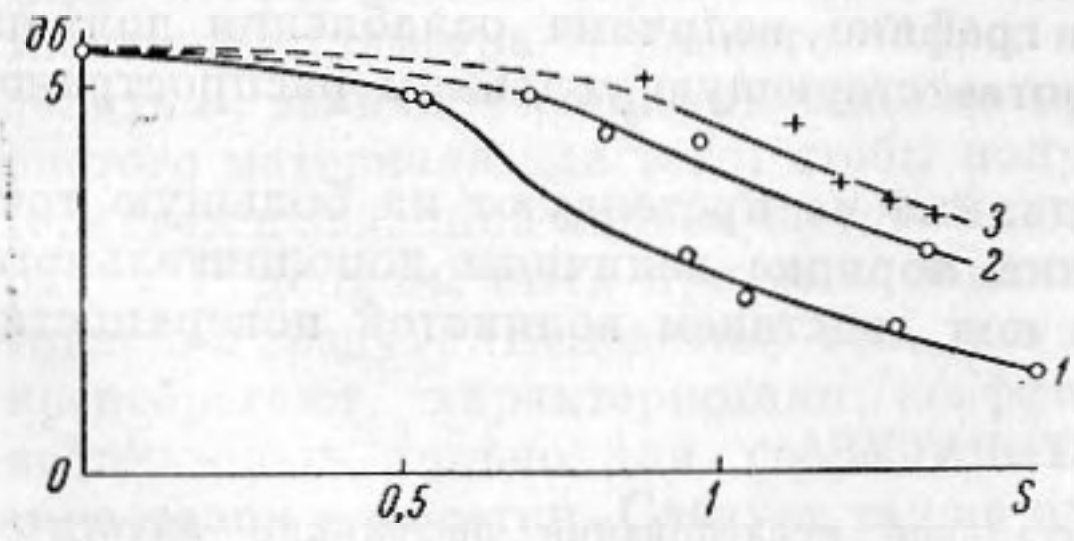
Чтобы избежать возмущающего действия движущихся волн на закон изменения скорости звука по глубине, при выполнении этих экспериментов были использованы модели волнистой поверхности. Методика измерения состояла в том, что звуковое давление на различных расстояниях от излучателя при наличии волнистой поверхности при помощи звукозаписывающей аппаратуры фиксировалось на киноленте. Фотографические записи обрабатывались и по ним составлялись графики интенсивности, на которых логарифмический уровень интенсивности откладывался в зависимости от горизонтального расстояния от излучателя. В качестве примера на фиг. 5 приведен график, соответствующий следующим условиям эксперимента: $s = 0{,}96$, $H = 3$ *см*, $h = 3$ *см*, $z = 5$ *см*; $\Lambda_0 = 16$ *см*, $A_0 = 1$ *см*, $f_0 = 415$ *кгц*, $\lambda_0 = 3{,}6$ *мм*.



Фиг. 5

При помощи таких графиков была вычислена величина ослабления звука в области эффективной тени при различных s при наличии волнистой поверхности.

Результаты вычислений показаны на фиг. 6, где на оси ординат отложена величина ослабления звука в децибелах на единицу безразмерной величины qr в зависимости от параметра s, причем $q = (9a^2k_0)^{1/3}$. Приведенные на графиках точки получены путем усреднения ослабления, вычисленного при различных относительных глубинах погружения излучателя и приемника, но при одинаковом s.



Фиг. 6

Кривая *1* относится к плоской поверхности, кривые *2* и *3* — к волнистым поверхностям с пространственными периодами соответственно 16 и 4 *см* и высотой 1 *см*.

Из графиков видно, что волнистая поверхность вызывает дополнительное ослабление звука в области тени по сравнению с плоской поверхностью. При этом волнистая структура с меньшим пространственным периодом влияет на звуковое поле сильнее, чем волна с большим периодом, что становится понятным, если учесть более сильное рассеяние звука поверхностной волной с периодом, приближающимся к длине звуковой волны.

Определение ослабления звука в области тени при наличии волнистой поверхности связано со значительными трудностями даже в модельных условиях. Наши измерения выполнены преимущественно при значениях параметра s от 0,5 до 1,5. Кривые, проведенные по экспериментальным точкам, экстраполированы пунктиром до точки, соответствующей геометрической тени ($s = 0$), в которой также производилось измерение поля.

Как это следует из фигуры, при малых значениях параметра ($s < 0{,}5$) волнистая поверхность слабо влияет на поле в области эффективной тени. Однако при увеличении s дополнительное ослабление звука увеличивает-

ся и делается сравнимым с тем, которое наблюдается в области тени в случае плоской поверхности воды. Последнее, как известно, уменьшается при возрастании s. Отметим, что при больших значениях параметра s измеренные величины ослабления звука относятся к удаленным точкам, так как при увеличении s область эффективной тени отодвигается от излучателя все дальше. Предельный случай очень больших s практически эквивалентен распространению звука в однородной среде и не представляет интереса, поскольку в этом случае зона эффективной тени, к которой относятся все результаты измерений, может оказаться весьма далеко. Фиг. 6 позволяет вычислить, пользуясь принципом подобия, дополнительное ослабление звука $\Delta\beta$ в области эффективной тени, обусловленное рассеянием на волнистой поверхности звука различной частоты.

$f_0 = 415$ *кгц*; $\lambda_0 = 3{,}6$ *мм*; $c_0 = 1480$ *м/сек*

f, *кгц*	s	λ, *см*	k_0, 1/*м*	$q \cdot 10^5$, 1/*м*	H, *м*	λ/λ_0	Λ, *м*	A, *м*	$\Delta\beta$, *дб/км*
1	0,7	150	41,8	3,3	5,6	415	67	4	4
1	1,3	150	41,8	3,3	10,5	415	67	4	5
1	1,3	150	41,8	3,3	10,5	415	17	4	7
10	0,7	15	418	7,2	1,2	41,5	6,7	0,4	9
10	1,3	15	418	7,2	2,3	41,5	6,7	0,4	12
10	1,3	15	418	7,2	2,3	41,5	1,7	0,4	16
100	0,7	1,5	4180	15,5	0,2	415	0,7	0,04	18
100	1,3	1,5	4180	15,5	4,9	4,15	0,7	0,04	25
100	1,3	1,5	4180	15,5	4,9	4,15	0,17	0,04	34

Примеры расчета при $a = 10^{-5}$ 1/*м* даны в таблице. При этом длина пространственного периода и высота поверхностной волны должны быть увеличены по сравнению с моделью в число раз, равное отношению длины волны звука λ, для которой ведется расчет, к длине звуковой волны λ_0 при модельном опыте. Для определения ослабления звука в децибелах на единицу длины, найденная на графике величина ослабления должна быть умножена на величину q, соответствующую условиям распространения звука.

Вычисленные таким образом данные не претендуют на большую точность и предназначены для оценки порядка величины дополнительного ослабления звуков в области тени под действием волнистой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Лепорский. Экспериментальное исследование дифракции акустических волн на периодических структурах. Акуст. ж., 1955, **1**, 1, 48—57.
2. Р. Урик, Р. Хувер. Обратное рассеяние звука на морской поверхности. Пробл. совр. физ., 1957, **11**, 58—64 (пер. с англ.).
3. И. Лакаск, П. Тамаркин. Отражение звука, распространяющегося в воде от неровной поверхности. Пробл. совр. физ., 1957, **11**, 41—57 (пер. с англ.).
4. A. B. Wood. Model experiments on sound propagation in shallow seas. J. Acoust. Soc. America, 1959, **31**, 9, 1213—1235.
5. В. Мичам. Распространение звука в неоднородной среде близ неровной поверхности. Пробл. совр. физ., 1954, **5**, 103—104 (пер. с англ.).
6. А. Н. Бархатов. Исследование звуковой тени в среде с вертикальным градиентом скорости звука. Акуст. ж., 1955, **1**, 2, 121—125.
7. А. Н. Бархатов. Об измерении затухания звука в поверхностном изотермическом слое воды. Акуст. ж., 1955, **1**, 4, 315—320.
8. Л. М. Бреховских, И. Д. Иванов. Об одном особом виде затухания при распространении волн в слоисто-неоднородных средах. Акуст. ж., 1955, **1**, 1, 23—30.

Н.-и. радиофизический институт
при Горьковском государственном университете

Поступила в редакцию
8 июня 1960 г.