

Справ.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ,  
МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ  
СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

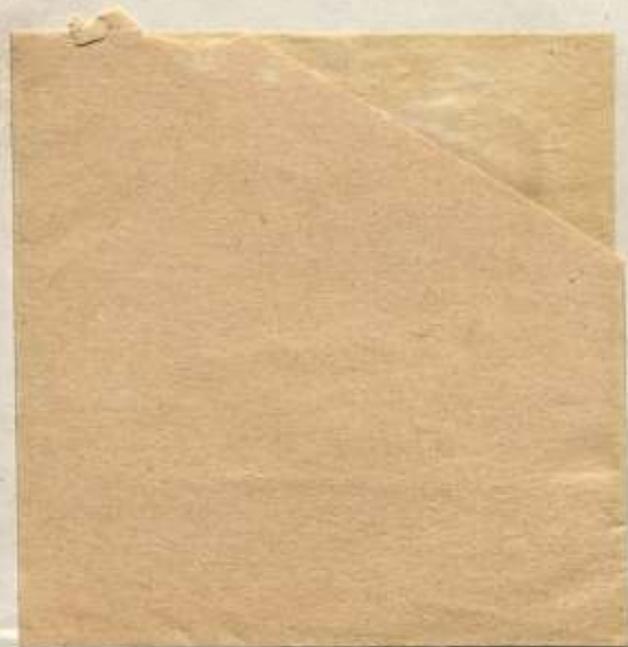
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ  
АКУСТИЧЕСКИХ  
И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

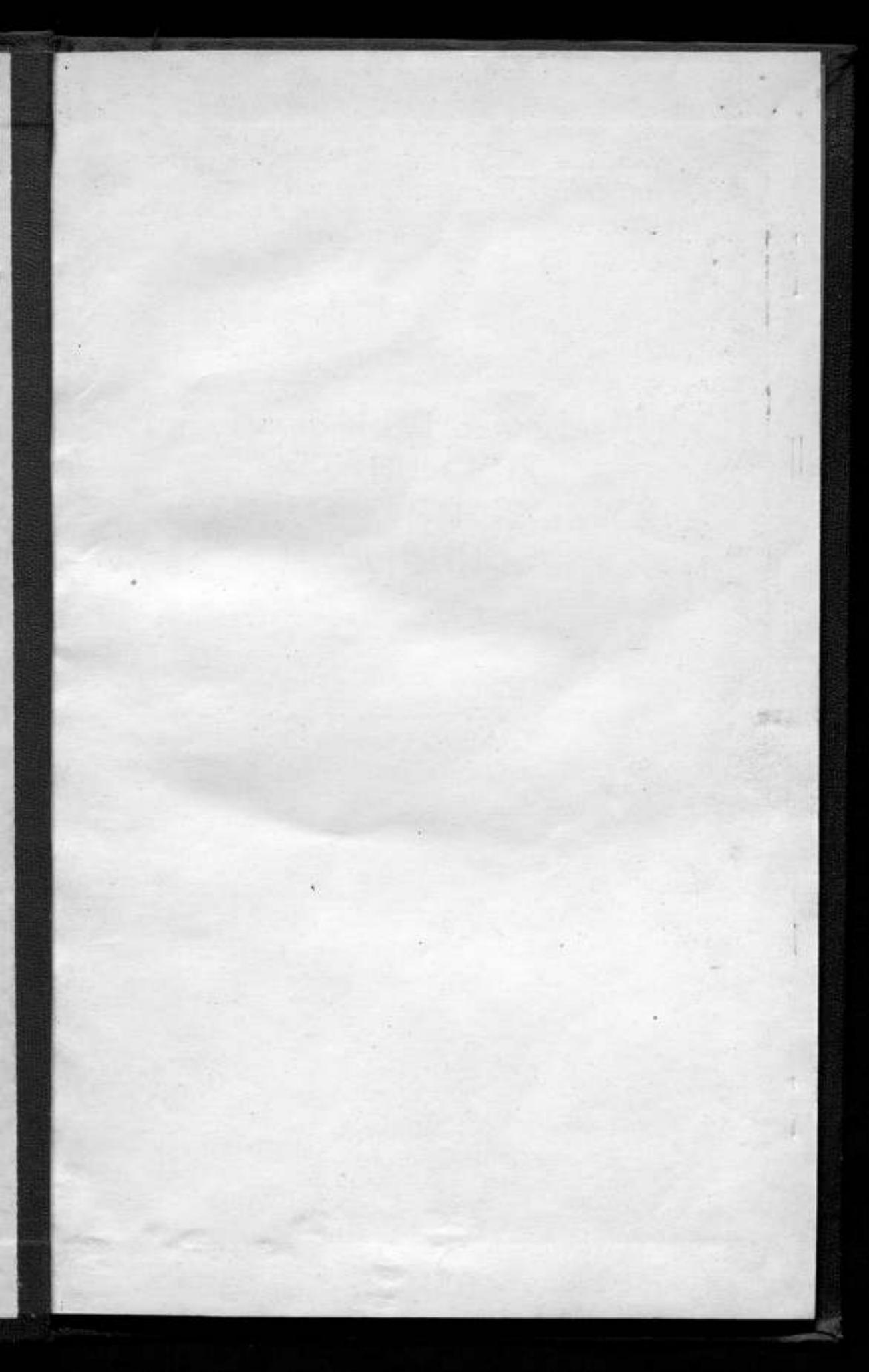
ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

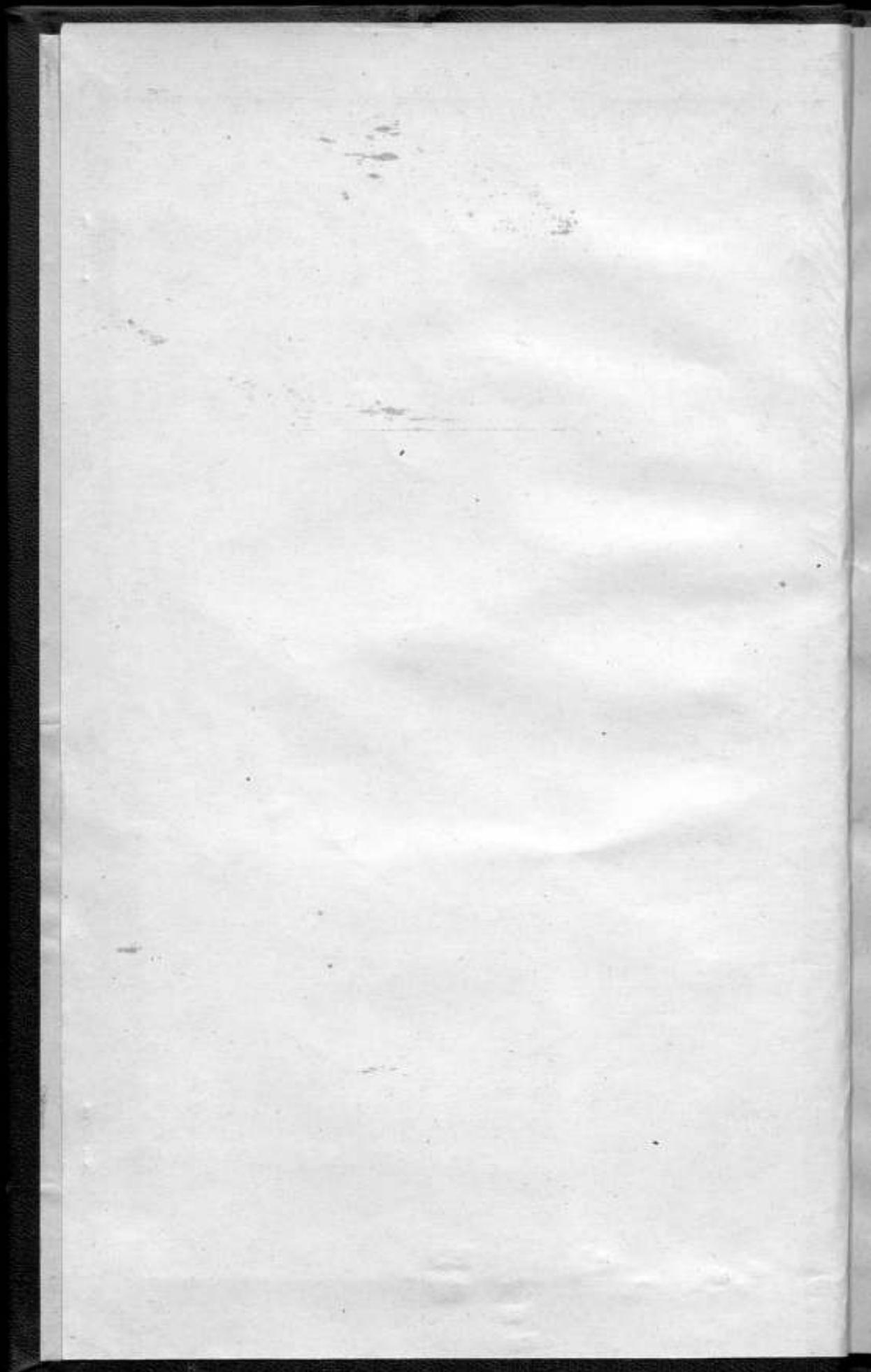
*ВЫПУСК 73(133)*

СТАНДАРТГИЗ

МОСКВА—1963







ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ПРИБОРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ  
АКУСТИЧЕСКИХ  
И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

№ 13009

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 73(133)



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

МОСКВА—1963

*Ответственный редактор выпуска  
канд. физ.-мат. наук И. Г. Русаков*

Редакционная коллегия:

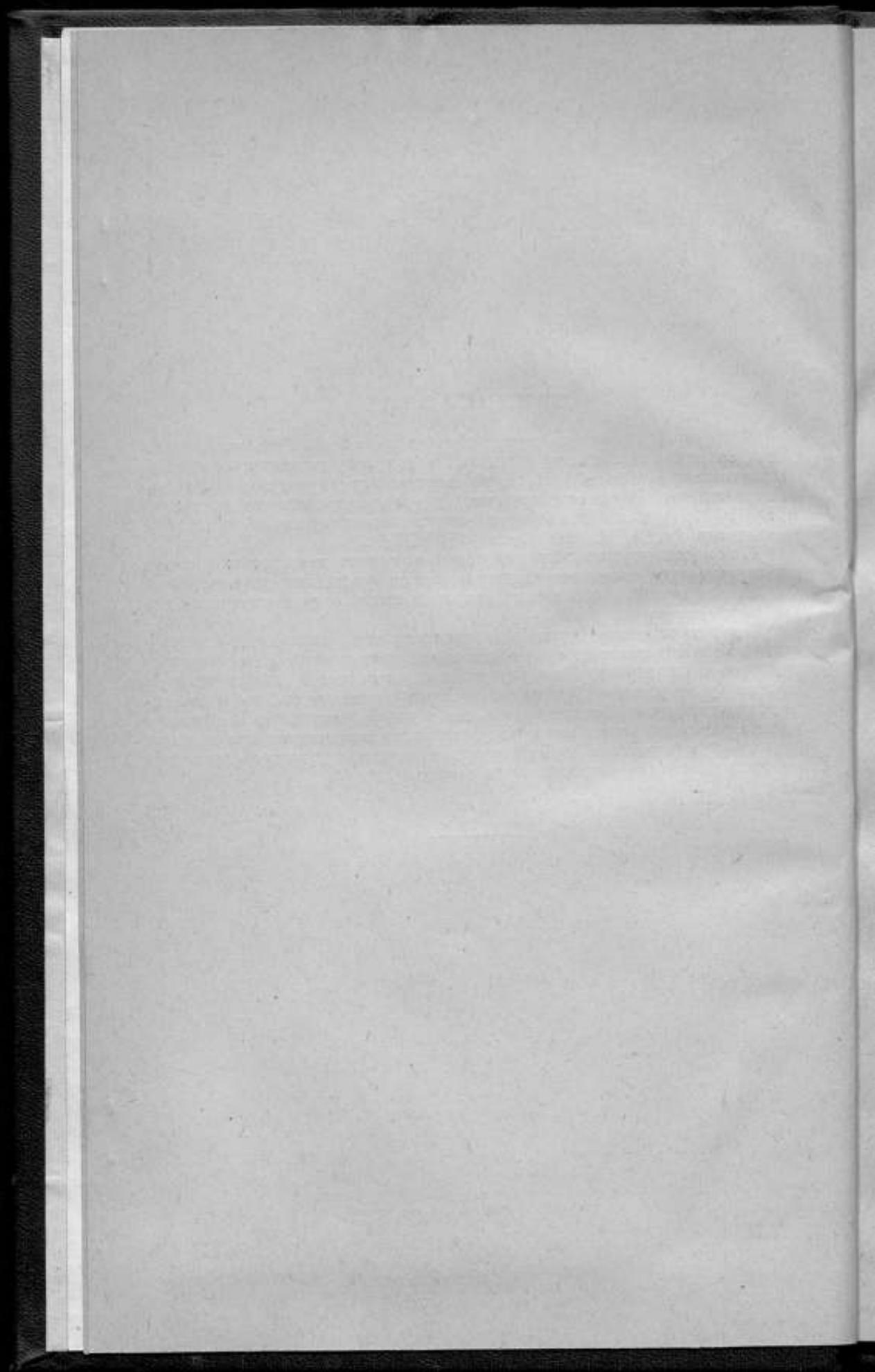
Л. Н. Брянский, Г. Д. Бурдун, А. Л. Дуклер, В. И. Ермаков, Н. Ф. Жданова,  
М. К. Жоховский, Л. М. Закс, В. А. Крючков, М. П. Орлова, Л. М. Пятигорский,  
И. Г. Русаков, В. И. Сачков, А. Г. Смагин, В. Д. Фрумкин

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий (третий по счету) сборник подготовлен по результатам исследований в области акустических и гидроакустических измерений, выполненных в 1960 и 1961 гг. во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) и во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ).

К области акустических измерений относятся две статьи: в одной рассматривается состояние единства аудиометрических измерений в СССР, а в другой дан обзор по вопросам выражения и измерения показателей шума.

Гидроакустические измерения представлены остальными шестью статьями; в них рассматриваются вопросы градуировки измерительных приборов в диапазонах инфразвуковых, звуковых и ультразвуковых частот. Кроме измерений в малых камерах освещены работы в бассейне в режиме как свободной волны, так и диффузного поля. В сборнике рассматриваются также вопросы градуировки приемников при наличии отражений и в режиме стоячей волны при ультразвуковых частотах и вопросы измерения скорости звука в воде.



А. Н. Кришталевич  
и Т. А. Пустовалова

ВНИИМ

## РАБОТЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЕДИНСТВА АУДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

*В статье описаны как советские, так и зарубежные исследования порога слышимости при слушании через телефон и методы воспроизведения и хранения неизменных пороговых значений с помощью образцовых телефонов и приборов искусственного уха. Рассмотрены испытания и градуировки аудиометров и образцовых измерительных телефонов, а также погрешности этих измерений.*

Медицинские и другие учреждения и научно-исследовательские институты, связанные с физиологическими исследованиями слуха, широко используют аудиометры для измерений остроты слуха. Наличие в практике аудиометров различных типов, отсутствие единого метода их испытания и единых стандартных значений пороговых звуковых давлений, относительно которых градуировалась бы нулевая шкала аудиометров — все эти причины приводят к значительному несоответствию отдельных результатов аудиометрических измерений.

### Измерения значений пороговых звуковых давлений, их хранение и установление нуля шкалы аудиометра

Основным параметром аудиометра является его частотная характеристика, определяемая значениями звуковых давлений, развиваемых телефонами аудиометра при положении регулятора уровня на нуле. Эти значения с некоторой степенью точности должны соответствовать порогу слышимости, т. е. звуковым давлениям, вызывающим минимальное ощущение звука у среднего нормального слушателя.

Результаты измерения звуковых давлений, соответствующих порогу слышимости, в значительной степени зависят от условий и метода испытаний, количества обследуемых лиц, их возраста, профессии, тренировки и ряда других причин. Ниже приводится краткий обзор работ по исследованию порога слышимости, проведенных в разных странах. Результаты этих исследований показаны в виде графиков на рис. 1.

Сивьян и Уайт [9] в 1933 г. провели исследование порога слышимости в свободном поле и при слушании через телефон в группе лиц из 14 человек. Работа этих авторов считается классической, и авторы более поздних работ обычно сравнивают свои результаты с результатами Сивьяна и Уайта.

Средние значения из результатов, полученных в 1952 г. Дэдсоном и Кингом [6] и Виллером и Диксоном [10], легли в основу Британского стандарта на значения аудиометрического нуля. В первом случае было измерено звуковое давление, действующее на входе в слуховой канал и соответствующее минимальному ощущению звука в группе лиц из 99 человек. Виллер и Диксон подтвердили эти данные, проведя испытания в условиях, близких к условиям Дэдсона и Кинга, в группе лиц из

512 человек. Возраст испытуемых в первом и втором случаях был от 18 до 30 лет.

В основу стандартных значений аудиометрического нуля Франции легли результаты работ, проведенных Шавасом и Леманом [4], [7]. Эти значения представляют собой средние звуковые давления, действующие в плоскости соприкосновения телефона с ухом, и соответствуют среднему порогу слышимости приблизительно 200 человек в возрасте от 18 до 40 лет.

В США измерения порога слышимости проводились в течение ряда лет у большого количества лиц. Стандартные значения аудиометрического нуля Национального бюро эталонов США основаны на работах Бисли [3], проведенных в 1936—1938 гг. Эти значения выражаются через звуковые давления, развиваемые телефоном типа WE 705A, в искусственном ухе типа 9A.

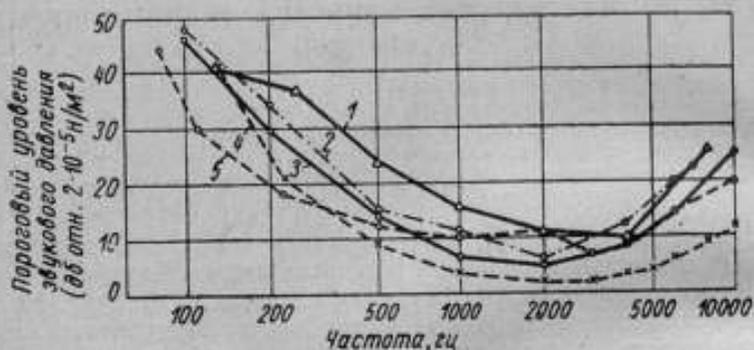


Рис. 1. Данные по порогу слышимости разных исследований: 1—по Бисли; 2—по Шейвехману, Бабкину и Глекину; 3—по Савшану и Уайту; 4—по Шавасу и Леману; 5—по Далсову и Кингу

На рис. 1 представлены значения порога слышимости, полученные Бисли, приведенные к звуковым давлениям, действующим в слуховом канале среднего нормального слушателя. Такое приведение было осуществлено благодаря работе Корлисса [5], определившего разницу в звуковых давлениях, развиваемых телефоном 705A в искусственном ухе типа 9A и в среднем естественном ухе.

В Советском Союзе исследования порога слышимости были проведены в 1953—1954 гг. в Институте биофизики АН СССР Б. Е. Шейвехманом, Г. В. Глекиным и В. П. Бабкиным [2]. Ими был определен средний порог слышимости у 2000 лиц при слушании через телефон в свободном поле. Испытуемые были в возрасте от 18 до 25 лет.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают список работ, посвященных измерению значений порога слышимости, однако, из них можно составить представление о расхождении результатов измерений, проделанных различными авторами. Известный американский специалист в области аудиометрии Глориг считает [8], что эта разница обуславливается главным образом методами проводимых испытаний. В связи с этим важно стандартизовать не только значения аудиометрического порога слышимости, но и условия и метод испытаний при измерениях остроты слуха. Эти методы должны быть близкими к тем, которые применялись при первичных измерениях порога слышимости.

Выражение порога слышимости через пороговые звуковые давления, действующие в свободном поле, на входе в слуховой канал или в другой точке внутри среднего естественного уха, удобно в том отношении, что эти давления не зависят от конструкции телефона, через

который производится слушание. Однако практически невозможно в точности воспроизвести эти значения при дальнейших субъективных измерениях, которые к тому же требуют больших затрат труда и времени.

В связи с этим хранение и воспроизведение пороговых значений осуществляется при помощи физических приборов. Исходными данными для передачи этих значений на физические приборы являются пороговые напряжения, измеренные на звонках образцовых телефонов при субъективном определении порога слышимости. Предметом хранения являются эквивалентные пороговые уровни звуковых давлений, развиваемых в искусственном ухе образцовым телефоном, когда на его звонки приложены пороговые напряжения. Воспроизведение этих уровней может быть осуществлено при помощи любой другой пары телефонов — искусственное ухо при условии, что они являются приборами того же типа, как и образцовые.

В случае, если появляется необходимость заменить образцовый телефон телефоном другого типа, необходимо предварительно произвести субъективным методом передачу пороговых значений с одного образцового телефона на другой. Обычно для этого применяется метод баланса громкости.

Установление нуля шкалы аудиометра состоит в градуировке телефона аудиометра на образцовом приборе искусственное ухо, если этот телефон того же типа, что и телефон, принятый в качестве образцового. При этом параметры аудиометра должны быть такими, чтобы на всех частотах рабочего диапазона измерений при положении регулятора уровня интенсивности на нуле уровень звуковых давлений, развиваемых телефоном в искусственном ухе, соответствовал эквивалентным пороговым уровням звукового давления.

Первые шаги, направленные к стандартизации аудиометрического нуля в СССР, были предприняты расширенным совещанием представителей организаций, связанных с аудиометрией, созванным во ВНИИМ в феврале 1958 г. На этом совещании было согласовано, что в качестве временных справочных значений порога слышимости для области частот 80—4000 гц следует принять данные работы Б. Е. Шейвехмана и др., выраженные в эквивалентных пороговых уровнях звукового давления, развиваемого телефоном типа ТД-6 в искусственном ухе типа ИУ-11 или ИУ-3.

Таким образом, была предусмотрена возможность определения пороговых напряжений для новой группы образцовых телефонов типа ТД-6.

Работа Л. А. Варшавского и Г. В. Глекина [1], определивших разницу в звуковых давлениях, развиваемых телефоном типа ТД-6 в искусственном ухе типа ИУ-11 и в среднем естественном ухе, позволила расширить частотный диапазон определения пороговых напряжений до 5000 гц. Кроме того, путем субъективных сличений телефонов ТД-6 с образцовыми телефонами США и Франции стандартные значения порога слышимости этих стран были выражены через эквивалентные пороговые уровни звуковых давлений, развиваемых телефонами ТД-6 в искусственном ухе типа ИУ-3 (см. рис. 3).

Субъективные сличения указанных телефонов были произведены во ВНИИМ группой, состоящей из 20 человек в возрасте от 18 до 28 лет, обладающих нормальным слухом.

Схема проведения измерений представлена на рис. 2. Слушатель находился в заглушенном помещении, а оператор и вся вспомогательная аппаратура — в соседней комнате. Телефоны монтировались в специальном оголовье с подстройкой. Сила прижима телефона к уху слушателя составляла 0,5 кгс. Телефоны ТД-6 испытывались с заглушкой типа ИС-57.

Поступающий в телефоны ток прерывался при помощи мотора Уоррена М, снабженного коммутационным колесом — прерывателем. Сигналы подводились к ушам слушателя поочередно. Длительность импульса составляла 0,8 сек; длительность интервала между импульсами — 0,2 сек.

Баланс громкости достигался двумя методами: методом обращения и методом порогового баланса.

По методу обращения проводились две балансировки для каждого слушателя с промежутками между балансировками в один день: 1) с телефоном ТД-6 на правом ухе и телефоном США или Франции на левом; 2) с телефоном ТД-6 на левом ухе и телефоном США или Франции на правом.

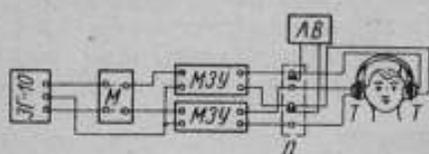


Рис. 2. Схема сличения телефонов

Измерения проводились на частотах 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000 и 10000 гц. На каждой частоте делалось три измерения: при убывающей интенсивности звука; при возрастающей интенсивности звука; контрольное измерение, при котором слушатель произвольно выбирал способ сравнения. О достижении равенства громкости звучания двух сравниваемых телефонов слушатель сообщал оператору звуковым сигналом.

Метод порогового баланса состоял в определении среднего порога слышимости 20 отолитически нормальных слушателей при слушании через телефоны типа ТД-6, телефоны США типа WE 705A и телефоны Франции типа Audio-15. Сравнение проводилось через пороговые напряжения, которые необходимо было приложить к этим телефонам, чтобы вызвать минимальное ощущение звука. Условия испытания были те же, что и в первом случае.

В результате сличений телефонов методом порогового баланса были получены эквивалентные пороговые уровни звуковых давлений, развиваемых телефонами типа ТД-6 в искусственном ухе типа ИУ-3, соответствующие стандартным значениям порога слышимости США и Франции, а также средним значениям порога слышимости 20 лиц, обследованных во ВНИИМ. Эти данные иллюстрируются рис. 3. Участие ВНИИМ в международных сличениях образцовых телефонов имеет целью получение для указанной выше пары образцовых приборов эквивалентных значений уровней звуковых давлений, соответствующих значениям международного аудиометрического нуля. Эти значения устанавливаются ИСО/ТК 43 на основе данных о порогах слышимости Англии, Франции, СССР, США, ГДР и ФРГ.

Значения, приведенные на рис. 3, а также значения международного нуля могут быть положены в основу стандартизации в СССР значений аудиометрического нуля.

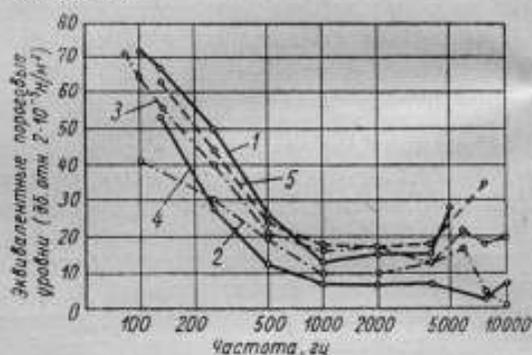


Рис. 3. Эквивалентные пороговые уровни звуковых давлений телефона типа ТД-6 в искусственном ухе ИУ-3:

1—по Шейвехману; 2—для аудиометра Биофизприбор; 3—по ВНИИМ; 4—по данным Французского центра слуха; 5—по данным Бюро эталонов США

## Объективные испытания аудиометров и образцовых измерительных телефонов

Наибольшее распространение при аудиометрических измерениях получили аудиометры чистого тона, а также измерительные телефоны с известными значениями пороговых напряжений.

Источником звукового сигнала в аудиометрах чистого тона является генератор переменного синусоидального напряжения с плавным изменением частоты или с рядом фиксированных частот. С выхода генератора сигнал через усилитель и attenuator, градуированный в децибелах, поступает на телефоны, подводящие звуковой сигнал к уху слушателя.

Введение в усилитель цепи частотной коррекции и подбор его коэффициента усиления имеет целью обеспечить соответствие между частот

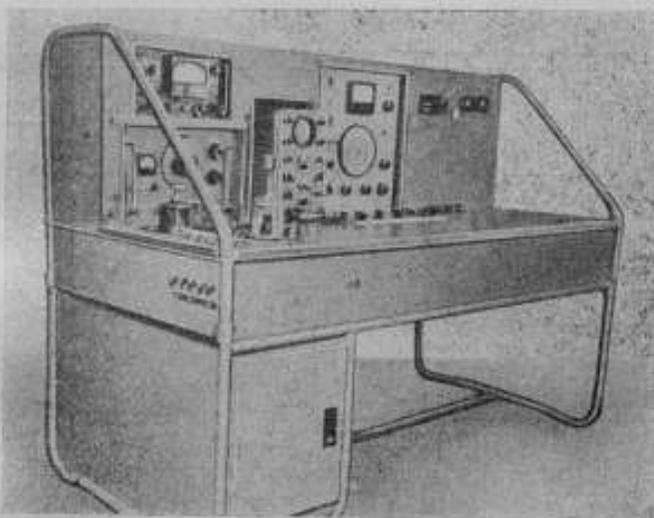


Рис. 4. Установка для испытаний аудиометров и телефонов

ной характеристикой звукового сигнала, излучаемого телефонами аудиометра при положении attenuatorа «0 дБ», и характеристикой порога слышимости, принятой за стандарт.

Для обеспечения единства измерений остроты слуха необходимо, чтобы используемые для этой цели аудиометры и измерительные телефоны периодически проверялись на соответствие их параметров техническим характеристикам, указанным в паспорте, и на соответствие стандартной кривой порога слышимости. Необходимо проверять линейность амплитудной характеристики телефонов и определять их пороговые напряжения; у аудиометров необходимо дополнительно проверять частоту излучаемого звука, величину ступеней затухания attenuatorа, правильность градуировки нулевой шкалы.

Для проверки перечисленных параметров была создана и исследована установка, представляющая собой комплекс контрольных и измерительных приборов, размещенных на алюминиевой типовой стойке. Общий вид и принципиальная электрическая схема установки представлены на рис. 4 и 5.

В установке применен сравнительный метод измерения частоты, при котором сравниваются сигналы неизвестной и известной частот. Для сравнения служит осциллограф, на экране которого при известных

соотношениях между сравниваемыми частотами получают определенные фигуры Лиссажу.

В качестве источника известной частоты используется генератор ЗГ-11, который предварительно сличается так же по осциллографу с рабочим эталоном частот ВНИИМ. Генератор имеет шкалу плавной расстройки частоты, градуированную в процентах от значения частоты, устанавливаемой по основному лимбу. Диапазон возможной расстройки по частоте в используемом образце генератора увеличен с 3 до 7% путем замены сопротивления в цепи плавной расстройки частоты. Наличие плавной расстройки позволяет установить непосредственно в процентах отклонение частоты аудиометра от заданного значения, т. е. погрешность аудиометра по частоте. Погрешность градуировки шкалы плавной расстройки частоты для генератора типа ЗГ-11 не превышает величины  $(\pm 0,5 \pm 0,003 F)$  гц, что на нижней частоте рабочего диапазона частот 100 гц составляет  $\pm 0,8\%$ . Субъективные погрешности установки момента равенства частот и определения известной частоты не

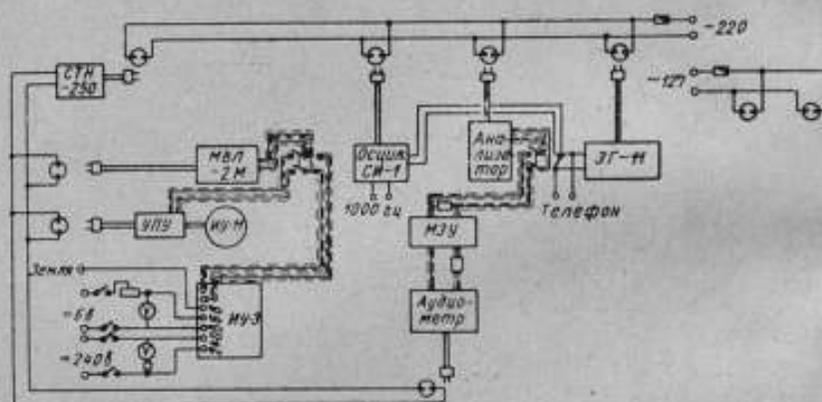


Рис. 5. Схема установки для испытания аудиометров и телефонов

превышают 0,01 и 0,00001% соответственно, они пренебрежимо малы по сравнению с погрешностью градуировки шкалы плавной расстройки частоты.

Проверка ступеней затухания аттенюатора аудиометра проводится на частотах 1000 и 10000 гц методом сравнения с затуханием образцовой меры, в качестве которой в установке используется магазин затухания типа МЗУ. Индикатором служит анализатор напряжения типа 2105.

Погрешность измерения ступеней затухания возникает из-за неточности градуировки образцовой меры; при одновременном использовании всех ступеней затухания эта погрешность не превышает  $\pm 0,057$  деп ( $\pm 0,50$  дб).

Непосредственное измерение эквивалентных пороговых уровней звукового давления, развиваемого телефонами аудиометра, выполнить затруднительно вследствие относительно большого собственного шума искусственного уха, поэтому проводится определение эквивалентного уровня звукового давления, развиваемого телефонами аудиометра в полости образцового искусственного уха типа ИУ-3 при всех оцифрованных значениях шкалы частот аудиометра и при положении аттенюатора аудиометра «60 дб».

Результаты измерения экстраполируются к пороговому уровню по формуле:

$$L_0 = L_{60} - K_{60},$$

- где  $L_0$  — эквивалентный пороговый уровень звукового давления в децибелах относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  н/м<sup>2</sup>, соответствующий положению аттенюатора аудиометра «0 дб»;
- $L_{60}$  — измеренный уровень звукового давления в децибелах относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  н/м<sup>2</sup>, соответствующий положению аттенюатора аудиометра «60 дб»;
- $K_{60}$  — действительное затухание в децибелах, вносимое аттенюатором при переключении его из положения «60 дб» в положение «0 дб».

Такая экстраполяция законна, так как предварительно проводится определение ступеней затухания аттенюатора и проверка линейности амплитудной характеристики телефона аудиометра.

Погрешность определения эквивалентного порогового уровня  $\delta_{L_0}$  складывается из погрешности измерения уровня звукового давления, развиваемого телефоном в полости искусственного уха  $\delta_{L_{60}}$  и погрешности измерения затухания аттенюатора в положении «60 дб»  $\delta_{K_{60}}$ .

По данным исследования акустической лаборатории ВНИИМ  $\delta_{L_{60}}$  не превышает  $\pm 0,5$  дб,  $\delta_{K_{60}}$ , как указывалось выше, также не превышает  $\pm 0,5$  дб, таким образом,

$$\delta_{L_0} = \sqrt{\delta_{L_{60}}^2 + \delta_{K_{60}}^2} \approx \pm 0,7 \text{ дб.}$$

Проверка амплитудной и частотной характеристик чувствительности измерительных телефонов проводится согласно инструкции 223—59 «По поверке образцовых измерительных телефонов» с погрешностью  $\pm 0,4$  и  $\pm 0,5$  дб соответственно.

Уровни пороговых напряжений телефона при известной чувствительности определяются по формуле:

$$L_U = L_P - L_E,$$

- где  $L_U$  — уровень порогового напряжения в децибелах относительно 1 в;
- $L_P$  — стандартный эквивалентный пороговый уровень\* звукового давления в децибелах относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  н/м<sup>2</sup>;
- $L_E$  — уровень чувствительности телефона в децибелах относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  н/м<sup>2</sup>.

Погрешность определения порогового напряжения телефона равна погрешности определения чувствительности телефона и не превышает  $\pm 0,5$  дб.

### Выводы

В итоге определены эквивалентные пороговые уровни звуковых давлений, соответствующие значениям порога слышимости по воздушной проводимости. Полученные результаты дают материал для стандартизации аудиометрического нуля в СССР.

Изучен метод и разработана установка для градуировки аудиометров и образцовых измерительных телефонов во ВНИИМ, что позволяет обеспечить единообразие аудиометрических измерений и повысить точность градуировки образцовых измерительных телефонов.

\* В качестве стандартного в лаборатории используется эквивалентный пороговый уровень, приведенный на рис. 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Варшавский Л. А., Ильин. Труды Комиссии по акустике, № 8, (1955).
2. Шейнхман Б. Е., Глекин Г. В., Бабкин В. П. Проблемы физиологической акустики, 3, 75 (1955).
3. Beasley U. S. Nat. Health Survey Bulletins, № 1, 2, 3, 4, 5 (1936).
4. Chavasse P., Lehmann R. Acustica, 7, 132 (1957).
5. Corliss E. L., Burkhard M. D., J. A. S. A., 25, № 5, 990—993 (1955).
6. Dadson R. S., King I. H., J. Laryngol. Otol, 46, 366 (1952).
7. Lehmann R. L'Onde Elect., 36, № 350, 466 (1956).
8. Glorig A., Quiggle R., Wheeler D. E., Grings W., J. A. S. A. 28, 1110 (1956).
9. Sivian L. J., White S. D., J. A. S. A., 4, 288 (1933).
10. Wheeler L. U., Dickson D. D., J. Laryngol. Otol, 46, 379—395 (1952).

Статья поступила в феврале 1962

И. Г. Русаков

ИНЖЕНЕР

## О ВЫРАЖЕНИИ И ИЗМЕРЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШУМА

*Приведен обзор характеристик равномерных и стационарных шумов и рассмотрены определения: уровня звукового давления в октавных и дробно-октавных полосах; уровня громкости; громкости; шумности (неприятности); уровня шумности и соответствующих единиц измерения. Описаны способы оценки шумов по кривым предельных спектров и кривым равной шумности. В качестве практического способа измерения шумности и предельного спектра обсуждается применение шумомера с коррекцией А.*

Измерение шума сопряжено с целым рядом специфических затруднений не только метрологического или методического характера, но и затруднений, связанных с неясностью определения шума как измеряемой величины.

С физической точки зрения шум можно оценивать: 1) по признаку интенсивности — как суммарной, так и в определенных частотных полосах; 2) по признаку спектрального качества или отношения различных составляющих; 3) по признаку равномерности с течением времени, стационарности или импульсивности. Объективные приборы для измерения шума (шумомеры, регистраторы уровня, спектрометры, корреляторы и др.) позволяют в результате более или менее длительного обследования получить данные по каждому из этих признаков в отдельности.

Для наиболее типичного и простейшего случая специфических равномерных стационарных шумов чаще всего ограничиваются замерами уровня звукового давления в стандартных октавных полосах частот, пользуясь шумомером и набором октавных фильтров. Результаты измерений выражаются в единицах децибел (дБ).

Однако для практической оценки шума эти данные недостаточны, так как они не вполне отражают одну из важных характеристик — степень воздействия шума на человека, т. е. то качество шума, которое связано с субъективной реакцией человека. Простейшей мерой шума, связанной с этой реакцией, является его **уровень громкости**, измеряемый в единицах фон. Уровень громкости любого стационарного звука или шума принимается численно равным уровню звукового давления стационарного звука сравнения частоты 1000 гц, который для нормального слушателя по громкости на слух равен с данным звуком или шумом.

Такое определение уровня громкости необходимо для подведения основания под всю проблему измерения громкости и позволяет проводить исследования или в решающих случаях разрешать споры об уровне громкости; однако оно не практично и не может быть использовано для текущих измерений. Поэтому предложены практические методы несложных пересчетов результатов объективных измерений шума в уровень громкости.

Наибольшее распространение и международное признание получил метод Стивенса [2, 3], предназначенный для расчета громкости стационарных широкополосных шумов при слушании в диффузном поле. В основу расчетов по этому методу кладется связь между уровнем громкости и другой субъективной характеристикой звука или шума, называемой просто **громкостью** и измеряемой в единицах сон. Оценка шума в единицах **громкости** дает ответ на вопрос: во сколько раз данный шум громче другого, имеющего уровень громкости  $P=40$  фон. Громкость последнего шума принимается равной 1 сон.

Зависимость между оценкой звука или шума в единицах уровня громкости ( $P$ , фон) или громкости ( $S$ , сон) с достаточной для практических расчетов точностью выражается формулой, справедливой для всех стационарных шумов:

$$P = 40 + 10 \lg_2 S.$$

Для нахождения уровня громкости шума по методу Стивенса надо предварительно определить его громкость и затем, пользуясь формулой (1) или соответствующим графиком, перевести ее в уровень громкости.

Смысл перехода к значениям в единицах громкости (сон) заключается в том, что громкости различных составляющих сложного звука можно складывать, а уровни громкости, как величины типа логарифмических, складывать нельзя. Правда, благодаря осложнениям, вносимым эффектом маскировки, вклад каждой отдельной составляющей в общее ощущение громкости зависит от наличия и силы других, особенно близких по частоте, составляющих. Поэтому просто складывать громкости составляющих тоже нельзя, но тем не менее установлен сравнительно простое правило суммирования составляющих громкостей.

Точнее говоря, складываются так называемые индексы громкости под которыми, по предложению Стивенса, понимается число, определяемое по среднегеометрической частоте и уровню звукового давления в данной полосе (октавной,  $1/2$ -октавной или  $1/3$ -октавной) в соответствии со стандартным графиком, приближенно выражающим кривую равной громкости для шума в диффузном звуковом поле.

Правило суммирования индексов громкости выражается формулой

$$S = S_m + F(\Sigma S_i - S_m),$$

где  $S_m$  — наибольшее значение индекса громкости из полученных индексов в полосах;

$F$  — численный множитель, равный 0,3 в случае анализа по октавным полосам; 0,2 — по  $1/2$ -октавным и 0,15 — по  $1/3$ -октавным или по критическим (см. ниже) полосам;

$\Sigma S_i$  — сумма значений индексов громкости во всех полосах для данного шума.

Для нахождения индексов громкости  $S_i$  в каждой полосе служит график рис. 1, на котором представлены кривые уровней звукового давления, соответствующих равным значениям громкости в полосах в зависимости от геометрически средней частоты полос. Этот график справедлив для любого вида дробно-октавных фильтров; различие отражается только в значении множителя в формуле (2). Удобно воспользоваться калькой с нанесенными на ней (в масштабе рис. 1) вертикальными линиями уровней звукового давления в полосах. Наложив такую кальку на рис. 1, можно сразу получить составляющие индексы громкости  $S_i$  и далее по формуле (2) найти суммарную громкость. Переход от суммарной громкости  $S$  к уровню громкости  $P$  осуществляется номограммой, также приведенной на рис. 1.

Описанная процедура позволяет для данного стационарного шума по результатам дробно-октавного анализа в уровнях звукового давления сравнительно просто определить суммарный уровень громкости.

Выражение суммарной величины шума в фонах или сонах имеет то существенное преимущество, что оно учитывает не только уровень главной составляющей в дробно-октавном спектре шума, но и ее положение по шкале частот, т. е. определяет, является ли шум по преимуществу высокочастотным или низкочастотным. При одном и том же уровне звукового давления для главной полосы график рис. 1 дает рез-

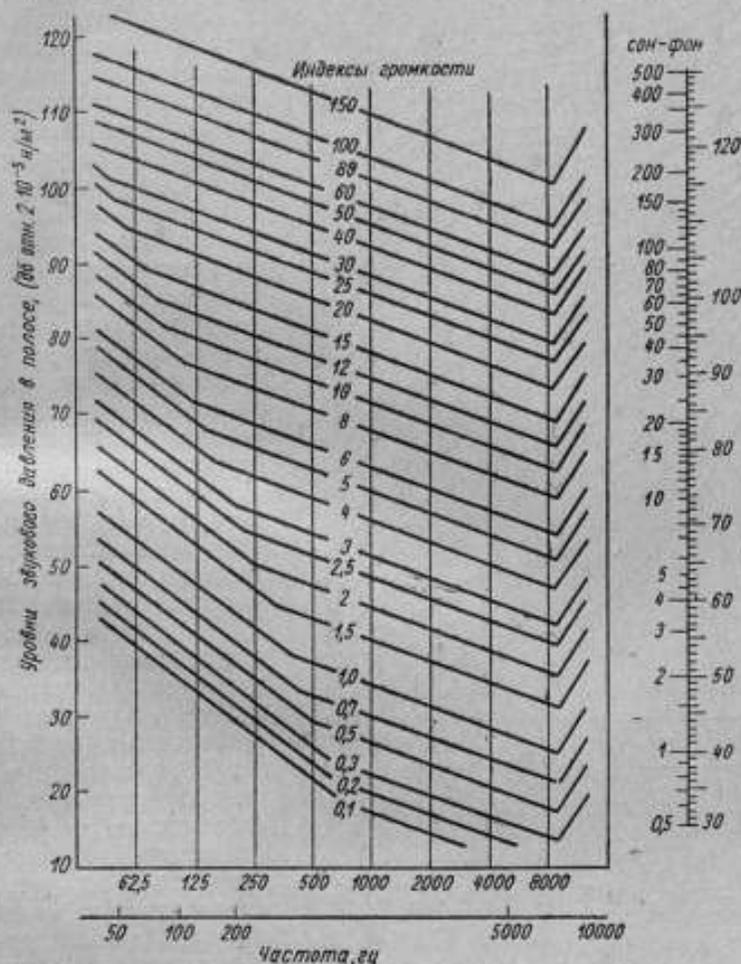


Рис. 1. Кривые равных индексов громкости

ко различающиеся значения в сонах смотря по положению средней частоты полосы. Например, при уровне в полосе, равном 70 дБ, при 63 гц мы получим 3 сон, при 1000 гц — 8,5 сон, а при 8000 гц — 17 сон. При уровне в полосе, равном 100 дБ, соответствующие значения изменяются от 30 до 120 сон. Чем шум более высокочастотный, тем выше его громкость (при том же уровне звукового давления).

В процедуре Стивенса сложный вопрос о практическом определении громкости специфических стационарных шумов нашел себе достаточно полное и совершенное решение. Некоторые уточнения могут потребоваться в связи с тем, что дробно-октавное подразделение частотного диапазона при анализе не вполне соответствует естественному

закону восприятия частоты и ее интервалов на слух. Более правильно было бы разбить частотный диапазон слышимых звуков на такие полосы, которые содержали бы равное число различных на слух градаций частоты. Эти полосы получили название критических частотных полос. Такое разделение на критические полосы и вытекающую из него процедуру расчета громкости и уровня громкости предложил Цвиккер [4]. Для практических расчетов в настоящее время признается более подходящей процедура Стивенса.

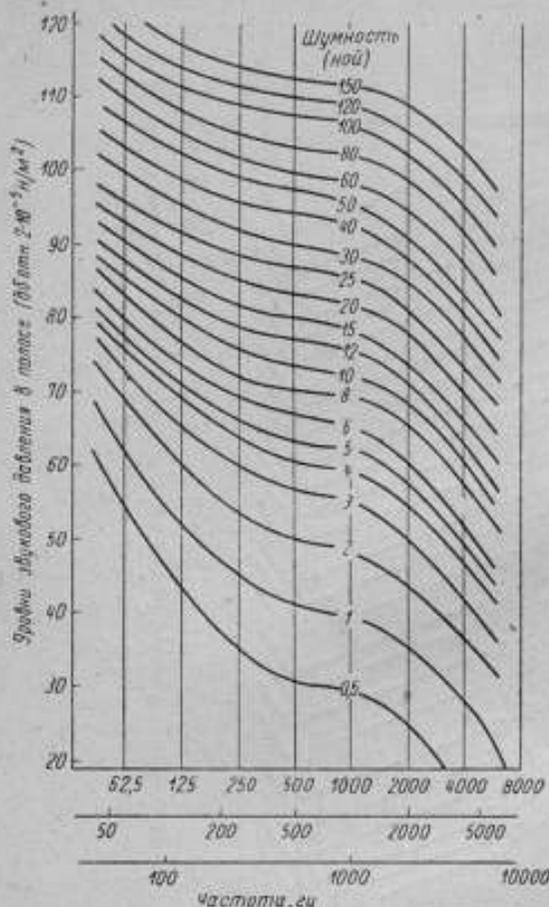


Рис. 2. Кривые равной шумности для октавных полос

и громкость, является непосредственной субъективной величиной, однако, эта оценка отличается от оценки по громкости. При оценке по шумности слушатель отвечает на вопрос: «Является ли данный шум столь же нежелательным, как и другой шум, с которым он сравнивается?».

Произведя такие сравнения, Крайтер получил кривые равной шумности для октавных полос белого шума. Эти кривые (рис. 2) отличаются от аналогичных кривых равной громкости октавных полос: при частотах менее 200 гц они проходят несколько выше (до 3 дб), а при частотах больше 800 гц — ниже (до 10 дб).

Крайтер предложил название единиц шумности «ной» от английского слова «noise». Единица «ной» для шумности соответствует единице «сон» для громкости. От шумности можно переходить к уровню шумности подобно тому как от громкости к уровню громкости. Для этого следует воспользоваться формулой (1) с соответствующей заме-

труднения в практическом выражении шума или шумности возникают с совершенно другой точки зрения. Является ли сама громкость или уровень громкости шума той величиной, которая наиболее существенна для человека при количественной оценке шума? Если, например, интересоваться оценкой шума с точки зрения его устранения или ослабления, то, очевидно, самая совершенная оценка по громкости еще недостаточна. Действительно, мы с удовольствием можем слушать громкую музыку, но несравненно менее громкий шум в спальне оказывается невыносимым.

В результате исследования вопроса о практическом критерии раздражающего действия шума на примере авиационных шумов Крайтер [1] пришел к выводу, что следует различать понятия «громкости» и «шумности» (noisiness). Синонимами к последнему Крайтер считает «неприятность», «неприятность», «нежелательность» (annoyance). Шумность, как

ной обозначений. Величина уровня шумности у Крайтера названа «воспринимаемый уровень шума» (perceived noise level), а единица уровня шумности «PNdB», что по-русски лучше передать обозначением «дБ (ш)».

Вопрос об однозначной оценке шумов с точки зрения их вредности, создаваемых ими помех речевой связи и неприятности подвергается интенсивному изучению в последние годы в связи с разработкой норм на допустимые уровни шумов. Одно из первых предложений было сделано (в 1955 г.) советским исследователем шума И. И. Славиним [5]. Все шумы по Славину разбиваются на три типа: низкочастотные, высокочастотные и среднечастотные. Принадлежность к тому или иному типу определяется положением главной составляющей в спектре при анализе по октавным полосам. Кроме того, учитываются и более высокие составляющие, спад которых с частотой ограничивается 5 дБ на октаву. Таким образом для каждого данного октавного спектра можно определить допустимый суммарный уровень звукового давления, который тем меньше, чем выше простирается октавный спектр. График, предложенный И. И. Славиним, показан на рис. 3.

Нормы и кривые оценки Славина сыграли весьма важную роль, выделив главные существенные признаки шумов с точки зрения их вредности. Однако в настоящее время оценку и нормы Славина следует признать устаревшими. Дальнейшее развитие и международное согласование норм кривых привели к более совершенному выражению шума. Новые кривые оценки шума предложены голландским ученым Костеном на основе учета ряда более ранних, несколько различающихся между собой предложений Беранека, Паррака, Любке и др.

Общим во всех этих предложениях было принятие равномерного спада кривых оценки с частотой. Любке предложил упростить кривые допустив постоянное значение спада 3 дБ на октаву для частот выше 350 гц и 6 дБ для более низких частот. Однако при международном согласовании было решено отказаться от прямолинейности и эквидистантности кривых оценки, допуская при низких уровнях и низких частотах более крутые спады, чем при высоких частотах и уровнях.

Кривые, предложенные Костеном, показаны на рис. 4. По оси ординат здесь, как и на рис. 1, отложены уровни звукового давления в октавных полосах, измеряемые в дБ, а по оси абсцисс — среднегеометрические значения частот для октавных полос, причем за нормальные по рекомендации ИСО принимаются частоты 62,5; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000 и 8000 гц. Кривые переименованы в соответствии со значением уровня звукового давления для каждой кривой при частоте 1000 гц.

Чтобы дать оценку шума по графику рис. 4, надо отложить на этом графике значения уровней звукового давления в каждой октавной полосе и обратить внимание только на то значение, которое достигается кривой с наибольшим номером. Этот номер и принимают за оценку



Рис. 3. Допустимые уровни шума на производстве

БИБЛИОТЕКА  
Всесоюзной научно-исследовательской  
акустической лаборатории  
им. Г. С. Струве

шума. Естественно, что допустимы интерполяции с точностью двух или даже пяти единиц.

Метод оценки шумов по кривой рис. 4 встречается почти общую поддержку в международных организациях, хотя официально рекомендация ИСО еще не утверждена; имеются и противники этого метода. В СССР эта рекомендация учитывается и по возможности соблюдается при пересмотре или новой разработке нормативов по ограничению шума в производственных и бытовых условиях и на транспорте.

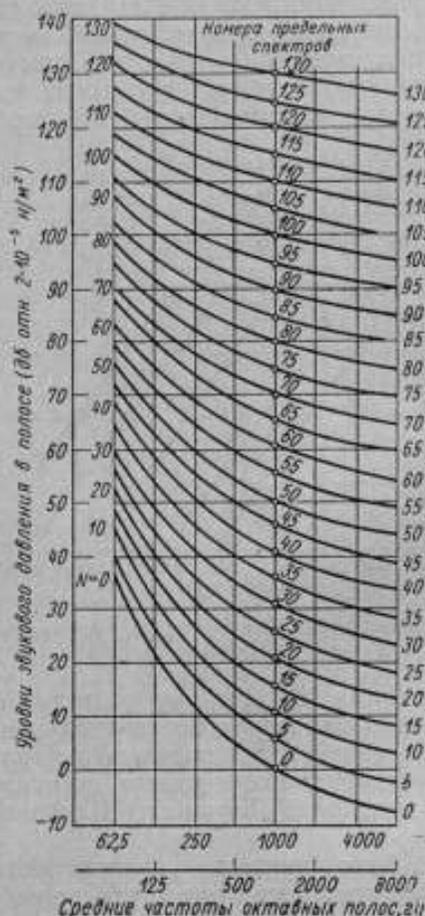


Рис. 4. Кривые предельных спектров

В каких же единицах будет по этой методике даваться оценка и как назвать измеряемую величину шума? Ввиду практической важности нового способа оценки необходимо как можно скорее дать эти названия и согласовать их для общего применения. В английском языке кривые Костена получили название «Noise Rating», что означает «оценки шума», а во французском, возможно еще не окончательно, «niveau de nuisance», т. е. «уровень вредности». В русском языке можно сослаться на «Санитарные нормы допустимых уровней шума в жилых домах» [6], где употреблен термин «предельный спектр (ПС)». Было также предложено (в другом документе) название «категория шума». Что касается единиц, соответствующих номеру кривых, в тех же нормах дано название ПС-30, ПС-40 и т. д. Название «предельный спектр» не совсем удачно, так как отражает только одну из сторон дела — использование спектра при установлении нормы, но не указывает на выбор главной составляющей. Кроме того, оценка по кривым может даваться не только для установления предельно-допустимых шумов.

Однако название «кривые предельных спектров» уже вошло в широкую практику. В связи с этим в качестве единицы для оценки вели-

чины шума целесообразно принять «индекс предельного спектра». Например, для жилых помещений в дневное время в [6] установлен допустимый шум с индексом ПС-30.

Понятия «предельных спектров» и «уровня шумности» родственны, но далеко не тождественны. Кривые равной шумности для октавных полос (см. рис. 2) не совпадают с кривыми предельных спектров (см. рис. 4). Кривые различаются не только по форме, но и по средним численным значениям (по своим параметрам). Переведя значения параметров шумности по Крайтеру в уровни шумности, можно заметить, что численные значения уровней шумности совпадают со значением уровня звукового давления в полосе (отложенным по оси ординат) при частоте ~300 гц, в то время как для кривых предельных спектров по Костену такое совпадение установлено при 1000 гц. Это различие, возможно, связано с тем, что кривые Костена устанавливают оценку сложных шу-

мов, т. е. предполагают некоторое усредненное наполнение одновременно всех октавных полос спектра, тогда как в кривых Крайтера речь идет о рассмотрении и сравнении отдельных октавных полос шума.

В заключении этого краткого обзора уместно остановиться еще на одном упрощенном способе оценки предельного спектра: измерении шумомером с коррекцией  $A$ . В литературе отмечалось, что эта простая оценка дает результаты, мало отличающиеся от оценки по предельным спектрам. С целью количественного сравнения этих двух оценок были рассчитаны\* показания шумомера  $A$  для 12 шумов, имеющих по возможности разнообразные спектры: и равномерно спадающие или возрастающие, и частично постоянные, и частично возрастающие или спадающие, и полосовые как низкочастотные, так и высокочастотные.

Полученные результаты привели к следующим выводам:

1) при измерениях шумомером  $A$  в среднем должны получаться оценки, завышенные приблизительно на 2 дб;

2) особенно завышенные значения шумомером  $A$  должен давать при измерении низкочастотных шумов (при внесении средней поправки на 2 дб еще до 4 дб), а заниженные — при высокочастотных (тоже до 4 дб).

Таким образом, измерение шумомером  $A$  является неплохим приближением к оценке по предельным спектрам. По этой причине в [6] допускают для ориентировочной оценки индекса предельного спектра использовать суммарный уровень по шумомеру с характеристикой  $A$ , причем индексу ПС соответствует показание шумомера  $A$ , уменьшенное на 5 дб. В дальнейшем это должно быть уточнено на практике. Если приближение окажется недостаточно хорошим, то возможно, возникнет необходимость разработки специального прибора для измерения индекса ПС. Такой прибор должен будет иметь корректирующие фильтры, соответствующие кривым рис. 4, и, кроме того, его показание должно учитывать только наибольший уровень в полосе с учетом такой коррекции. Зависимость кривой коррекции от уровня шума создает трудности в создании такого прибора, которые, однако, вполне преодолимы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kryter K. D. Scaling human reactions to the sound from aircraft, *J. Acoust. Soc. America*, 31, 1959, p. 1415. The meaning and measurement of perceived noise level, *Noise Control*, 6, № 5, 12, 1960; № 2, 48, 1961.
2. Stevens S. S., Calculating Loudness, *Noise Control*, 1957, 3, № 5, 11.
3. Procedure for Calculating Loudness, Mark VI, *J. Acoust. Soc. America*, 33, № 11, 1961, p. 1577.
4. Zwicker E. Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit, *Acustica*, 8, Beihefte 1, 1958, S. 273.
5. Временные санитарные нормы и правила по ограничению шума на производстве № 205—56. Министерство здравоохранения СССР.
6. Санитарные нормы допустимых уровней шума в жилых домах № 337—60. Министерство здравоохранения СССР.

Статья поступила в апреле 1962 г.

\* Такие расчеты были впервые проведены А. Глорингом (США).

## ОБ ОДНОМ СПЕЦИФИЧЕСКОМ ТРЕБОВАНИИ К ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИЕМНИКАМ ИНФРАЗВУКА ДЛЯ ВОДЫ

*Специфическое снижение чувствительности холостого хода пьезоэлектрических гидрофонов, обусловленное недостаточно большой постоянной времени системы преобразователя по сравнению с периодом принимаемых колебаний, ограничивает их применение на весьма низких частотах. Произведен анализ схемы измерений по методу замещения и получена расчетная формула для оценки снижения чувствительности гидрофона, показывающая, что для устранения этого снижения в области низких инфразвуковых частот должны быть предъявлены повышенные требования к электрической изоляции выводов преобразователя.*

В настоящее время в практике гидроакустических измерений в диапазоне инфразвуковых частот наибольшее распространение получили пьезоэлектрические гидрофоны [4].

Их отличительная особенность — большое внутреннее сопротивление в области низких частот. При частотах менее 1 гц это сопротивление может составлять ~100 Мом. Работа чувствительного элемента гидрофона органически связана с входным каскадом усилительного тракта, сопротивление которого может существенно влиять на чувствительность преобразователя.

Благодаря своему высокому внутреннему импедансу на низких частотах при нагрузке на недостаточно большое сопротивление пьезоэлектрические гидрофоны обнаруживают низкочастотный завал частотной характеристики. Для устранения этого явления часто применяют метод замещения (метод добавочного сопротивления [1]).

Чувствительность гидрофона  $E$  в режиме холостого хода характеризуется отношением его электродвижущей силы  $U_{xx}$  к звуковому давлению  $p$ :

$$E = \frac{U_{xx}}{p}.$$

Эта характеристика выражает объективные качества преобразователя и не зависит от случайных переменных факторов, связанных с соотношением сопротивления гидрофона и схемы его включения. При работе по методу замещения можно обойтись без измерительных усилителей, а применять сравнительно простые схемы, благодаря тому, что эти усилители работают здесь лишь как индикаторы уровня выходного напряжения. Это практически весьма важно, так как создание измерительных усилителей в инфразвуковом диапазоне частот (и особенно на частотах порядка долей герца) затрудняется дрейфом нуля усилительных схем и вибрационными помехами.

Период инфразвуковых колебаний может достигать десятков минут [2], поэтому при инфразвуковых измерениях существенно повы-

шаются требования к самим преобразователям в отношении электрической изоляции их вводов. Сопротивление утечки между положительным и отрицательным выводами должно обеспечивать достаточно большую постоянную времени системы преобразователя по сравнению с периодом принимаемых колебаний. В воде этого удается достигнуть с большим трудом.

При невыполнении этого условия может наблюдаться специфическое снижение чувствительности в области низких частот несмотря на то, что частотная характеристика получена в режиме холостого хода. Другими словами, при больших периодах колебаний может возникнуть утечка электрических зарядов с чувствительного элемента преобразователя, зависящая от его реальной конструкции. Это явление наблюдалось при градуировке пьезокерамических преобразователей в диапазоне частот ниже 10 гц. В качестве примера приведем данные градуировки пьезокерамического гидрофона емкостью 8000 пф при наличии утечки между его выводами ~ 20 Мом:

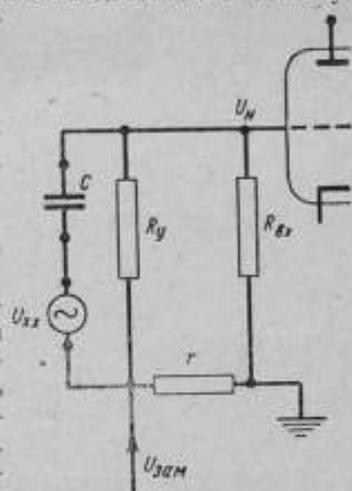


Схема к расчету влияния утечки между выводами пьезоэлектрического преобразователя

Таблица 1

Частота гц	Чувствительность $E$ вск/ м/м <sup>2</sup>	Частота гц	Чувствительность $E$ вск/ м/м <sup>2</sup>
0,2	9,7	30	43
0,5	19,2	40	44
1	28	50	43
2	36	60	43
5	40	70	41
10	41	80	44
15	43	90	43
20	43	100	43

Градуировка этого гидрофона была проведена на установке, работающей по методу электродинамической компенсации [3], разработанной во ВНИИФТРИ.

Входное сопротивление усилителя при этих измерениях  $R_{вх}$  составляло ~ 11 Мом.

Для более подробного объяснения полученного снижения характеристики на низких частотах рассмотрим изображенную на рисунке эквивалентную схему пьезоэлектрического преобразователя [5] и усилительного каскада при применении метода замещения. Отметим, что включенное последовательно с преобразователем сопротивление замещения  $r$  должно быть мало по сравнению с другими сопротивлениями в схеме ( $r \ll R_y$  и  $r \ll R_{вх}$ ).

При возбуждении гидрофона инфразвуком на сопротивлении  $R_{вх}$  возникает напряжение  $\dot{U}_n$ , которое выражается:

$$\dot{U}_n = \dot{U}_{xx} \frac{\frac{R_y R_{вх}}{R_y + R_{вх}}}{\frac{1}{j\omega C} + \frac{R_y R_{вх}}{R_y + R_{вх}}} = \dot{U}_{xx} \frac{j\omega C R_y R_{вх}}{R_y + R_{вх} + j\omega C R_y R_{вх}} \quad (1)$$

При подаче же напряжения замещения  $\dot{U}_{зам}$  на нагрузку  $R_{вх}$  получаем напряжение  $\dot{U}_n$ :

$$\dot{U}_n = \dot{U}_{зам} \frac{R_{вх}}{\frac{R_y / j\omega C}{R_y + \frac{1}{j\omega C}} + R_{вх}} = \dot{U}_{зам} \frac{R_{вх} (1 + j\omega CR_y)}{R_y + R_{вх} + j\omega CR_y R_{вх}} \quad (2)$$

При замещении  $\dot{U}_n = \dot{U}'_n$  и, следовательно,

$$\dot{U}_{вх} = \dot{U}_{зам} \frac{R_{вх} (1 + j\omega CR_y)}{j\omega CR_y R_{вх}} = \dot{U}_{зам} \left(1 - \frac{1}{\omega R_y C}\right) \quad (3)$$

Таким образом,

$$\left| \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{U}_{зам}} \right| = \frac{E_1}{E_2} = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 R_y^2 C^2}} = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau)^2}} \quad (4)$$

Здесь  $E_1$  — результат измерения чувствительности при частотах, когда утечкой  $R_y$  можно пренебречь, а  $E_2$  — результат измерения чувствительности на частотах, когда эту утечку приходится учитывать.

Если постоянная времени  $\tau = R_y C$  недостаточно велика, то на низких частотах второй член под корнем может быть сравним с единицей, или даже превосходить ее по величине, что и обуславливает снижение характеристики чувствительности холостого хода с уменьшением частоты измеряемого инфразвука.

Частотная характеристика этого гидрофона, полученная экспериментально, удовлетворительно совпала с расчетными значениями, определенными по приведенной формуле (4). Интересно отметить, что снижение чувствительности холостого хода началось уже с частоты 10 гц при сравнительно большой величине емкости чувствительного элемента.

Значения чувствительности  $E_2$ , рассчитанные согласно схеме на рисунке при частотах, указанных в табл. 2, оказались равными:

Таблица 2

Частота гц	Чувствительность $E_2$	Чувствительность $E$	Частота гц	Чувствительность $E_2$	Чувствительность $E$
	$\frac{мкс}{н/м^2}$	$\frac{мкс}{н/м^2}$		$\frac{мкс}{н/м^2}$	$\frac{мкс}{н/м^2}$
0,2	8,4	9,7	2	38	36
0,5	19	19,2	5	40	40
1	30	28	10	42	41

В этих расчетах  $E_1$  принималась равной  $43 \frac{мкс}{н/м^2}$ , а  $\tau = 0,16$  сек. Для сравнения указаны и измеренные значения  $E$  (табл. 1).

В худшем случае на частоте 0,2 гц расхождение экспериментального значения чувствительности с расчетным ее значением составляло  $\sim 1$  дб. Такое согласие результатов подтверждает допустимость выбора схемы, приведенной на рисунке.

При выборе преобразователей для измерения подводного инфразвука, особенно в диапазоне низких инфразвуковых частот, необходимо учитывать рассмотренное здесь влияние утечки между выводами, зависящее от практического выполнения конструкции. В области самых низких частот устранить уменьшение чувствительности холостого хода вряд ли удастся.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беранек Л. Акустические измерения (пер. с англ.), ИЛ, 1952.
- 2) 2. Бреховских Л., Распространение звуковых и инфразвуковых волн в природных волноводах на большие расстояния. Усп. физич. наук, т. XX, вып. 2, 1960.
3. Голеников А. Н. Градуировка измерительных гидрофонов в диапазоне частот 0,1—100 *цз*. Измерительная техника, № 9, 1961.
4. Красильщик И. Л. Образцовые измерительные гидрофоны. Доклад на IV Всесоюзной акустической конференции. Рефераты докладов, Изд-во АН СССР, 1958.
5. Семенов Ю. Б. Входные цепи усилителей, работающих от пьезоэлектрических звукоприемников. Труды комиссии по акустике, сб. 7, 1962, стр. 78.

Статья поступила в апреле 1962 г.

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДИКАТОРА МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ОТ ИНФРАЗВУКА ДО 300 гц

*Приводятся основные экспериментальные результаты исследований в диапазоне частот 0,1—300 гц динамических свойства чувствительного индикатора малых колебательных смещений с фотосопротивлением, созданного во ВНИИФТРИ для установки, работающей по методу электродинамической компенсации. Показано, что несмотря на значительное снижение чувствительности индикатора, по мере увеличения частоты этот метод применим до 300 гц. Рассматривается вопрос о недостатках визуальной индикации при использовании прямолинейной развертки луча осциллографа на низких инфразвуковых частотах и предлагается более удобная развертка луча синусоидальным напряжением. Приведены результаты оценки помех и некоторые меры по уменьшению их влияния.*

В [1] был описан компенсационный преобразователь, чувствительный к смещениям порядка сотых долей микрона, основанный на визуальной индикации момента компенсации движения мембраны, находящейся под одновременным действием внешней и электродинамической сил. Этот компенсатор был применен в разработанной во ВНИИФТРИ установке для абсолютной градуировки гидрофонов методом электродинамической компенсации. Градуировка гидрофонов на этой установке проводилась в диапазоне частот 0,1—100 гц. Погрешность этих измерений заметно возрастала в диапазоне низких инфразвуковых частот (приблизительно до 1 гц) и на частоте 0,1 гц достигала своего наибольшего значения (приблизительно 3—3,6%), в то время как на других частотах вплоть до 100 гц погрешность находилась в пределах 1,5—2%. Кроме того, работа компенсатора существенно затруднялась помехами главным образом вибрационными, а также высшими гармониками, подчеркиваемыми при компенсации.

Возникла необходимость повышения точности индикатора компенсации в диапазоне низких инфразвуковых частот и изыскания более удобного способа наблюдения компенсации в случае медленно меняющихся напряжений при наличии вибрационных помех. С другой стороны, было интересно применить оптико-механическое устройство на фотосопротивлениях при частотах выше 100 гц. Частотная характеристика тракта компенсации имеет спад, обусловленный в основном ростом реактивного сопротивления мембраны электродинамического преобразователя, однако, несмотря на это, чувствительность тракта на частоте 100 гц оставалась значительной ( $40 \frac{мв}{н/м^2}$  по пиковому значению).

В настоящей статье приводятся результаты дополнительных исследований, проведенных на установке, работающей по методу электродинамической компенсации. Эти исследования позволили улучшить компенсацию на низких инфразвуковых частотах и расширить диапазон

точной градуировки гидрофонов в сторону низких звуковых частот (до 300 гц).

### Недостатки линейной развертки индикатора компенсации на частотах ниже 1 гц

На рис. 1 представлена блок-схема компенсационного преобразователя, отдельные узлы которой были подробно описаны в [1].

Напомним, что инфразвуковое давление  $p$ , возбуждаемое в малой замкнутой камере с водой, компенсируется на мембране электродинамического преобразователя 1 противодействием электродинамической силы:

$$p = \left( \frac{0,1BL}{S} \right) \cdot I_k = M \cdot I_k,$$

где  $S$  — эффективная площадь мембраны;

$M$  — коэффициент пропорциональности тока компенсации  $I_k$  инфразвуковому давлению, зависящий от конструкции электродинамического преобразователя.

В динамическом режиме момент компенсации отмечается по достижении неподвижности мембраны. Для этой цели колебательное смещение  $x$  мембраны с помощью оптико-механического устройства 2, содержащего фотосопротивления, преобразуется в электрическое напряжение  $U$ , которое затем усиливается предварительным усилителем 3 и подается на осциллограф 4 типа ЭНО-1. Достижение неподвижности мембраны устанавливается по получении горизонтальной линии на экране осциллографа, являющегося визуальным индикатором компенсации.

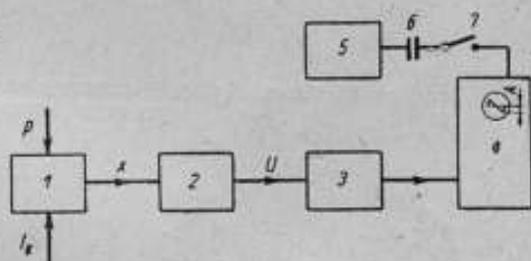


Рис. 1. Блок-схема тракта компенсации колебательных смещений (давления)

В работе [1] была применена развертка луча линейным напряжением от внутреннего генератора осциллографа 4. При этом визуальное наблюдение компенсации на низких инфразвуковых частотах затруднялось из-за наличия помех. Внешние помехи являются специфической особенностью инфразвука и весьма осложняют процедуру инфразвуковых измерений. В момент компенсации на экране осциллографа наблюдаются искажения горизонтальной линии отдельными всплесками от вибрационных помех и некомпенсированными колебаниями в обертонах (в основном второй гармоникой), обусловленными нелинейными искажениями электронных блоков схемы. На низких инфразвуковых частотах эти явления осложняются влиянием дрейфа в цепи индикатора нулевых смещений. При применении линейно-изменяющегося напряжения развертки достижение компенсации на частотах ниже 1 гц крайне затрудняется тем, что наблюдатель видит мелькающие фигуры, состоящие из отдельных кусков исследуемого сигнала. Это лишает его возможности быстро и уверенно регулировать амплитуду и фазу компенсирующего тока.

При градуировках преобразователей на частотах, лежащих ниже частот вибрационных помех, период развертки следует по возможности выбирать большим периода вибрационной помехи или равным периоду полезного сигнала.

### Применение синусоидальной развертки индикатора

В диапазоне низких инфразвуковых частот более удобным оказалось использование развертки синусоидальным напряжением.

Для этой цели на горизонтально-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки осциллографа 4 [2] через выключатель 7 и разделительную емкость 6 подается (см. рис. 1) напряжение с генератора 5 (типа НГПК-2), питающего возбуждатель инфразвука.

При нескомпенсированном сигнале фигура Лиссажу на экране осциллографа представляет собой эллипс, несколько искаженный вибрационными помехами (рис. 2а). Таким образом, исследуемый динами-

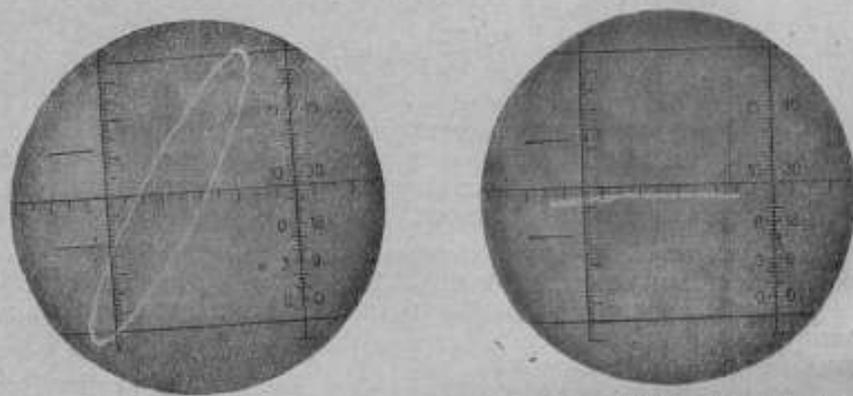


Рис. 2а и б. Осциллограмма сигнала до и в момент компенсации при синусоидальной развертке

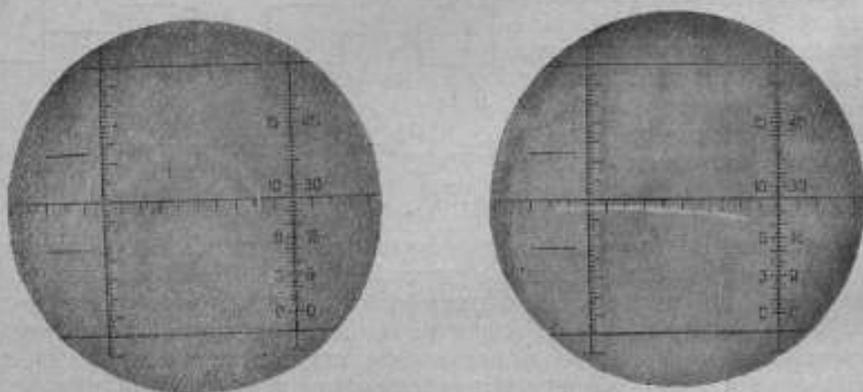


Рис. 2в. Осциллограмма искаженный сигнала в момент компенсации

Рис. 2г. Осциллограмма искаженный сигнала при перекомпенсации

ческий процесс локализуется на экране. Оператор получает возможность непосредственно наблюдать весь периодически повторяющийся процесс и более критично подбирать необходимые регулировки, чем в случае применения линейной развертки. Благодаря этому удается значительно сократить время на достижение компенсации в диапазоне частот, лежащих ниже 1 гц.

При отсутствии компенсации большая ось эллипса расположена под углом к горизонтальной линии на экране осциллографа. В процессе достижения компенсации угол наклона большой оси эллипса уменьшается и в момент компенсации эллипс вырождается практически в горизонтальную линию (рис. 2б).

В составе сигналов обычно имеются вторые гармоники, которые при компенсации в зависимости от фазовых соотношений с основной гармоникой образуют фигуры Лиссажу вида «дуги» или «восьмерки» (см. рис. 2б). На рис. 2в представлена фотография того же скомпенсированного сигнала, что и на рис. 2б, но при увеличенной в 10 раз чувствительности осциллографа. На фотографии ясно видны составляющие второй гармоники и вибрационных помех. При сопоставлении осциллограмм рис. 2а и 2в с учетом десятикратного увеличения чувствительности в последней видно, что вторая гармоника составляет около 2%, т. е. несколько меньше высокочастотных вибрационных помех. На осциллограмме рис. 2в нет вибрационных помех ударного характера, хорошо заметных на осциллограмме рис. 2а. На осциллограмме рис. 2г представлена фигура при небольшой (на 5%) расстройке компенсации.

Из сопоставления рис. 2б и 2г видно, что вытянутая вдоль горизонтальной оси «дуга», имевшая место при полной компенсации и обусловленная второй гармоникой сигнала (см. рис. 2б), изменила свое положение. Воображаемая прямая, соединяющая концы дуги, стала располагаться наклонно к горизонтальной оси, проходя через второй и четвертый квадранты экрана осциллографа и указывая тем самым на перекомпенсацию (см. рис. 2г).

При применении синусоидальной развертки возможен достаточно точный подбор тока компенсации: погрешность не превышает 2—3%. Эти измерения производились и на уровне помех; соотношение сигнал/помеха в условиях описываемой установки на концах частотного диапазона обычно составляло 14:1.

#### Погрешность измерений методом электродинамической компенсации

С целью ограничения высокочастотных шумов в усилителе переменного тока установлены специальные фильтры, ограничивающие полосу пропускания частот выше 350—400 гц.

Для уменьшения дрейфа нуля специально подбирался режим питания фотосопротивлений, а цепи накала ламп усилителя и осветителя питались от аккумулятора большой емкости.

Режим питания фотосопротивлений типа ФСК определялся экспериментально из условия оптимальной чувствительности и минимального дрейфа нуля. Практически такой режим у фотосопротивлений получается, если рассеиваемая мощность на каждую половину дифференциального фотосопротивления не превышает 0,08 вт при номинальном сопротивлении 5000 ом.

Выбор специального режима питания как фотосопротивлений, так и усилителя, а также выполнение усилителя по схеме переменного тока позволили снизить помехи и производить индикацию весьма малых изменений напряжения на выходе оптико-механического преобразователя (порядка 100—300 мкв) во всем диапазоне частот индикатора.

В диапазоне частот выше 1—5 гц удобнее применять не синусоидальную развертку, а линейную, так как здесь легко обеспечить частоту развертки луча меньше частоты полезного сигнала, как это было сделано раньше [1].

Сравнение результатов измерений с применением обоих видов развертки в диапазоне низких инфразвуковых частот показало, что погрешности в обоих случаях одинаковы; однако, при синусоидальной развертке работать удобнее и времени на достижение компенсации тратится значительно меньше (приблизительно в 3 раза), чем при линейной.

Применение в установке [1] генератора типа НГПК-2 и двойного люкового вольтметра ДПВ-2, работающих до частоты 100 гц, не позволяет использовать запас чувствительности компенсационного преобразователя. Расширение диапазона градуировки гидрофонов на установке.

работающей по методу электродинамической компенсации, вплоть до частоты 300 гц (приблизительно до первого резонанса гидроакустической системы) было достигнуто путем применения генератора типа 1015 и милливольтметра типа 2603 фирмы Брюль и Кьер.

На рис. 3 представлена частотная характеристика чувствительности тракта компенсации, снятая при постоянстве давления, действующего на

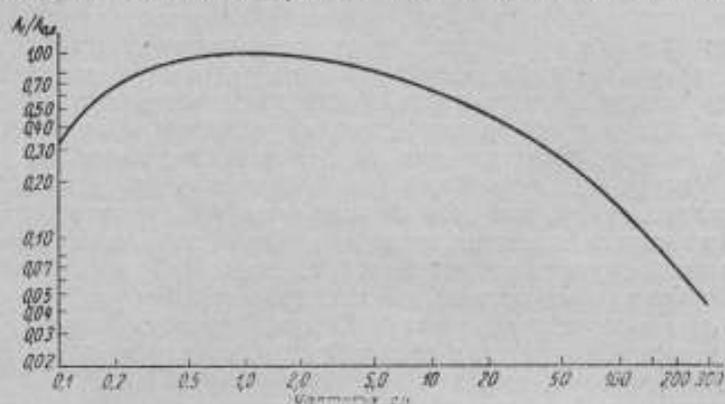


Рис. 3. Частотная характеристика чувствительности тракта компенсации

мембрану компенсационного преобразователя. Эта характеристика в диапазоне частот 0,1—300 гц снималась при применении обоих генераторов: в диапазоне 0,1—100 гц—генератора типа НПК-2, а в диапазоне 5—300 гц—генератора типа 1015.

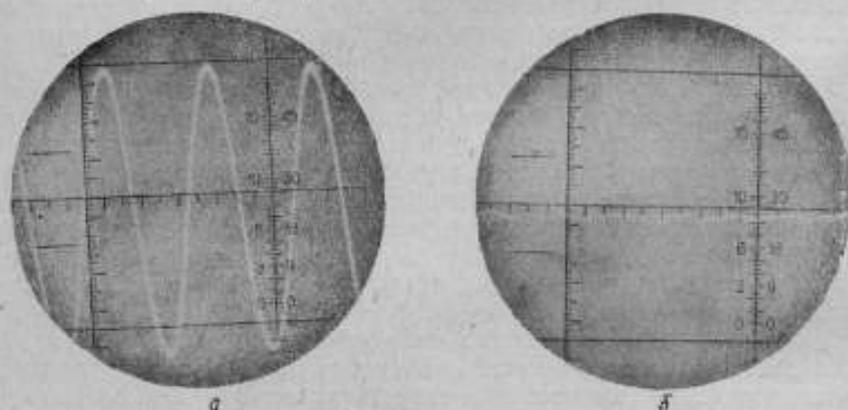


Рис. 4. Осциллограмма сигнала до и в момент компенсации при развертке линейно-изменяющимся напряжением

По оси абсцисс отложена частота (в герцах), а по оси ординат—относительная чувствительность  $A_f/A_{0.8}$  (по отношению к наибольшей чувствительности  $A_{0.8}$ , имеющей место на частоте 0,8 гц).

Интересно отметить, что наиболее благоприятное соотношение между полезным сигналом и помехами имеет место на частоте 10 гц (рис. 4а и б). Соответственно на этой частоте получается наименьшая среднеквадратичная погрешность градуировки гидрофонов. На рис. 5 (кривые 3 и 4) представлены зависимости от частоты среднеквадратичной погрешности  $\sigma$  ряда измерений (в %). Данные кривой 3 были получены на отечественном комплекте аппаратуры, а данные кривой 4—на комплекте фирмы Брюль и Кьер. Наибольшие значения этой погреш-

ности ( $-2,6\%$ ) имеют место на частотах 0,1 и 200 гц. На частоте 200 гц в наибольшей степени проявлялись вторые гармоники, обусловленные нелинейными искажениями, которые, по существу, и ограничивают даль-

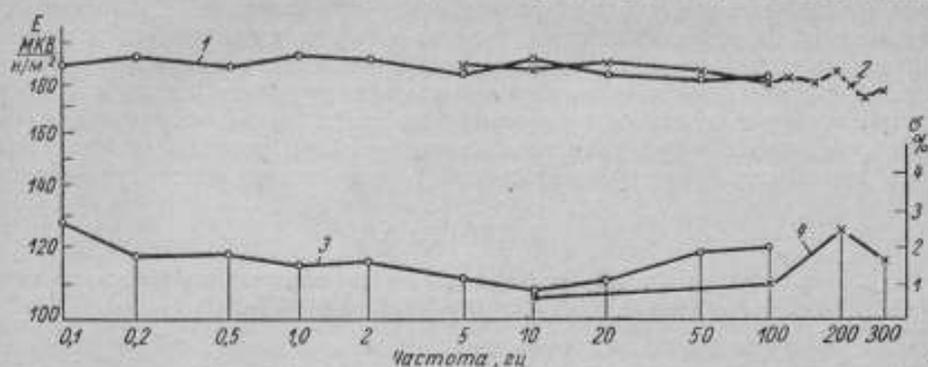


Рис. 5. Частотные характеристики чувствительности холостого хода преобразователя (1, 2) и среднеквадратичная погрешность его градуировки (3 и 4)

нейшее повышение чувствительности, поскольку из-за них затрудняется четкая индикация момента компенсации.

#### Расширение частотного диапазона до 300 гц

С повышением частоты чувствительность компенсационного преобразователя монотонно убывает, однако, даже на частоте 300 гц имеется большой запас чувствительности. При токе компенсации равном нулю на экране осциллографа можно получить сигнал с двойной амплитудой 80 мм. Воспроизводимость результатов градуировки на этой частоте ( $\sigma$ ) лучше 1,8%.

В качестве примера на рис. 5 представлена частотная характеристика пьезокерамического гидрофона в диапазоне 0,1—300 гц. Левая часть этой характеристики (кривая 1) была получена методом электродинамической компенсации [1] с применением приборов НГПК-2 и ДПВ-2, а правая (кривая 2) — с применением упомянутых приборов фирмы Брюль и Кьер. Совпадение результатов градуировки в диапазоне перекрытия 5—100 гц (в пределах 0,3 дб) свидетельствует об отсутствии систематической погрешности и стабильности установки.

Стабильность работы компенсационного преобразователя можно также иллюстрировать экспериментальными данными статической градуировки, т. е. результатами определения коэффициента пропорциональности  $M$  (рис. 6).

Представленные результаты измерений, полученные разными методами с перерывом во времени более года (точками показаны данные калибровки 1959 г., крестиками—данные калибровки 1961 г.), сошлись

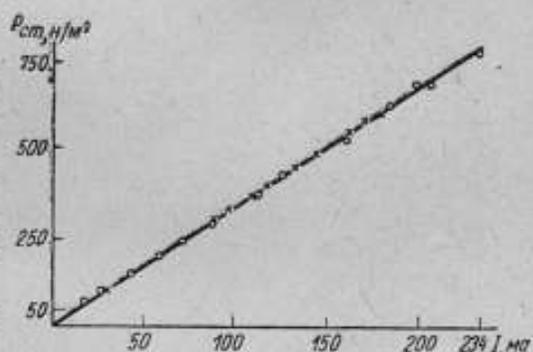


Рис. 6. Зависимость тока (постоянного) электродинамического преобразователя от статического давления.

в пределах 1% (3,28 и 3,31  $\text{н/м}^2 \cdot \text{ма}$ ). Поэтому оказалось возможным пренебречь остатками систематических погрешностей и считать  $M$  постоянной компенсационного преобразователя.

Приведенные в статье результаты исследований динамических свойства индикатора смещений, чувствительного к смещениям порядка сотых долей микрона, позволили усовершенствовать визуальную индикацию компенсации в области низких инфразвуковых частот и расширить частотный диапазон градуировки гидрофонов вплоть до 300  $\text{гц}$ . Эти результаты могут представлять интерес при разработке аналогичных компенсационных устройств для других технических применений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голенков А. Н. Градуировка инфразвуковых гидрофонов электродинамическим компенсационным методом. Труды институтов Комитета, вып. 61 (121), Стандартиз, 1962.
2. Троицкий В. С. Применение катодного осциллографа для индикации баланса моста, Радиотехника, т. 3, № 1, 1948.

Статья поступила в апреле 1962 г.

Д. З. Лопашев

ВНИИФТРИ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В БОЛЬШОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ БАСЕЙНЕ

*Приведены исследования незаглушенного бассейна для гидроакустических измерений объемом 390 м<sup>3</sup> с помощью методов архитектурной акустики. Определены области свободного и диффузного звуковых полей, пригодных для градуировки гидрофонов. Описана аппаратура для измерений по импульсной методике и на полосах шума в диапазоне до 100—150 кГц.*

В последние годы все большее внимание акустиков привлекают измерения не только чистых тонов в свободном поле, но также сложных сигналов, шумов, турбулентности, измерения в сложных звуковых полях, со случайным приходом звуковых волн. В связи с этим возникает вопрос о чувствительности преобразователей в сложных полях, о их направленных свойствах, импедансе и к. п. д.

В литературе появились работы [8, 9] по градуировке преобразователей в диффузном звуковом поле. Пока известны такие работы для воздушной акустики, но в ближайшем будущем они, вероятно, появятся и в гидроакустике, так как измерения в ваннах для ультразвуковой обработки, измерения шумов моря и измерения в биоакустике требуют подобных градуировок.

Изучение бассейна ВНИИФТРИ проводилось под углом зрения как классических, так и новых задач.

### КОНСТРУКЦИЯ БАСЕЙНА

Бассейн представляет собой железобетонную коробку (рис. 1), стены которой до половины утоплены в грунт. Бассейн расположен в окружении лабораторных помещений. Зеркало воды несколько возвышается над поверхностью пола в бассейновом зале. Длина бассейна 10,25 м, ширина 6,5 м, глубина (расстояние от зеркала воды до дна) 5,9 м. Частичное наполнение и слив воды производится 1—2 раза в неделю.

Постройка бассейна проводилась в следующей последовательности: уплотнение грунта и сооружение бетонной подготовки; после затвердевания подготовки—наклейка гидронизоляции по ее поверхности; железобетонные работы; торкретирование внутренних поверхностей слоем цементного раствора; испытание бассейна на герметичность; оклейка стен бассейна гидронизоляцией с внешней стороны.

Над бассейном сооружен мост, который с помощью электропривода может перемещаться вдоль бассейна. Управление электроприводом может осуществляться как непосредственно с моста, так и из аппаратной, смежной с бассейном.

Координатно-поворотное устройство, укрепленное на тележке, может перемещаться с помощью электропривода по рельсам, проложенным на мосту, в поперечном направлении бассейна. Гидрофоны спускаются в воду на штангах длиной 3 м, крепящихся к координатно-поворотному устройству. Последнее обеспечивает перемещение гидрофона в вертикальном направлении на  $\pm 20$  см и установку его с точностью  $\pm 1$  мм. Два крайних гидрофона могут перемещаться по прямой относительно среднего гидрофона в пределах 15—65 см и устанавливаться с точностью  $\pm 1$  мм. Каждый гидрофон можно неограниченно поворачи-

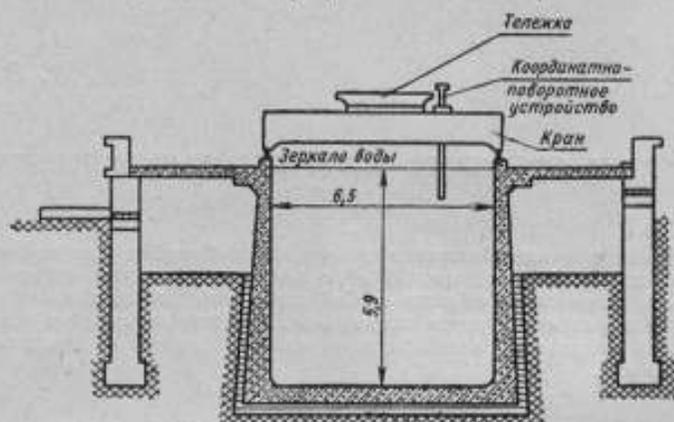


Рис. 1. Поперечный разрез гидроакустического бассейна

вать относительно вертикальной оси и устанавливать с точностью  $\pm 1^\circ$ . Для установки гидрофонов на расстояниях больших, чем 130 см друг от друга, используются переносные крепления и тельфер, перемещающийся по монорельсу, закрепленному на потолке.

Аппаратура, необходимая для проведения измерений, устанавливается в аппаратной и частично вдоль стен помещения бассейна.

#### АППАРАТУРА, ПРИМЕНЯВШАЯСЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БАССЕЙНА

##### Импульсная аппаратура (рис. 2)

Излучающий тракт состоит из задающего генератора синусоидального напряжения  $ЗГ_1$ , на диапазон частот 5—500 кГц; усилителя  $УС_1$ , обеспечивающего мощность на выходе до 100 вт в непрерывном режиме

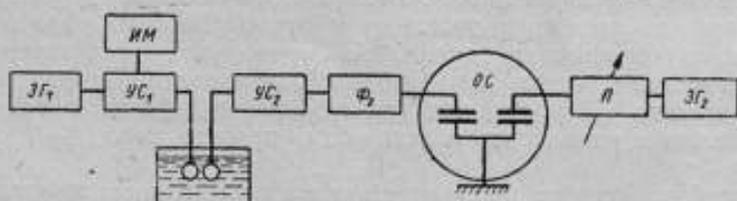


Рис. 2. Блок-схема импульсной измерительной установки

и до 500 вт в импульсном режиме; импульсного модулятора  $ИМ$ , формирующего пакеты синусоид длительностью от 0,1 до 10 мсек и частотой следования от 0,2 до 20 гц. Обычно использовался пятиваттный выход усилителя излучающего тракта. На керамический излучатель подавалось напряжение до 100 в. Сопротивления генератора и излучателя были согласованы.

Приемный тракт состоит из усилителя  $УС_2$  типа 2603 фирмы Брюль и Кьер, спектрометра ультразвуковых частот  $\Phi_2$  типа СУЧ, используемого в качестве  $1/2$ -октавных фильтров, двухлучевого осциллографа ОС типа ДЭСО-1, потенциометра  $П$  фирмы «Радиометр» с плавной настройкой и отсчетом в децибелах и звукового генератора опорного сигнала  $ЗГ_2$  типа 1014 фирмы Брюль и Кьер.

#### Аппаратура для измерений на полосах белого шума

Использовался прибор типа калибратора УД (рис. 3), состоящий из генератора синусоидального напряжения  $ЗГ$  на диапазон частот 10—100 кГц, генератора напряжения белого шума  $ШГ$  на тот же диапазон частот и селектирующего устройства  $\Phi_1$  с плавно перемещаемой по частотному диапазону полосой пропускания шириной 1 и 3 кГц (гетеродинного типа). Прибор типа калибратора УД допускает измерение напряжения и тока через излучатель, а также измерение напряжения на приемнике.

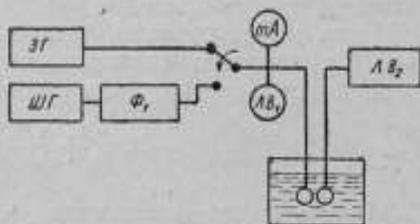


Рис. 3. Блок-схема установки для измерений на полосах шума

#### Прочая аппаратура

Использовались также самописец уровня типа 2304, спектрометр типа 2109, анализатор типа 2105, приставка для измерения времени реверберации типа 4407 и некоторые другие приборы.

Предварительно все измерительные тракты были откалиброваны в рабочем диапазоне частот.

#### МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В БАССЕЙНЕ

Звуковое поле в измерительном бассейне может быть рассмотрено с физической и метрологической точек зрения. В первом случае интересуются картиной распространения звуковых волн, их преломлением, интерференцией, собственными колебаниями объема воды [2, 3]. Изучают степень диффузности поля, как физической характеристики замкнутого помещения [4, 6], характеризуемой либо частотной иррегулярностью [7], либо диффузностью направлений [14], либо интервалом корреляции [1], либо степенью приближения полярной диаграммы направленного приемника к круговой в данном звуковом поле [5].

Однако знание перечисленных характеристик еще не дает информации о погрешности, с которой могут быть проведены измерения интересующей физической величины в данном звуковом поле. Нельзя также сказать, насколько пригодно данное звуковое поле для метрологических целей: сличений или абсолютной градуировки преобразователей, измерения их диаграмм направленности, к. п. д.

При рассмотрении звукового поля в бассейне с метрологической точки зрения представляет интерес величина отклонения характеристик данного поля от характеристик идеального поля, рекомендуемого для данного вида метрологических работ. Это отклонение связано с систематическими погрешностями измерений в данном звуковом поле.

Для одних метрологических работ рекомендуется поле плоских бегущих волн, для других — диффузное поле. Некоторым приближением к полю первого вида является сферическое звуковое поле точечного источника на достаточно большом удалении от излучателя.

Статистическая теория реверберации [11] дает следующее выражение для отношения плотностей энергии отраженной  $E_2$  и прямой  $E_1$  звуковых волн при работе точечного источника в помещении с площадью ограждений  $S$  м<sup>2</sup> и средним коэффициентом поглощения  $\alpha$ :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{16\pi r^2}{S\alpha}, \quad (1)$$

где  $r$  — расстояние от источника до точки измерения, м.

Если отраженные волны поступают в точку измерения в фазе с прямой волной, имеет место увеличение звукового давления, если же в противофазе — уменьшение.

Пусть на расстоянии  $r_0$  от источника плотность звуковой энергии равна  $E_0$ ; при увеличении расстояния уровень звукового давления будет уменьшаться в соответствии с уравнением:

$$L(r) = 10 \lg \frac{E_1 + E_2}{E_0} = 10 \lg \frac{r_0}{r} \left( 1 + \frac{16\pi r^2}{S\alpha} \right). \quad (2)$$

Максимальное отклонение уровня звукового давления от закона «обратной пропорциональности» ( $1/r$ ), характеризующего поле бегущих волн, может быть вычислено из уравнения:

$$\pm \Delta L = 10 \lg \frac{E_1 + E_2}{E_1} = 10 \lg \left( 1 + \frac{16\pi r^2}{S\alpha} \right). \quad (3)$$

Переход от поля бегущих волн к диффузному происходит в области так называемого граничного радиуса на расстоянии от излучателя  $h_0$ , где  $E_1 = E_2$ , т. е. уровень плотности энергии в этой точке на 3 дБ выше, чем в диффузном поле.

Очевидно,  $h_0$  может быть выражено формулой:

$$h_0 = \left( \frac{A}{16\pi} \right)^{1/2} = 1,05 \sqrt{\frac{V}{cT}}. \quad (4)$$

где

- $V$  — объем бассейна, м<sup>3</sup>;
- $c = 1440$  м/сек — скорость звука в воде;
- $T$  — время реверберации, сек;
- $A = \alpha S$  — эквивалентное поглощение, м<sup>2</sup>.

Эквивалентное поглощение  $A$  складывается из поглощения на поверхностях ограждений и поглощения в воде. Формула Сэбина для бассейна с водой имеет вид:

$$T = \frac{6 \ln 10 \cdot 4V}{cA} = 0,038 \frac{V}{A}. \quad (5)$$

По аналогии с архитектурной акустикой бассейн можно охарактеризовать постоянной помещения:

$$R = \frac{\alpha S}{1 - \alpha}, \quad (6)$$

а рассматривая его как акустический резонатор — добротностью:

$$Q = \frac{\pi}{3 \ln 10} fT = 0,454 fT. \quad (7)$$

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования звукового поля проводились при импульсном и непрерывном режимах работы излучателя, при использовании синусои-

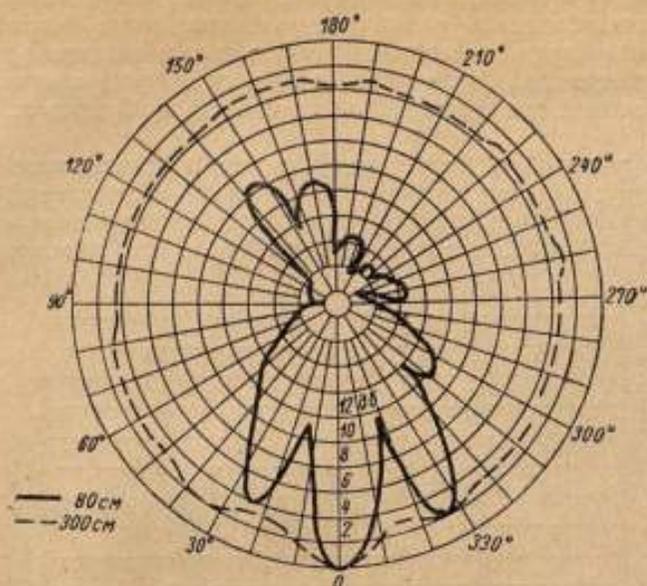


Рис. 4. Диаграмма направленности пластинки из керамики титаната бария:

— диаграмма, измеренная в свободном поле;  
 - - - диаграмма, измеренная в диффузном поле

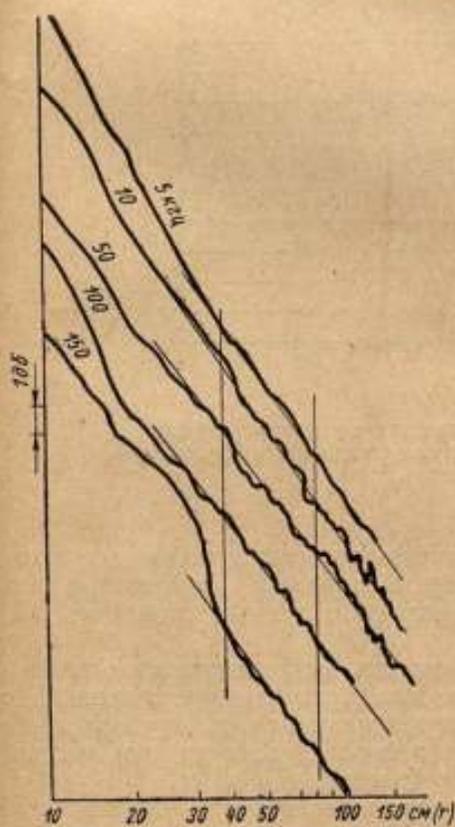


Рис. 5. Спад уровня звукового давления с увеличением расстояния от излучателя. Измерения в прямом импульсе

дальнего сигнала и полос белого шума. В качестве излучателя и приемника использовались радиально-поляризованные шарики из керамики титаната бария диаметром 20 мм, а также пластины диаметром 70 мм. При измерениях излучатель и приемник устанавливались на средней продольной оси бассейна на глубине 3 м, близко от середины бассейна.

В случае расстояния между излучателем и приемником до 1 м и при достаточно коротком импульсе на экране осциллографа можно было видеть прямой принятый импульс, который превышал наибольшее по интенсивности отражение примерно в 10 раз. При расстоянии ~3 м

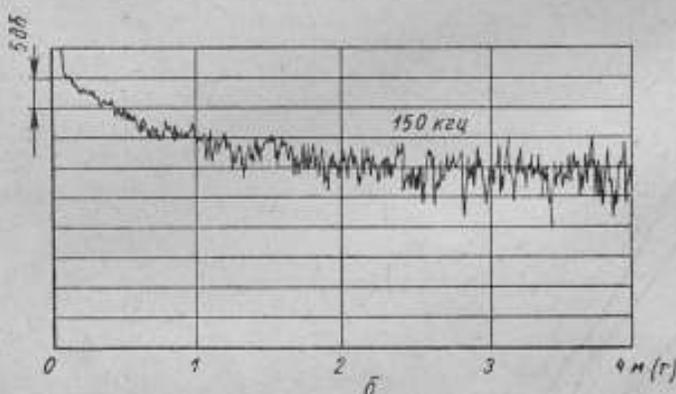
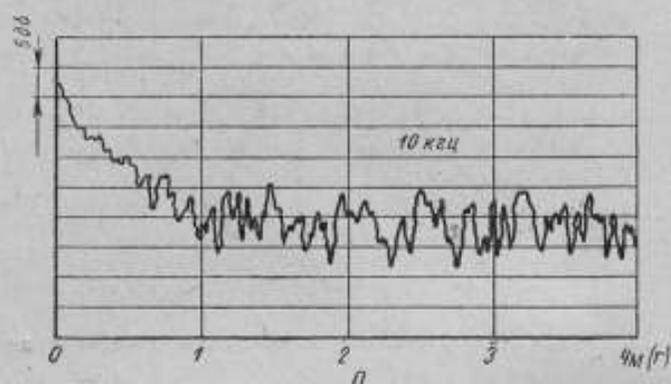


Рис. 6. Спад уровня звукового давления с увеличением расстояния от излучателя (измерения в синусоидальном непрерывном режиме)

принятый прямой импульс по величине мало отличался от импульсов отраженных, которые имели нерегулярный характер. Отраженные сигналы на таком расстоянии уже соизмеримы с прямым сигналом, т. е. поле близко к диффузному.

Аналогичные заключения можно сделать и по диаграммам направленности (рис. 4) для приемной пластинки. При удалении пластинки от излучателя с 80 до 300 см диаграмма приближается к круговой. На расстоянии 300 см звуковое поле для данной пластинки на частоте 50 кГц можно считать практически диффузным.

Изменение уровня звукового давления в зависимости от расстояния до излучателя при измерении прямого импульса представлено на рис. 5. На расстоянии от 40 до 100 см отклонение от закона  $1/r$  не превышает 1 дБ.

Аналогичные измерения при непрерывном синусоидальном сигнале представлены кривыми на рис. 6а и б и для полос белого шума шириной 3 кГц на рис. 7а и б.

Для синусоидального сигнала неравномерность кривых значительно больше, чем для полос шума. Это объясняется большей степенью когерентности отраженных волн в первом случае.

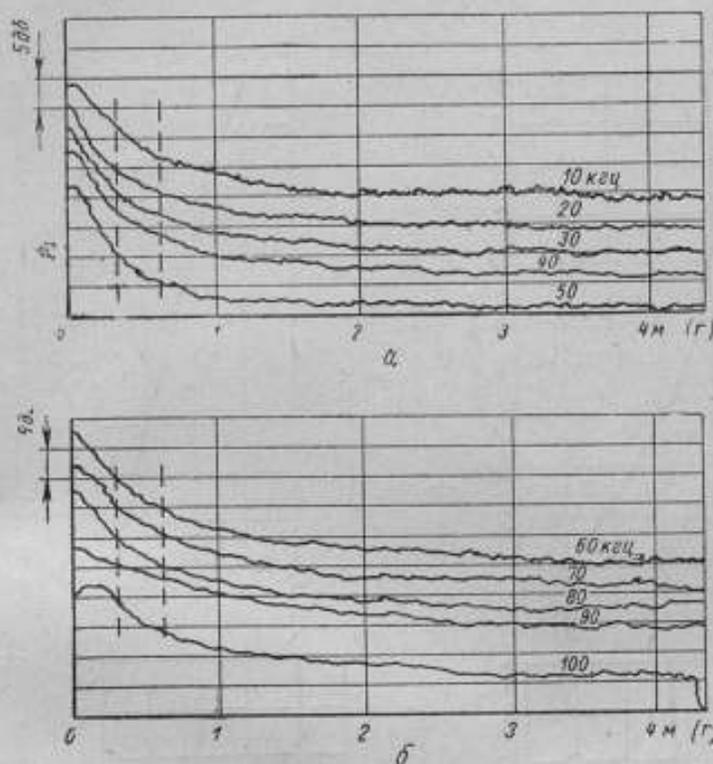


Рис. 7. Спад уровня звукового давления с увеличением расстояния от излучателя (измерения на полосах шума шириной 3 кГц)

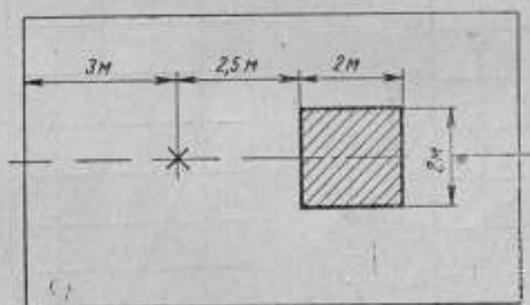


Рис. 8. Область диффузного поля в гидроакустическом бассейне

По кривым на рис. 7 видно, что закон  $1/r$  удовлетворяется с погрешностью 1 дБ для расстояний от излучателя  $\sim 30-60$  см (между пунктирными линиями) за исключением резонансной частоты излучателя  $\sim 90$  кГц. Можно также определить экспериментальное значение граничного радиуса  $R_0$ , которое в бассейне ВНИИФТРИ оказалось равным  $\sim 1$  м.

По кривым на рис. 7 замечаем, что на расстоянии  $\sim 2,5-3,5$  м от излучателя звуковое давление примерно постоянно. На рис. 8 показана

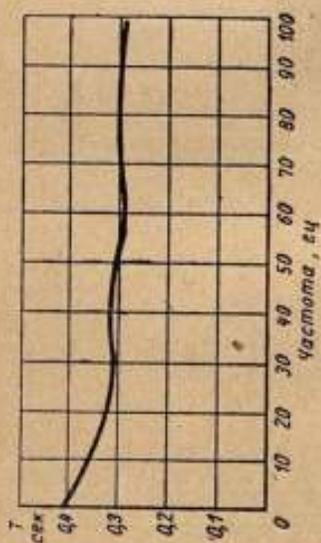


Рис. 9. Частотная характеристика предельной реверберации бассейна

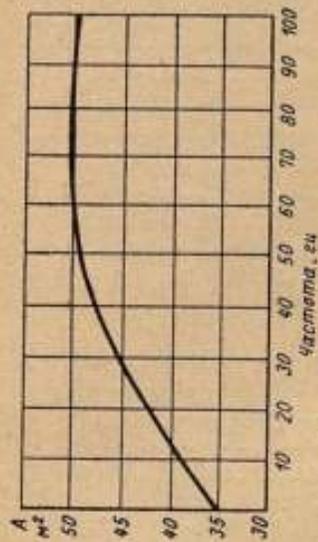


Рис. 10. Частотная характеристика эквивалентного поглощения бассейна

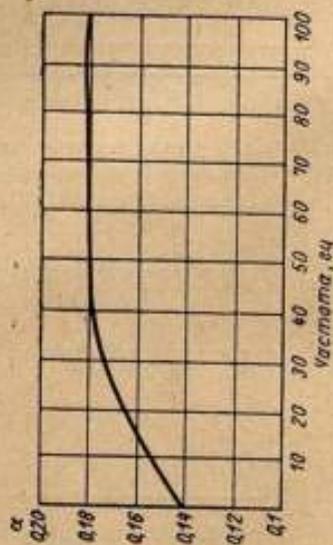


Рис. 11. Частотная характеристика среднего коэф. финесности бассейна

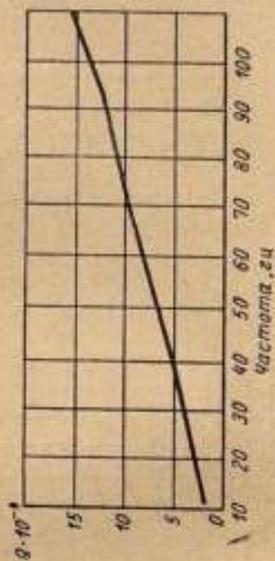


Рис. 12. Частотная характеристика добротности бассейна

область бассейна в плане, в которой измеренное максимальное отклонение уровня звукового давления от среднего значения не превышает  $\pm 1$  дБ. При измерениях приемник помещался в различные точки заштрихованной поверхности через каждые 10 см в направлении длины и ширины бассейна. Крестиком обозначено положение излучателя (шарика). По глубине бассейна указанная область распространяется на  $\pm 1$  м от средней продольной оси.

Можно считать, что эта область вполне пригодна для использования в метрологических целях в качестве диффузного поля. Однако она пригодна для испытаний лишь тех излучателей и приемников, диаграмма направленности которых, определенная в этом поле, отличается от круговой не более чем на величину максимально допустимой погрешности измерений.

Частотная характеристика времени реверберации, измеренного при помещении приемника в область диффузного поля, представлена на рис. 9. Соответственно на рис. 10, 11 и 12 даны характеристики эквивалентного поглощения  $A$ , коэффициента поглощения  $\alpha$  и добротности  $Q$ .

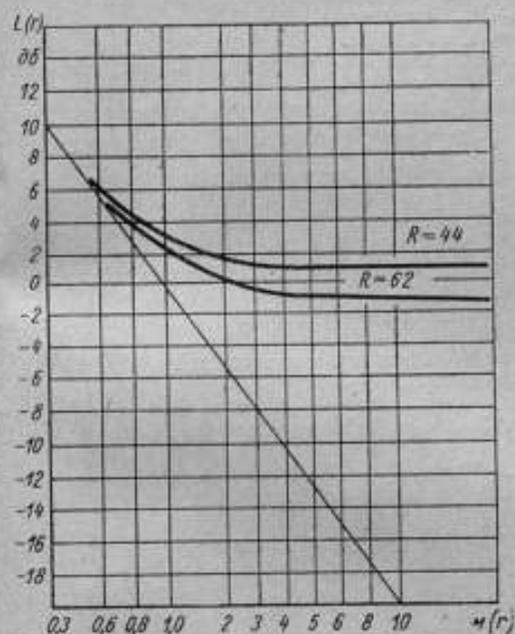


Рис. 13. Расчетная зависимость спада уровня звукового давления с увеличением расстояния от излучателя для граничных частот диапазона

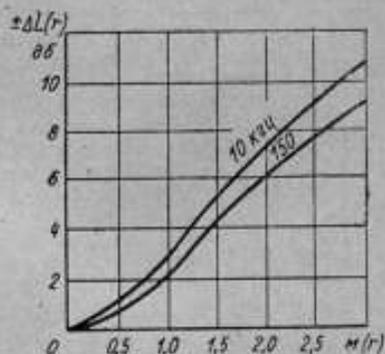


Рис. 14. Расчетная зависимость максимального отклонения в уровне звукового давления от закона  $1/r$  для граничных частот диапазона

На рис. 13 представлена расчетная зависимость  $L(r)$  для двух значений постоянной помещения, соответствующих граничным частотам исследованного диапазона 10 кГц ( $R=44$ ) и 150 кГц ( $R=62$ ). Прямая линия соответствует закону  $1/r$ . По кривым рис. 13 можно сделать вывод, что бассейн в акустическом смысле соответствует полуреверберационному помещению. Величина граничного радиуса по рис. 13 примерно соответствует результатам измерений, представленным на рис. 7.

Пользуясь уравнением (3), а также экспериментальными значениями  $\alpha$ , мы получили представленные на рис. 14 зависимости  $\pm \Delta L(r)$  для граничных частот диапазона 10 кГц (верхняя кривая) и 150 кГц (нижняя кривая). Кривые для промежуточных частот располагаются между представленными. Полученные кривые хорошо согласуются с экспериментально полученными значениями отклонений от закона  $1/r$  на рис. 7а и б.

## Выводы

1. В незаглушенном бассейне ВНИИФТРИ можно проводить измерения в непрерывном режиме как в области свободного, так и в области диффузного звуковых полей. Эти измерения могут проводиться с использованием полос белого шума шириной 1—3 кГц в диапазоне частот 10—150 кГц (и возможно выше).

2. Точность импульсных измерений в бассейне, по-видимому, ограничивается не столько неравномерностью звукового поля, сколько нестабильностью электрического тракта. В нашем случае суммарная неравномерность поля и нестабильность тракта не превышала 1 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гершман С. Г. Коэффициент корреляции как критерий акустического качества закрытого помещения, Ж. техн. физ., т. 21, 1951, стр. 1492—1496.
2. Морз. Колебания и звук, М.—Л., Гостехиздат, 1949.
3. Скучник. Основы акустики, ч. 1, ИЛ, 1958.
4. Фурдуев В. В. Обзор методов оценки и измерения диффузности звукового поля, Акустический журнал, т. 1, вып. 4, 1955, стр. 301—314.
5. Фурдуев В. В. Чен-Тун. Измерение диффузности звукового поля в помещениях методом направленного микрофона, Акустический журнал, т. 5, вып. 1, 1960, стр. 107—115.
6. Bolt R. H. Normal frequency spacing of frequency irregularity in rooms, Acustica, 4, 1954, p. 21—25.
7. Brüel P. V. Automatic recording of frequency irregularity in rooms, Akust. Beih., 2, 1953, p. 291—302.
8. Diestel H. G. Absolutbestimmung des Übertragungsfaktors von Mikrofonen im diffusen Schallfeld, Akust. Beih., № 1, 1960, S. 277—280.
9. Diestel H. G. Reciprocity calibration of Microphones in a diffuse sound field, J. Acoust. Soc. America, № 4, 31, 1961, p. 514—518.
10. Haga S. The water pool for underwater sound measurement at Hitachi, Ltd. Hitachi hyoron [Хитати хёрон], № 3, 42, 1960, p. 367—372.
11. Meyer E., Buchmann G. und Schöchl A. Eine neue Schallschlu-ckenordnung hoher Wirksamkeit und der Bau eines schallgedämpften Raumes, Akust. Ztschr., 5, 1940, S. 352—364.
12. Meyer E., Helberg H., Vogel S. Hallraummeßtechnik, und Bau eines großen Hallraumes für akustische und elektromagnetische Wellen, Z. für Angew. Phys., 8, 1960, S. 1213.
13. Meyer E., Schilz W., Tamm K. Über den Bau eines reflexionsfreien Wasserschallmessbeckens, Akust. Beih., № 1, 1960, S. 281—287.
14. Thile R. Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen, Akust. Beih., 2, 1953, S. 291—302.
15. Wallpöcel D., McMorrow E. W. Sonar transducer pulse calibration system, J. Acoust. Soc. America, № 1, 33, 1961, p. 75—84.

Статья поступила в июне 1962 г.

Л. П. Блинова

ВНИИМ

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ВОДЕ

*Описана разработанная во ВНИИМ установка для измерения скорости звука в воде, действующая на основе интерференции волн между кварцевым излучателем и отражателем. Дан анализ погрешностей измерения; погрешность абсолютного значения скорости звука равна 0,02%. Для исключения систематической погрешности применен второй, независимый оптический метод дифракционных спектров. Однако его погрешности достигают 0,8%. Измерения проводились на 0,5; 1,5 и 2 Мгц. В дальнейшем предполагается повысить частоты измерений до 15 Мгц.*

Разработанная во ВНИИМ установка для измерения скорости распространения звука в воде предназначена как для определения абсолютного значения скорости, так и для поверки (градуировки) раз-

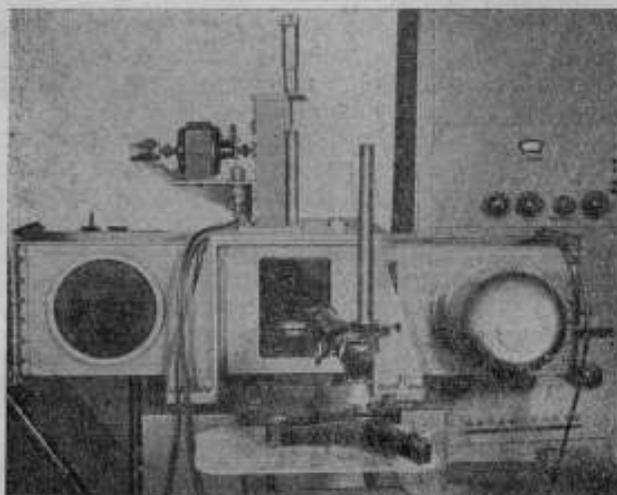


Рис. 1. Внешний вид установки для измерения скорости распространения звуков в воде

бных приборов — измерителей скорости звука разных типов, выпускаемых отечественной промышленностью. Определение скорости распространения звука проводится на установке простым и надежным интерферометрическим методом путем измерения длины звуковой волны при заданной частоте возбуждения излучателя.

Внешний вид установки представлен на рис. 1. Установка состоит из бачка с водой емкостью 80 л и акустического интерферометра, основ-

ные элементы которого — кварцевый излучатель, крепящийся в специальном гнезде его основания, и кварцевый звукоприемник, играющий роль отражателя. Звукоприемник перемещается в вертикальном направлении на расстоянии до 100 мм микрометрическим винтом, снабженным отсчетным лимбом. Возможно также перемещение звукоприемника с помощью мотора. Интерферометр установлен на юстировочных винтах, с помощью которых достигается строгая параллельность поверхностей излучателя и звукоприемника. В качестве излучателей применены резонансные кварцевые пластины среза  $x$  диаметром 60 и 70 мм, толщиной 2,88 и 5,76 мм. Эти излучатели позволяют проводить измерения на частотах  $0,5 \cdot 10^6$  и  $10^6$  гц и на нечетных гармониках этих частот.

Звукоприемником служит кварцевая пластина среза  $x$  диаметром 20 мм и толщиной 2 мм, вмонтированная в стальной кожух диаметром 70 мм и изолированная от воды слоем эпоксидной смолы.

Действие прибора основано на изменении реакции, испытываемой излучателем в поле стоячих ультразвуковых волн в интерферометре при изменении расстояния между поверхностями излучающего кварца и звукоприемника. Интерферометр настраивается в резонанс перемещением приемника в поле плоских стоячих волн. Резонансы появляются в виде максимумов напряжения на выходе приемника и фиксируются по ламповому вольтметру, подключенному к выходу звукоприемника. В установке по возможности полно исключены систематические погрешности. Для этого были учтены следующие источники систематических погрешностей:

1. Расстояния между последовательными положениями звукоприемника, соответствующими наибольшей (или наименьшей) реакции на излучатель, могут оцениваться неправильно, если размеры излучающей или отражающей поверхности недостаточно велики по сравнению с длиной ультразвуковой волны. Для устранения этой погрешности в установке применяются преобразователи, геометрические размеры которых в 40 раз превышают длину волны на частоте  $10^6$  гц. Это исключает возможность появления на них дифракции и связанную с ней ошибку в измерении длины звуковой волны.

2. При недостаточно строгой параллельности поверхностей излучателя и звукоприемника могут возникнуть двойные максимумы-сателлиты. В установке эти дополнительные максимумы уничтожаются тщательной юстировкой. Отсутствие сателлитов проявляется в том, что при настройке интерферометра в резонанс наблюдается резкое возрастание напряжения на выходе приемного кварца.

3. Сателлиты — поперечные звуковые волны, распространяющиеся в направлении, перпендикулярном к оси интерферометра, могут возникнуть, когда излучатель совершает помимо поршневых еще и поперечные колебания. Отсутствие погрешности из-за неоднородного колебания кварцевых пластин по поверхности было показано путем определения абсолютного значения скорости распространения звука на резонансных частотах двух кварцевых излучателей. Результаты этих измерений совпадали в пределах погрешности установки.

При измерении абсолютного значения скорости звука методом акустического интерферометра длина звуковой волны определяется из соотношения:

$$\lambda = \frac{2l}{n},$$

где  $l$  — расстояние между двумя максимумами, отстоящими друг от друга на число полуволн, равное  $n$ . Зная длину волны и частоту возбуждения кварца  $f$ , по соотношению  $c = \lambda f$  однозначно вычисляют скорость звука.

В качестве задающего генератора в установке применяется генератор стандартных сигналов с усилителем мощности, разработанным центральной лабораторией завода «Эталон». Постоянство частоты контролируется волюмометром типа 528. Ламповый вольтметр МВЛ-2М, подключенный на вход кварцевого звукоприемника, служит индикатором настройки интерферометра в резонанс.

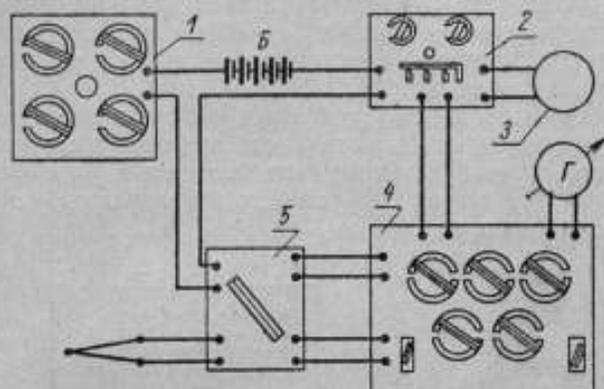


Рис. 2. Схема исследования температурного поля интерферометра:

1—сопротивление регулировочное СР-55; 2—дополнительное устройство; 3—нормальный элемент; 4—потенциометр КР-48; 5—переключатель масляный двойной ПМД-55

Для уменьшения погрешности при измерении длины волны звука определялось расстояние между максимумами, отстоящими друг от друга на 50 полуволн, а не между двумя последовательными максимумами, соответствующими настройке прибора в резонанс.

Исследование температурного поля в интерферометре проводилось дифференциальной терморпарой по схеме, приведенной на рис. 2. Изме-

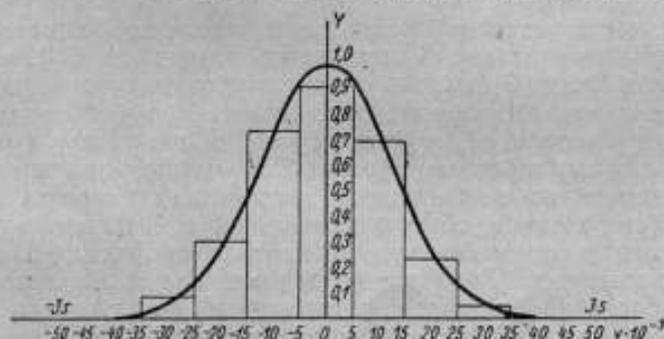


Рис. 3. Гистограмма распределения случайных погрешностей

рения показали, что температура воды в интерферометре после полуторачасовой работы установки при электрическом напряжении в 800 в, подводимом к излучателю, остается постоянной в пределах погрешности измерений (0,05 °C). Этот результат позволил обойтись без специального термостатирования.

Средняя квадратическая погрешность ряда измерений абсолютного значения скорости распространения звука в воде методом акустического интерферометра составляет 0,02%. Случайные погрешности измерения подчиняются нормальному закону распределения. На рис. 3 приведена гистограмма распределения случайных погрешностей при измерении

скорости звука интерферометрическим методом, совмещенная с графиком нормальной плотности вероятности. Из рисунка видно, что эмпирическое распределение хорошо согласуется с теоретическим распределением Гаусса. Этот вывод подтверждается и специальными критериями — критерием моментов и критерием соответствия Пирсона. Коэффициент асимметрии эмпирического распределения равен 0,01, эксцесс равен —0,95. Следовательно критерий моментов не противоречит гипотезе нормального распределения случайных погрешностей. При уровне значимости 0,05 критерий соответствия также не исключает гипотезу нормального распределения.

С целью выявления неисключенных остатков систематических погрешностей в качестве вспомогательного метода измерения скорости распространения звука был применен полностью независимый от интерферометрического метод дифракционных спектров (метод дифракции света на ультразвуке).

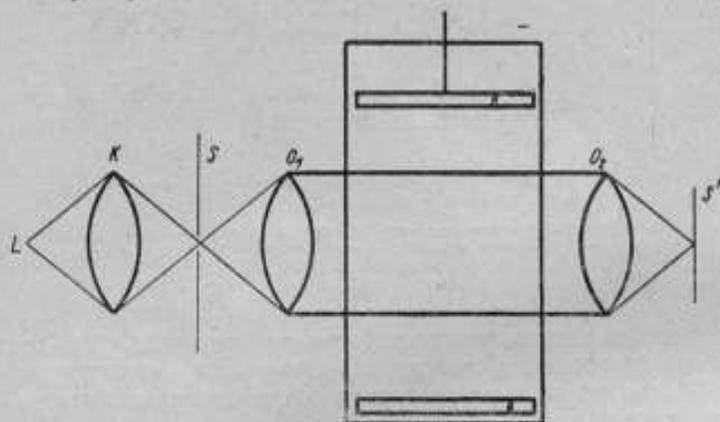


Рис. 4. Схема метода дифракционных спектров

Схематически установка оптического метода изображена на рис. 4. Щель  $S$  через конденсатор  $K$  освещается источником  $L$ . Свет от щели, проходя через линзу  $O_1$ , параллельным пучком падает на ультразвуковое поле, создаваемое кварцевым излучателем  $Q$  в направлении к приемнику-отражателю  $R$ , перпендикулярном световому пучку. Линза дает изображение щели на экране  $S'$ . В монохроматическом свете рядом с центральным изображением щели видны дифракционные спектры, появление которых объясняется наличием периодических изменений плотности и, следовательно, показателя преломления света, вызванных ультразвуком. Зная длину световой волны  $\lambda$ , частоту ультразвуковых колебаний  $f$  и измеряя расстояние  $d_k$  между дифракционными максимумами  $k$ -го и нулевого порядков, а также расстояние  $F$ , равное в случае дифракции параллельного пучка световых лучей на ультразвуковой волне фокусному расстоянию объектива зрительной трубы, можно определить скорость распространения звука по формуле:

$$c = \frac{kFf\lambda}{d_k}$$

Средняя квадратическая погрешность измерения скорости звука методом дифракционных спектров на нашей установке составила 0,8%, т. е. она значительно выше погрешности интерферометрического метода. В методе дифракционных спектров измерение длины ультразвуковой волны сводится к измерению расстояний дифракционных максимумов от центрального изображения щели, а эти расстояния тем больше, чем

выше частота возбуждения кварца. Излучающий кварц в описываемой установке возбуждается на третьей гармонике — при 1,5 Мгц (мощный усилитель в комплекте с которым работает задающий генератор, рассчитан на работу до 2 Мгц). В дальнейшем предусмотрено расширение частотного диапазона измерений до 15 Мгц, что позволит значительно повысить точность измерения скорости распространения звука методом дифракционных спектров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике, ИЛ, М., 1957.
2. Величкина Т. С. и Фабелинский И. Л. Метод измерения скорости распространения ультразвуковых волн в жидкости, ДАН СССР, 75, № 2, 1950, стр. 177—180.
3. Ислев А. А., Михайлов И. Г., Химунин А. С. Об одном видоизменении схемы ультразвукового интерферометра, Акустический журнал т. IV, вып. 4, 1958, стр. 363—364.
4. Кислов В. П. Простой ультразвуковой интерферометр. Труды комиссии по акустике, сб. 7, 1953, стр. 68—73.
5. Красильников В. А. Звуковые волны, Гос. изд-во технико-теоретической литературы, М.—Л., 1951.
6. Краснушкин П. Е. Теория ультразвукового интерферометра, ДАН СССР, 27, № 3, 1940, стр. 213—216.
7. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применения в ультразвуке, ИЛ, М., 1952.
8. Русаков И. Г. Применение ультразвука в технике измерений, Стандартгиз, М., 1958.
9. Скучик Е. Основы акустики, т. 2, ИЛ, М., 1959.
10. Соловьев В. А. К теории ультразвукового интерферометра, Акустический журнал, т. II, вып. 3, 1956, стр. 285—290.

Статья поступила в феврале 1962 г.

## МЕТОДИКА СЛИЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ В ПОЛЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

*Разработаны способы, с помощью которых в поле стоячей волны методом сличения с образцовым можно градуировать гидроакустические приемники по полю бегущей волны, а также определять диаграммы направленности приемников. При этом предполагается, что отраженная волна направлена противоположно основной волне. Приведен способ определения коэффициента стоячей волны (к. с. в.) направленным приемником, диаграмма направленности которого неизвестна. Показаны условия, при которых можно пренебрегать влиянием отраженной волны на результаты сличений и определений диаграммы направленности. Описываются проведенные измерения.*

Сличение направленных приемников акустического излучения с образцовым и определение их диаграмм направленности, строго говоря, требуют создания идеального поля бегущей волны, в котором нет отраженных волн. Однако практически даже в хорошо заглушенных измерительных камерах возникают отражения, искажающие результаты измерений. В ряде случаев, особенно на ультразвуковых частотах, первое отражение преобладает по амплитуде над остальными и может явиться основным препятствием при градуировке приемников и определении их диаграмм направленности, искажающим результаты этих измерений.

Как известно, устранение отраженных акустических волн — сложная проблема. Гораздо легче, особенно на ультразвуковых частотах, создать такую систему, в которой основная и отраженные в обратном направлении волны намного превышают по амплитуде волны, отраженные в остальных направлениях. Задачей настоящей работы является изыскание возможностей градуировки приемников методом сличения их с образцовым, а также определения их диаграмм направленности в таких акустических системах.

Отраженные волны могут быть источником систематической погрешности измерений. В работе рассматриваются несколько вариантов методики измерений, при которых путем расчета или специального подбора ориентаций приемников устраняется систематическая погрешность, связанная с отраженной волной, идущей в обратном направлении по отношению к основной волне.

Погрешности, которые возникают при сличении приемников в поле с отражениями в разных направлениях, исследуются в работе В. Л. Власова [1]. Там же показано, что применение методики, устраняющей систематическую погрешность, связанную с отраженной в обратном направлении волной, приводит также к уменьшению погрешности, связанной с отраженными волнами других направлений.

В последующих расчетах рассматриваются только две идущие в противоположные стороны волны, но их можно трактовать как результат суперпозиции ряда отражений в одном направлении, поэтому все полученные выводы можно относить к случаям многократных отражений вдоль одного направления.

### К определению термина «Чувствительность приемника»

Выходное напряжение приемника может иметь фазовый сдвиг относительно сигнала в заданной точке поля, связанный с геометрическими или структурными особенностями приемников. Неточности установки чувствительного элемента приемников относительно вертикальной оси вращения или относительно шкал, связанных с координатным устройством, также проявляются в виде фазового сдвига. Для описания фазовых сдвигов рационально ввести комплексную чувствительность приемника:

$$\bar{E} = Ee^{i\psi},$$

где  $E$  — амплитуда чувствительности;

$\psi$  — фазовый сдвиг.

Очевидно, что при установке в одну и ту же точку поля разные приемники могут давать отличающиеся по фазе выходные напряжения; фаза выходного напряжения может зависеть от угла его поворота по отношению к направлению падающей (и отраженной) волны; отсчеты координат пучности, узла или какой-нибудь определенной фазы стоячей волны из-за различия в фазовых сдвигах разных приемников могут не совпадать и т. д.

Обычно под чувствительностью приемника понимается амплитуда его чувствительности  $E = \frac{dV}{d\xi}$  (где  $V$  — выходное напряжение,  $\xi$  — амплитуда принимаемого сигнала), а диаграмма направленности определяется как отношение амплитуд чувствительности приемника при различных углах его поворота относительно вертикальной оси к амплитуде при повороте, принятом за начало отсчета углов. Целью настоящей работы является определение чувствительности приемников и их диаграмм направленности именно в этом смысле, но для получения рабочих формул и условий их применения в расчетах необходимо учитывать фазовые сдвиги. Это делается путем введения комплексной чувствительности.

### Определение чувствительности акустических приемников и их диаграмм направленности в поле стоячих волн методом установки в пучность и в узел

Пусть звуковая волна от излучателя распространяется в направлении  $-x$ , а отраженная волна — в направлении  $+x$ . Поле при этом можно описать выражением:

$$\xi_1 e^{i(\omega t + kx)} + \xi_2 e^{i(\omega t - kx)} = \bar{\xi}_1 e^{i\omega t} + \bar{\xi}_2 e^{i\omega t},$$

где  $\xi_1$  — амплитуда прямой волны;

$\xi_2$  — амплитуда отраженной волны;

$k = \frac{\omega}{c}$  — волновое число звука.

Чертой сверху будем отмечать комплексные величины.

$$\bar{\xi}_1 = \xi_1 e^{ikx},$$

$$\bar{\xi}_2 = \xi_2 e^{-ikx}.$$

Зададим жестко связанные с приемниками системы отсчета углов поворота относительно вертикальной оси и примем за начало отсчета этих углов определенное направление, для которого будем считать  $\varphi$  равным нулю. При установке приемника под углом  $\varphi$  направление, обозначенное углом  $\varphi$ , должно совпадать с положительным направлением оси  $x$ .

Введем следующие обозначения:

$\varphi$  — угол поворота сличаемого приемника,  $\varphi_0$  — образцового;

$\bar{V} = Ve^{i\varphi}$  — выходное напряжение сличаемого приемника при установке его под углом  $\varphi$ ;

$\bar{V}_0 = V_0 e^{i\varphi_0}$  — выходное напряжение образцового приемника при установке его под углом  $\varphi_0$ ;

$\bar{E} = E e^{i\varphi}$  — чувствительность сличаемого приемника в направлении угла  $\varphi$ ;

$\bar{E}_0 = E_0 e^{i\varphi_0}$  — чувствительность образцового приемника в направлении угла  $\varphi_0$ .

Все величины, соответствующие установке приемников под углами  $\varphi + \pi$  и  $\varphi_0 + \pi$  или относящиеся к этим углам, будем обозначать штрихом.

Составим сокращенные на  $e^{i\omega t}$  уравнения для выходных напряжений сличаемого и образцового приемников, поочередно устанавливаемых в пучность и в узел стоячей волны\*. В случае установки в пучность, получаем

$$\left. \begin{aligned} V^{пу} &= E\tilde{\xi}_1 + E'\tilde{\xi}_2, \\ V_0^{пу} &= E_0\tilde{\xi}_1 + E_0'\tilde{\xi}_2, \\ \text{а в узле будет} \\ V^{уз} &= E\tilde{\xi}_1 - E'\tilde{\xi}_2, \\ V_0^{уз} &= E_0\tilde{\xi}_1 - E_0'\tilde{\xi}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из этой системы легко получается выражение для отношения чувствительностей, т. е. формула для сличений в стоячей волне:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V^{пу} + V^{уз}}{V_0^{пу} + V_0^{уз}}. \quad (2)$$

Формулу (2) можно написать и в ином виде:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V^{пу}}{V_0^{пу}} \cdot A, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{1 + \frac{V^{уз}}{V^{пу}}}{1 + \frac{V_0^{уз}}{V_0^{пу}}}. \quad (3')$$

$A$  можно рассматривать как поправочный множитель для устранения систематической погрешности, возникающей от отраженной волны. Найдем условия, когда его приближенно можно считать равным единице. Для этого запишем выражение (3') так:

$$\frac{V^{уз}}{V^{пу}} = (A - 1) + A \frac{V_0^{уз}}{V_0^{пу}}. \quad (4)$$

\* Так как чувствительности приемников могут быть комплексными, координаты их при фиксировании положений пучностей и узлов могут различаться. Здесь под установкой в пучность или в узел имеется в виду установка приемников в места достижения максимального и минимального выходного напряжения. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены далее.

Задаваясь максимально допустимой систематической погрешностью (модуль ее выражается в виде  $|A-1|$ ) и измерив или задав отношение напряжений образцового приемника в узле и в пучности  $\frac{V_0^{y3}}{V_0^{nyч}}$ , можно по формуле (4) найти верхнюю и нижнюю границы значений отношения  $\frac{V^{y3}}{V^{nyч}}$ , для которых не потребуется введения поправки\*.

Пример.

Пусть  $\frac{V_0^{y3}}{V_0^{nyч}} = 0,8$ ; допустимая систематическая погрешность — 3%;

$$A_{\max} = 1,03; \quad A_{\min} = 0,97.$$

Граница максимального значения

$$\left(\frac{V^{y3}}{V^{nyч}}\right)_{\max} = 0,03 + 1,03 \cdot 0,8 = 0,854.$$

Граница минимального значения

$$\left(\frac{V^{y3}}{V^{nyч}}\right)_{\min} = -0,03 + 0,97 \cdot 0,8 = 0,746.$$

Если к. с. в. поля близок к единице, то пределы отношений  $\frac{V^{y3}}{V^{nyч}}$  могут оказаться достаточно широкими для того, чтобы проводить сличения в пучности волны, не пользуясь поправками. Уравнение (4) служит критерием для оценки таких условий.

Перейдем к формуле для определения диаграммы направленности приемника. В этом случае в пучность и узел стоячей волны устанавливается лишь один исследуемый приемник.

Будем считать, что символом  $\varphi_0$  обозначен исходный угол, и диаграмма направленности определяется как отношение чувствительностей  $E$  в направлении углов  $\varphi$  к чувствительности  $E_0$  в направлении угла  $\varphi_0$ . Если понимать под  $E_0$  и  $V_0$  величины, соответствующие углу  $\varphi_0$ , то уравнения для выходных напряжений приемника, установленного под углами  $\varphi$  и  $\varphi_0$ , будут иметь точно такой же вид, как уравнения (1). Так как выражения (2) и (3) — решения системы уравнений (1), то они же являются формулами и для определения диаграммы направленности.

Таким образом, сличение приемников сводится к поочередной установке их в пучность и в узел стоячей волны, измерению выходных напряжений и последующему расчету отношений чувствительностей по формуле (2) или (3). Определение точки диаграммы направленности приемника можно рассматривать как сличение чувствительностей одного и того же приемника при двух различных его ориентациях.

**Градуировка приемников сличением их с образцовым приемником способом поворота на  $180^\circ$**

Уравнения для выходных напряжений сличаемых приемников, сначала ориентированных под углом  $\varphi$  к направлению прихода прямой

\* То же самое легко сделать и для полученной из (2) формулы:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V^{y3}}{V_0^{y3}} A',$$

$$\text{где } A' = \frac{1 + \frac{V^{nyч}}{V^{y3}}}{1 + \frac{V^{nyч}}{V^{y3}}}.$$

волны, а потом повернутых на угол  $\pi$  (т. е. ориентированных под углом  $\varphi$  к направлению прихода отраженной волны), можно написать, сократив на  $e^{i\omega t}$ , следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{V} &= \bar{E} \bar{\xi}_1 + \bar{E}' \bar{\xi}_2, \\ \bar{V}_0 &= \bar{E}_0 \bar{\xi}_1 + \bar{E}'_0 \bar{\xi}_2, \\ \bar{V}' &= \bar{E}' \bar{\xi}_1 + \bar{E} \bar{\xi}_2, \\ \bar{V}'_0 &= \bar{E}'_0 \bar{\xi}_1 + \bar{E}_0 \bar{\xi}_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из этих уравнений можно найти отношение чувствительностей  $\frac{E}{E_0}$  сличаемого и образцового приемников, ориентированных под углами  $\varphi$  и  $\varphi_0$  к направлению прихода прямой волны. Запишем его в двух формах. В одной из них  $\frac{E}{E_0}$  выражается через выходные напряжения и к. с. в. (или через отношение амплитуд отраженной и прямой волн):

$$\frac{\bar{E}}{\bar{E}_0} = \frac{\bar{V} - \bar{V}'s}{\bar{V}_0 - \bar{V}'_0s}, \quad (6)$$

или, в иной записи,

$$\frac{E}{E_0} e^{i(\varphi - \varphi_0)} = \frac{V}{V_0} e^{i(\alpha - \alpha_0)} \cdot B, \quad (7)$$

$$\text{где } B = \frac{1 - \bar{\gamma}s}{1 - \bar{\gamma}_0s} = \frac{1 - \gamma \left( \frac{K-1}{K+1} \right) e^{i(\alpha_1 - \alpha - 2kx)}}{1 - \gamma_0 \left( \frac{K-1}{K+1} \right) e^{i(\alpha'_0 - \alpha_0 - 2kx_0)}}, \quad (7')$$

$$\bar{\gamma} = \frac{\bar{V}'}{\bar{V}},$$

$$\bar{\gamma}_0 = \frac{\bar{V}'_0}{\bar{V}_0},$$

$$\bar{s} = \frac{\bar{\xi}_2}{\bar{\xi}_1}.$$

$K$  — коэффициент стоячей волны,

$x$  — координата сличаемого приемника,  $x_0$  — образцового.

Пока будем считать  $x = x_0$ . Другая форма дает выражение  $\frac{E}{E_0}$  через выходные напряжения приемников и известное отношение чувствительностей образцового приемника  $\frac{E'_0}{E_0}$  в направлениях угла  $\varphi_0$  и  $\varphi_0 + \pi^*$ .

$$\frac{E}{E_0} e^{i(\varphi - \varphi_0)} = \frac{V}{V_0} e^{i(\alpha - \alpha_0)} \cdot C, \quad (8)$$

где

$$C = 1 - \frac{E'_0}{E_0} e^{i(\varphi'_0 - \varphi_0)} \frac{V V'_0 e^{i(\alpha + \alpha'_0)} - V' V_0 e^{i(\alpha' + \alpha_0)}}{V V_0 e^{i(\alpha + \alpha_0)} - V' V'_0 e^{i(\alpha' + \alpha'_0)}}, \quad (8')$$

или

$$C = 1 - \frac{\bar{E}'_0}{\bar{E}_0} \frac{\bar{\gamma}_0 - \bar{\gamma}}{1 - \bar{\gamma}_0 \bar{\gamma}}. \quad (8'')$$

\* На возможность использования для сличений двух чувствительностей образцового приемника указал И. Г. Русаков.

Проанализируем первую форму решения — выражение (7). Учет фазовых соотношений в (7) при измерениях требует сложной аппаратуры и не дает особых преимуществ. Измерения упрощаются в случае, когда справедливо соотношение

$$\alpha' - \alpha - 2kx = \alpha_0' - \alpha_0 - 2kx = 0 \quad (9)$$

или

$$\alpha' - \alpha - 2kx = \alpha_0' - \alpha_0 - 2kx = \pi. \quad (9')$$

При этих условиях отношения напряжений  $\bar{\gamma}$  и  $\bar{\gamma}_0$  становятся равными отношениям их модулей, а множитель становится действительным. Отсюда следует, что

$$\psi - \psi_0 = \alpha - \alpha_0. \quad (10)$$

Сократив на этом основании фазовые множители, преобразуем формулы (7):

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V}{V_0} B, \quad (11)$$

где

$$B = \frac{1 - \gamma_0^2}{1 - \gamma_0'^2} = \frac{1 - \gamma \left( \frac{K-1}{K+1} \right)}{1 - \gamma_0 \left( \frac{K-1}{K+1} \right)}. \quad (11')$$

Выражение (6) при этих условиях также запишется в действительных переменных

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V - V_0' s_0}{V_0 - V_0'^2 s_0}. \quad (12)$$

Так как при выполнении (9) отношения  $\gamma$  и  $\gamma_0$  с точностью до знака равны отношениям модулей напряжений, условие (9) можно считать выполненным при измерениях напряжений в узлах и пучностях стоячей волны. Это дает возможность осуществлять условие (9), варьируя координату  $x$  или  $x_0$ , т. е. устанавливая оба приемника в пучность или в узел стоячей волны\*\*.

При перемещениях приемника по оси  $x$  не должны меняться амплитуды звуковых волн  $\xi_1$  и  $\xi_2$ . Это накладывает ограничения на поле, в котором проводятся сличения. Изменения амплитуды сигнала в нем на протяжении одной длины волны должны быть малы, т. е.

$$\left| \frac{\partial \xi_1}{\partial x} \lambda \right| \ll \xi_1, \quad (13)$$

$$\left| \frac{\partial \xi_2}{\partial x} \lambda \right| \ll \xi_2,$$

где  $\lambda$  — длина волны.

Таким образом при сличениях приемники должны устанавливаться в одну и ту же пучность или в узел стоячей волны, выходные напряжения — измеряться при ориентациях  $\varphi$ ,  $\varphi_0$ ,  $\varphi + \pi$  и  $\varphi_0 + \pi$ , а получаемое отношение выходных напряжений  $\frac{V}{V_0}$ , согласно формуле (11), должно умножаться на величину  $B$ , играющую роль поправки.

\* Формулы (8') и (12) написаны для случая установки в пучность. Формулы для установки в узел будут отличаться от них лишь знаком «+» в числителе и знаменателе.

\*\* В [1] подробно показано, что с точки зрения уменьшения погрешностей, связанных с отраженными в произвольных направлениях волнами, приемники выгоднее устанавливать в пучность, а не в узел стоячей волны.

Если при каких-то ориентациях приемников имеет место соотношение:

$$\frac{\bar{V}'}{V} = \frac{V'_0}{V_0}, \quad (14)$$

$$(\text{т. е. } \bar{\gamma} = \gamma_0).$$

то множитель  $B$  становится равным единице, а формулы (7) переходят в формулу, применяемую при сличениях в поле чисто бегущей волны:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V}{V_0}. \quad (15)$$

Таким образом, если выбирать для сличений в поле стоячей волны такие ориентации приемников, что окажется выполненным условие (14), то отношение чувствительностей приемников можно измерять без вычисления поправки  $B$ , считая  $B$  равным единице\*.

Верхнюю и нижнюю границы значений  $\gamma$ , при которых систематическая погрешность не превышает заданную, если считать  $\gamma_0$  и  $s$  известными, можно найти, подобно тому, как это сделано выше, по формуле:

$$\gamma = \frac{1}{s} (1 - B) + B\gamma_0.$$

Перейдем к формуле (8). Из сравнения (7) и (8) видно, что

$$\bar{B} \equiv \bar{C}.$$

Аналогично предыдущему можно показать, что при установке приемников в пучность или узел стоячей волны формулы (8) и (8') переходят в

$$\frac{E}{E_0} = \frac{V}{V_0} C, \quad (17)$$

где

$$C = 1 - \frac{E'_0 V V'_0 - V' V_0}{E_0 V V'_0 - V' V'_0} = 1 - \frac{E'_0 \gamma_0 - \gamma}{E_0 (1 - \gamma_0 \gamma)}. \quad (17')$$

При соблюдении условий (9) и (10) формула (8) переходит в (15).

Если чувствительности приемников не комплексны (или  $\psi = \psi_0 = \psi'_0$ ) и если при этом приемники установлены в одну и ту же точку  $x = x_0$ , из условия (14) и выражений (7) и (8) вытекает:

$$\alpha \equiv \alpha_0 \equiv \alpha' \equiv \alpha'_0.$$

Отсюда следует, что приемники с некомплексными чувствительностями можно сличать, пользуясь формулой (15), не только при установке в пучность или узел стоячей волны, а в любой точке поля.

\* Принципиальная возможность сличения приемников при наличии отраженной волны с применением формулы (15) при такой специальной ориентации приемников, что соблюдается равенство

$$\frac{E'}{E} = \frac{E'_0}{E_0}, \quad (16)$$

была ранее указана В. Л. Власовым [1]. Однако для такого сличения надо было заранее знать диаграммы направленности приемников в отсутствии отраженных волн.

Можно показать, что из условия (14) с необходимостью вытекает условие (16). Выбор ориентаций приемников, при которых удовлетворяется условие (14), косвенно является способом нахождения нужных точек диаграмм направленности. Таким образом применение способа поворота на  $180^\circ$  обеспечивает практическую возможность сличения приемников с образцовым при наличии отраженной волны подбором ориентаций. Способ подбора ориентаций можно рассматривать и как частный случай способа поворота на  $180^\circ$ , вытекающий из формулы (7), когда выполняется условие (14).

Итак, градуировка приемников методом сличения с образцовым может осуществляться как с применением, так и без применения расчетной поправки. В обоих случаях путем регулировки положения приемника по оси  $x$  следует обеспечить необходимые фазовые условия. Расчет поправки следует производить по формуле (11') или (17'), причем множитель  $C$  удобно рассчитывать с помощью специальной номограммы, описание которой приведено в приложении. Построив график  $C$  как функцию  $y$  при параметре  $\gamma_0$  (см. приложение), легко увидеть, что при определении множителя  $C$  в случае, когда  $y$  или  $\gamma_0$  близки к единице, могут возникнуть значительные погрешности, связанные с неточностью определения  $y$  и  $\gamma_0$ . Поэтому применение формулы (17') с множителем  $C$  можно рекомендовать только для случаев, когда либо  $\gamma_0 \ll 1$ , либо  $y$  в достаточной степени отличается от единицы.

Если помимо фазовых условий в процессе сличений обеспечить одинаковость отношений выходных напряжений, соответствующих ориентациям в направлениях прихода прямой волны и в направлениях прихода отраженной волны,  $B$  и  $C$  становится равными единице, т. е. систематическая ошибка устраняется без введения расчетной поправки.

#### Определение диаграмм направленности приемников способом поворота на $180^\circ$ и определение к. с. в. поля при помощи направленного приемника

Считаем, что в операции участвует только один приемник, с которым связана система отсчета углов  $\varphi$ . Примем некоторый угол  $\varphi = \varphi_0$  за исходный, относительно которого следует определить диаграмму направленности. Обозначим чувствительности в направлениях угла  $\varphi_0$  и  $\varphi_0 + \pi$  соответственно символами  $E_0$  и  $E'_0$ , а выходные напряжения —  $V_0$  и  $V'_0$ . Для каждого из остальных углов эти же величины обозначим  $E, E', V, V'$ .

Уравнения выходных напряжений приемника при его ориентациях под углами  $\varphi, \varphi_0, \varphi + \pi$  и  $\varphi_0 + \pi$  к направлению прихода прямой волны по форме совпадают с уравнениями (5). Поэтому формулы (11) и (17) при соответствующей трактовке смысла входящих в них величин могут служить и в случае определения диаграммы направленности приемника, которая получается в результате определения отношений чувствительностей в направлениях углов  $\varphi$  и  $\varphi_0$  [2].

Хотя определение диаграммы направленности можно рассматривать как сличение приемника с собой самим при разных его ориентациях, специфика работы с одним приемником накладывает на методику определения диаграмм направленности, по сравнению с методикой сличений, некоторые ограничения. Так, при определении диаграмм направленности нельзя произвольно выбирать ориентации приемников для устранения систематической погрешности; пользуясь формулой (17') необходимо измерять отношение  $\frac{E'_0}{E_0}$  каким-то независимым путем, например, по формуле (11), в то время как при сличениях разных приемников  $\frac{E'_0}{E_0}$  представляет собой отношение чувствительностей образцового приемника и может считаться известной величиной.

Для определения к. с. в. обычно используется ненаправленный приемник размером значительно меньше длины волны. Однако практически изготовить или использовать такой приемник не всегда возможно (особенно в ультразвуке). Кроме того, для определения к. с. в. с целью измерения диаграмм направленности или сличений приемников наиболее удобно применять сами исследуемые приемники.

Идея предлагаемого способа определения к. с. в. заключается в следующем. У приемника выбирается такая ориентация, при которой чувствительности в направлениях прихода прямой и отраженной волн равны; в этих направлениях приемник ведет себя как ненаправленный.

Рассмотрим, как делается выбор ориентаций приемника в случае, когда его диаграмма направленности неизвестна.

У любого приемника можно подобрать по крайней мере одну такую ориентацию, при которой

$$V = V'.$$

На основании (5) следует:

$$E = E'.$$

Далее

$$V^{вч} = E\xi_1 + E'\xi_2 = E(\xi_1 + \xi_2),$$

$$V^{от} = E\xi_1 - E'\xi_2 = E(\xi_1 - \xi_2).$$

Разделив одно на другое, получаем:

$$\frac{V^{вч}}{V^{от}} = \frac{\xi_1 + \xi_2}{\xi_1 - \xi_2},$$

т. е. отношение  $\frac{V^{вч}}{V^{от}}$  по определению оказывается равным к. с. в. [3]. Таким образом, для определения к. с. в. следует провести следующие операции:

1. Выбрать угол поворота приемника  $\varphi$  так, чтобы при ориентациях приемника в направлении прихода прямой волны и в направлении прихода отраженной волны (т. е. при повороте на  $180^\circ$ ) его выходные напряжения были бы одинаковы.

2. Измерить для выбранной ориентации максимальное и минимальное выходные напряжения при перемещении приемника вдоль стоячей волны и вычислить к. с. в.

#### Об экспериментальной проверке способов поворота на $180^\circ$

Эксперимент проводился с двумя титанат-бариевыми ультразвуковыми приемниками (гидрофонами). Чувствительный элемент одного из них представлял собой полый цилиндр диаметром 10 мм, другого — полушару диаметром 14,5 мм. Излучатель — диск из керамики титаната бария диаметром 50 мм. Измерения проводились в воде, в ванне, стены которой были заглушены резиновыми клиньями. Расстояние от излучателя до области, в которой устанавливались исследуемые приемники, было  $\sim 350$  мм; за приемниками примерно на таком же расстоянии устанавливался отражатель для создания отраженной волны обратного направления. В области измерений\* амплитуда ультразвукового давления была неизменной, спад на краях ее был не более 5%. Электронная аппаратура позволяла проводить наблюдения и измерения сигналов как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Сличения гидрофонов по чувствительности и определение их диаграмм направленности проводились на двух частотах: 200 и 464 кГц. Исследование в импульсном режиме показало, что отраженные волны, идущие в направлениях, противоположном или совпадающем с направлением распространения прямой волны, значительно превышали по амплитуде отражения, приходящие с остальных направлений. К. с. в. измеренный либо в импульсном режиме, либо способом определения к. с. в. с помощью направленного приемника, описанным выше, оказался на частоте 200 кГц равным 2,2, на частоте 464 кГц — 1,73. При неизменном напряжении на излучателе по точкам через  $10^\circ$  были определе-

\* Под областью измерений понимается такой участок ультразвукового поля, в котором амплитуда сигнала может считаться неизменной, а волны — плоскими. Размеры этой области должны хотя бы немного превышать размеры наибольшего из исследуемых чувствительных элементов приемников.

ны выходные напряжения обоих приемников, как функции углов поворота относительно их вертикальных осей вращения. Эти измерения были проведены как в импульсном, так и в непрерывном режимах. При каждом повороте приемники устанавливались в ближайшее место достижения максимального выходного напряжения, соответствующего данному углу, т. е. при каждом измерении контролировалось соблюдение необходимых фазовых условий.

Из совокупности этих данных для сличений были выбраны несколько направлений. Для одних направлений  $\gamma$  приблизительно равнялось  $\gamma_0$  (где  $\gamma_0$  — отношение напряжений приемника, условно принятого за образцовый), для других направлений  $\gamma$  заметно отличалось от  $\gamma_0$ . В первом из этих случаев проверялся способ подбора ориентаций приемников для сличений без введения поправок. Во втором случае — способ с

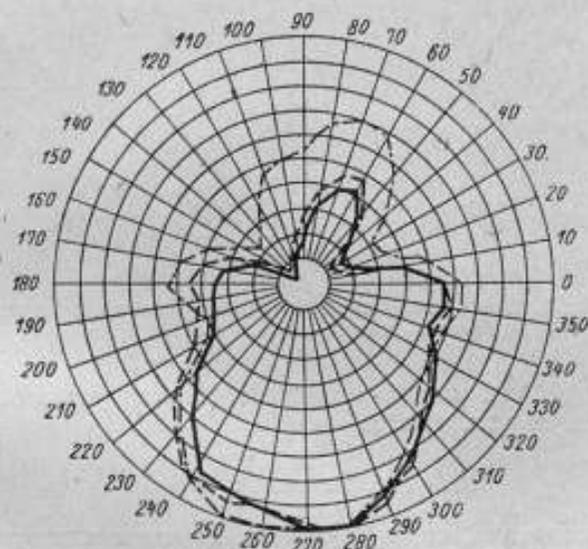


Рис. 1. Диаграммы направленности приемника, снятые различными способами на частоте 200 кГц.

введением поправки по формулам (11) и (17). Результаты сличений указанными способами и сличений в импульсном режиме совпали. Отличия не превышали предельной погрешности измерений  $3\sigma$  ( $\sigma_0 \approx 5-7\%$ ).

По измеренным выходным напряжениям определялись и диаграммы направленности приемников. У сферического приемника диаграммы направленности оказались близкими к круговой, на которых мало проявляется влияние отраженной волны. Результаты определения диаграммы направленности цилиндрического приемника представлены на рис. 1 и 2. Штрих-пунктирные линии показывают в нормированном масштабе зависимости выходных напряжений приемника от углов его поворота. Эти напряжения были измерены при наличии отраженной волны в режиме непрерывного излучения ультразвука и представляют собой диаграммы направленности с неустраненной систематической погрешностью. Штриховые линии изображают диаграммы направленности приемника, снятые в импульсном режиме, сплошные линии — диаграммы направленности, полученные из штрих-пунктирных кривых путем расчета по формуле (11). Учитывая, что погрешность каждого измерения не превышает 5—7%, можно считать диаграммы направленности, полученные импульсным методом, и диаграммы, полученные поворотом на  $180^\circ$  при наличии отраженной волны, совпадающими. В то же время кривая напряжений, снятая при наличии отраженной волны

обычным способом (штрих-пунктирная линия), имеет явные расхождения с результатами измерений в импульсном режиме, заметно превышающие погрешности измерений. Наиболее отчетливо это видно в области

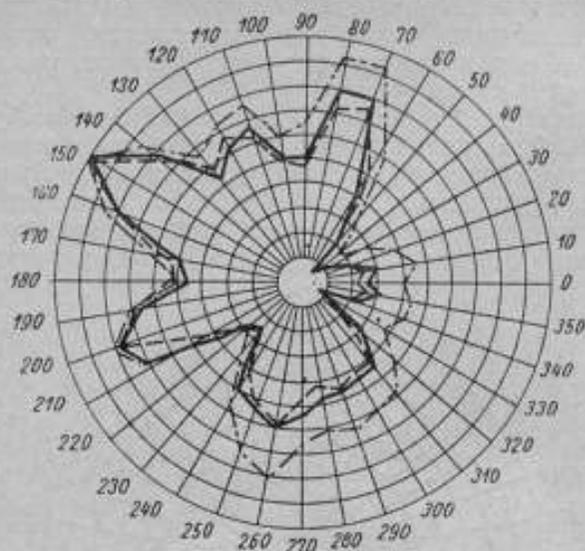


Рис. 2. Диаграммы направленности приемника, снятые различными способами на частоте 464 кГц.

углов от 0 до 160° на рис. 1, а также в области углов от 140 до 230° (включающей нуль) на рис. 2.

### Заключение

В работе показано, что градуировка акустических приемников методом сличения с образцовым приемником и определение диаграмм направленности приемников можно проводить при наличии отраженных волн, противоположных по направлению волне от излучателя или совпадающих с этим направлением. При этом систематическая погрешность, источником которой является наличие стоячей волны, устраняется с помощью поочередной установки приемников в пучность или узел или применением способа поворота приемника на 180°. При такой двойной ориентации приемник поворачивается рабочим направлением сначала в сторону прихода волны от излучателя, а затем в направлении прихода отраженной волны. Систематическая погрешность градуировки приемников способом поворота на 180° может быть устранена с помощью расчета или подбором в процессе сличений таких специальных ориентаций сличаемых приемников, при которых отношение чувствительностей в рабочих направлениях равно отношению выходных напряжений этих приемников (как и в случае идеального поля). Последний вариант по своему действию эквивалентен улучшению системы заглушения.

Определение к. с. в. для расчета поправки при градуировках и определении диаграммы направленности может выполняться с помощью самого же исследуемого приемника. Для этого подбирается такая его ориентация, при которой выходное напряжение не меняется при повороте на 180°.

Способ установки в пучность и узел стоячей волны рационально применять, когда неизвестен к. с. в. при градуировке одного приемника или при определении одной точки диаграммы направленности. Однако,

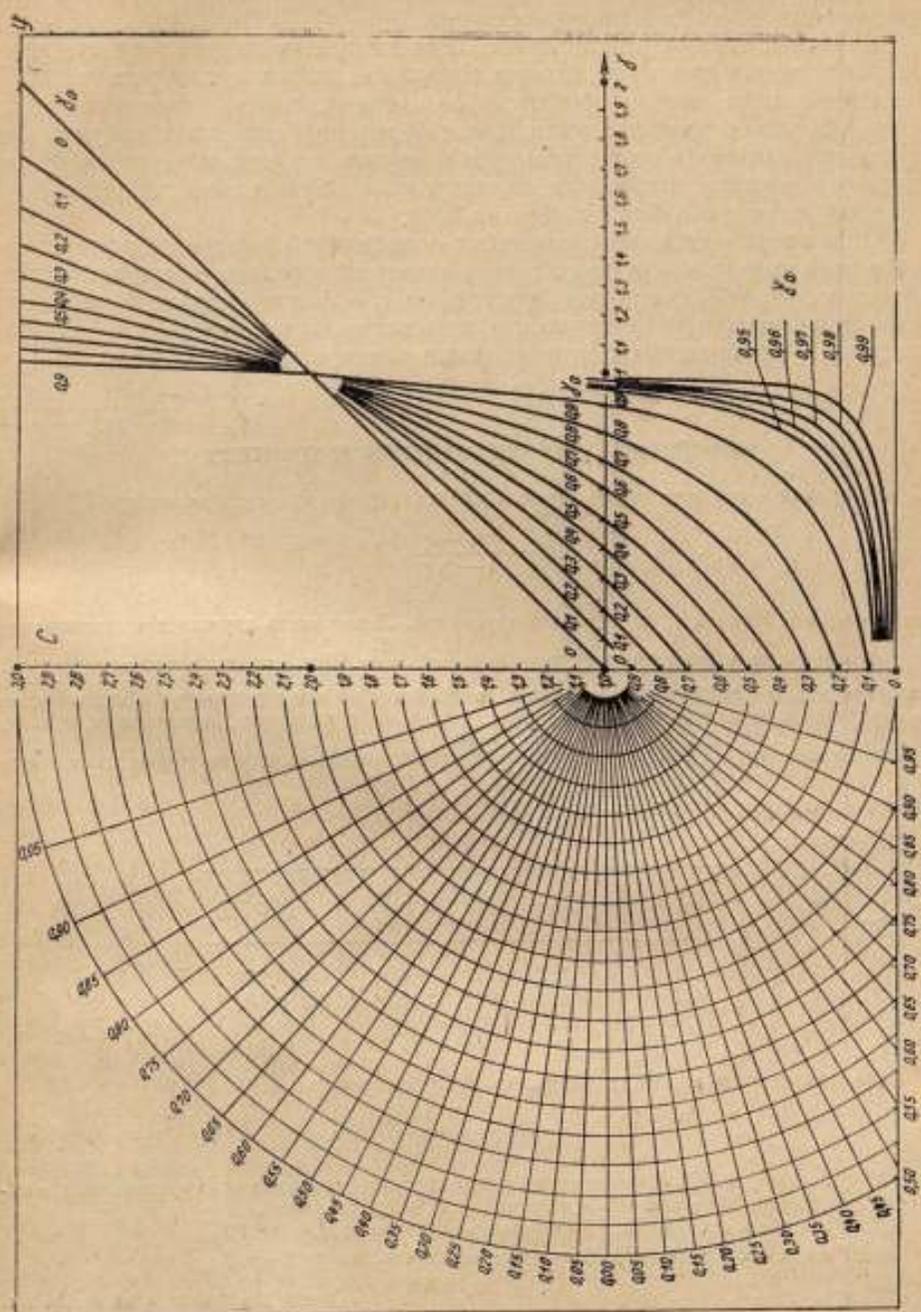


Рис. 3. Изотермы

если проводится градуировка нескольких приемников методом сличения с образцовым или определяется полная диаграмма направленности приемника, может оказаться предпочтительнее способ поворота на  $180^\circ$ . Этот способ удобен и тем, что допускает использование автоматической записи выходных напряжений приемников как для сличений, так и для определения диаграмм направленности.

Заметим, что операция определения диаграмм направленности приемника только в принципе должна содержать действие поворота на  $180^\circ$ . Практически же можно обойтись без специальных дополнительных установок углов поворота, если для определений выходных напряжений приемника выбирать такие углы его поворота, на которые угол  $180^\circ$  делится без остатка. Тогда для каждого угла обязательно найдется другой угол, отличающийся от него на  $180^\circ$ .

Описанные методики сличений и определений диаграмм направленности приемников могут представить интерес не только в гидроакустике, а ультразвуковом диапазоне частот, но и в более широкой области гидроакустических и акустических измерений, а возможно и в области измерений, проводимых с приемниками электромагнитных волн.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

##### НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖИТЕЛЯ $C$

В правой части номограммы (рис. 3) даны графики значений величины

$$\frac{\gamma_0 - \gamma}{1 - \gamma_0 \gamma}$$

как функции  $\gamma$ , причем  $\gamma_0$  играет роль параметра. Левая часть служит для умножения этой величины на отношение чувствительностей  $\frac{E_0'}{E_0}$ . Для определения множителя  $C$  следует по  $\gamma_0$  и  $\gamma$  найти точку, отметить ее ординату на оси  $y$  и перенести это значение по окружности в левую часть, в место пересечения с радиусом, помеченным числом, равным отношению  $\frac{E_0'}{E_0}$ . Переноса последнюю полученную точку по горизонтали опять на ось  $y$ , находим значение  $\frac{E_0'}{E_0}$ .

Пример.

$\gamma_0$	$\gamma$	$\frac{E_0'}{E_0}$	$C$
0,2	1,2	0,6	1,78
0,7	0,9	0,3	1,16
0,95	0,75	0,65	0,66

Промежуточные значения нетрудно интерполировать.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В. Л. О систематической погрешности сличения акустических приемников, связанной с отраженными волнами (см. наст. сборник).
2. Резников А. Е. Авторское свидетельство № 148825.
3. Резников А. Е. Авторское свидетельство № 149815.

Статья поступила в июле 1962 г.

## О СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ СЛИЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ, СВЯЗАННОЙ С ОТРАЖЕННЫМИ ВОЛНАМИ

*Рассматривается влияние различных параметров приемников и амплитуд отраженных волн на величину систематической погрешности, возникающей при их сличении. Выводятся формулы для оценки систематической погрешности сличения приемников, связанной с отраженными волнами. Сформулированы условия применимости выведенных формул. Предлагается новый метод сличения приемников в незаглушенном бассейне со специально установленным отражателем, позволяющий исключить погрешность от первого отражения и уменьшить систематическую погрешность, связанную с оставшимися отражениями. Приводятся результаты экспериментального исследования двух источников систематических погрешностей, возникающих при наличии отраженных волн, из-за неодинаковости диаграмм направленности и неточности установки приемников.*

Градуировка акустических преобразователей (приемников) по полю каким-либо абсолютным методом или методом сличения с образцовым в режиме непрерывного излучения обычно проводится при возможно полном устранении отраженных волн: в акустике — в звукомерной камере, в гидроакустике — в заглушенной ванне. Погрешность, связанную с некоторыми оставшимися отраженными волнами, обычно никак не учитывают.

С другой стороны, такие же, но более грубые измерения проводятся в частично заглушенных бассейнах или в совершенно незаглушенных, но таких, которые вследствие большого объема дают значительное рассеяние энергии отраженных волн (таков, например, бассейн ВНИИФТРИ). Отраженные волны при этом могут достигать по амплитуде 20—30% и более от прямой. Измерения проводятся в импульсном режиме, что естественно приводит к потере точности; при измерениях же в непрерывном режиме считают, что погрешность, связанная с отраженными волнами, будет такого же порядка, как сами отражения.

До сих пор никем не исследовалось, от каких факторов зависит систематическая погрешность градуировки преобразователей, связанная с отраженными волнами и как (по каким формулам) можно оценить ее величину. Такая оценка позволила бы уточнить условия работы в непрерывном режиме в плохо заглушенных бассейнах, с тем чтобы погрешность градуировки преобразователей оставалась малой (была не больше, чем при работе в импульсном режиме), а при работе в заглушенном бассейне можно было бы оценить эту погрешность и обосновать возможность пренебрежения ею в каждом отдельном случае. Представляет интерес теоретическое исследование влияния различных факторов на величину систематической погрешности градуировки приемников, связанной с отраженными волнами, а также методика ее экспериментального изучения и количественная оценка погрешностей на основе экспериментальных данных.

В настоящей работе сделаны теоретические расчеты и показано, что систематическая погрешность градуировки приемников зависит от связанных между собой определенной зависимостью следующих четырех факторов: 1) соотношения амплитуд прямой и отраженных волн; 2) направленности образцового и сличаемого преобразователей; 3) различия их диаграмм направленности; 4) фазового сдвига между напряжениями на выходе приемников, соответствующими отраженным волнам; такой сдвиг возникает из-за неточности установки координат и различий в дифракции образцового и сличаемого преобразователей.

Выводятся формулы для оценки максимально возможной систематической погрешности в двух частных случаях: 1) диаграммы направленности одинаковы, но приемники установлены в одну точку неточно; 2) диаграммы направленности различны, а приемники установлены точно в одну точку. Рассмотрен также общий случай неодинаковых диаграмм направленности и неточной установки приемников в одну точку. Для общего случая погрешность оказывается равной сумме погрешностей в двух вышеуказанных частных случаях.

В работе показано, что оценка погрешностей по выведенным формулам будет давать удовлетворительный результат для хорошо заглушенного бассейна, когда отражения выше третьего могут считаться пренебрежимо малыми. При большем числе отражений в незаглушенном бассейне оценка погрешностей по выведенным формулам будет давать явно завышенный результат. Для правильной оценки в этом случае необходимо применять статистические методы усреднения отражений. Это предполагается исследовать и опубликовать позднее.

В статье указывается также на возможность градуировки преобразователей по полю бегущей волны новым методом сличения в незаглушенном бассейне со специально установленным отражателем. При градуировке предлагаемым способом сличаемые преобразователи должны быть ориентированы таким образом, чтобы отношения чувствительностей в направлении прихода прямой и отраженной волн были одинаковы. В работе выводятся формулы для оценки систематической погрешности градуировки приемников этим методом, связанной с отраженными волнами других направлений. Показано, что использование новой методики приводит к уменьшению погрешности, обусловленной оставшимися отражениями.

Методика сличения приемников получила в работе А. Е. Резникова [2] дальнейшее развитие: предложен способ нужной ориентации сличаемых приемников непосредственно в стоячей волне без предварительного снятия их диаграмм направленности в бегущих волнах. Все это делает указанную методику сличений приемников совершенно самостоятельной и практически ценной. В этой же работе предлагается еще несколько способов сличений приемников и определения их диаграмм направленности.

#### Представление ультразвукового поля в виде векторного поля в комплексной плоскости

Пусть мы имеем поле, состоящее из прямой волны плоских волн, распространяющихся вдоль оси  $x$ , и произвольного количества отраженных плоских волн, направленных под разными углами к прямой волне\*.

Тогда поле в каждой точке может быть выражено так:

$$\sum_0^N \Delta p_n e^{i(\omega t - (\vec{k}_n \vec{r}))},$$

\* Подобная теория справедлива и для электромагнитного поля.

где  $\Delta p_n$  — амплитуда давления в волне;

$\vec{k}_n$  — волновой вектор волны;

$r$  — радиус-вектор;

$\omega$  — круговая частота ультразвука.

Для удобства и сокращения дальнейших вычислений описываемое поле, состоящее в каждой точке пространства из бегущей и отраженных волн, представим в виде суммы  $N+1$  комплексных векторов, модули которых соответствуют амплитудам, а фазовые углы — фазам волн в этой точке. Опуская временной множитель, выразим комплексную амплитуду давления  $\overline{P}(\vec{r})$  в некоторой точке в виде

$$\overline{P}(\vec{r}) = \sum_0^N \overline{\Delta p_n}(\vec{r}), \quad (1)$$

где  $\overline{\Delta p_n}(\vec{r}) = \Delta p_n e^{-i(\vec{k}_n \vec{r})}$  (черта означает комплексный вектор).

Обозначим чувствительности приемника в направлении прихода прямой и отраженных волн соответственно через  $E_0, E_1, \dots, E_n$ . Комплексные векторы напряжений, соответственно возникающих в преобразователе при приходе прямой и каждой из отраженных волн, будут связаны с комплексными векторами давлений в этих волнах следующим простым соотношением:

$$\overline{V_n}(\vec{r}) = E_n \Delta p_n e^{-i(\vec{k}_n \vec{r}) + i\psi_n} = E_n \overline{P_n}(\vec{r}), \quad (2)$$

где 
$$\overline{P_n}(\vec{r}) = \Delta p_n e^{-i(\vec{k}_n \vec{r}) + i\psi_n}, \quad (3)$$

а  $\psi_n$  — фазовый угол, обусловленный сдвигом фазы из-за дифракции.

Суммарный комплексный вектор напряжения, возникающий в преобразователе при помещении его в сложное поле, будет равен сумме комплексных векторов, возникающих от каждой составляющей поля:

$$\overline{V}(\vec{r}) = \sum_0^N \overline{V_n}(\vec{r}) = \sum_0^N E_n \overline{P_n}(\vec{r}). \quad (4)$$

О возможности сличения приемников с одинаковыми диаграммами направленности при наличии отраженных волн и о систематической погрешности, обусловленной неточностью установки их координат

Пусть сличаемые преобразователи обладают одинаковыми диаграммами направленности и одинаково ориентированы в направлении прихода прямой волны.

В этом случае имеет место равенство:

$$\frac{E_n}{E_0} = \frac{E'_n}{E'_0}. \quad (5)$$

Здесь и далее обозначение со штрихом ( $'$ ) относится к образцовому приемнику.

Предположим также, что при одинаковом направлении прихода волн преобразователи имеют равные фазовые сдвиги, обусловленные дифракцией (с точностью до постоянной фазы  $\varphi_0$ ), т. е. имеет место

равенство  $\psi_n' = \psi_n + \varphi_0$ . Пусть преобразователи устанавливаются в одну и ту же точку поля. Тогда справедливо векторное равенство:

$$\vec{P}_n'(r) = \vec{P}_n(r)e^{j\varphi_0}. \quad (6)$$

Заметим, что постоянный сдвиг  $\varphi_0$  одинаков при одинаковой симметричной форме сличаемых преобразователей, имеющих лишь разные размеры.

Выражение для отношения напряжений на выходе образцового и поверяемого преобразователя с учетом равенства (6) будет иметь вид:

$$\frac{V}{V'} = \frac{\left| \sum_0^N E_n \vec{P}_n(r) \right|}{\left| e^{j\varphi_0} \sum_0^N E_n' \vec{P}_n(r) \right|} = \frac{E_0}{E_0'} \frac{\left| \sum_0^N \frac{E_n}{E_0} \vec{P}_n(r) \right|}{\left| \sum_0^N \frac{E_n'}{E_0'} \vec{P}_n(r) \right|}. \quad (7)$$

Учтя равенство (5), получим:

$$\frac{V}{V'} = \frac{E_0}{E_0'}. \quad (8)$$

Из равенства (8) следует, что если у преобразователей одинаковы диаграммы направленности, ориентация в направлении прихода прямой волны и фазовые сдвиги (при одинаковых форме и размерах), то они могут сличаться между собой по полю бегущей волны при наличии сколь угодно сложных отражений.

Формула (7) может служить основой новой методики сличений приемников с применением специально установленного отражателя. Действительно, пусть приемники, диаграммы направленности которых могут быть неодинаковыми, ориентированы так, что отношение их чувствительностей в направлении прихода прямой и отраженной от отражателя волны равны, а другие отражения пренебрежимо малы\*. Как следует из выражения (7), отношение напряжений на их выходах будет равно отношению чувствительностей в направлении прихода прямой волны:

$$\frac{V}{V'} = \frac{E_0}{E_0'} \frac{\left| \vec{P}_0(r) + \frac{E_1}{E_0} \vec{P}_1(r) \right|}{\left| \vec{P}_0(r) + \frac{E_1}{E_0} \vec{P}_1(r) \right|} = \frac{E_0}{E_0'}. \quad (8')$$

Погрешность, связанная с наличием других отраженных волн, будет рассмотрена ниже. Забегая вперед отметим, что она будет меньше, чем при сличении приемников в тех же условиях без применения отражателя.

Если напряжения на выходе сличаемых преобразователей, соответствующие прямым и отраженным волнам, различаются по фазе из-за неточности установки приемников в одну точку, а также если различны дифракционные фазовые сдвиги (вследствие различия формы), то появится систематическая погрешность даже при сличениях преобразователей с одинаковыми диаграммами направленности. Найдем ее величину.

\* В [2] А. Е. Резников показал, что для такой ориентации сличаемых приемников не нужно определять их диаграмму направленности в условиях бегущей волны, а можно применить для этого специальный прием в условиях отраженной волны. Это увеличивает практическую ценность предлагаемого метода.

Выражение для отношения напряжений (7) имеет вид:

$$\frac{V}{V'} = \frac{E_0}{E'_0} \frac{\left| \sum_0^N \frac{E_n}{E_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi_n]} \right|}{\left| \sum_0^N \frac{E'_n}{E_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + (\vec{k}_0 \Delta r) + \psi'_n]} \right|} \quad (9)$$

Здесь  $\vec{\Delta r}$  — вектор, характеризующий неточность установки приемников в одну точку. Для дальнейших расчетов целесообразно умножить и разделить числитель под знаком модуля на

$$e^{-j[\psi'_0 - \psi_0 + (\vec{k}_0 \Delta r)]},$$

тогда выражение (9) запишется в виде:

$$\frac{V}{V'} = \frac{E_0}{E'_0} \frac{\left| e^{j[\psi'_0 - \psi_0 + (\vec{k}_0 \Delta r)]} \left| \sum_0^N \frac{E_n}{E_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + (\vec{k}_0 \Delta r) + \psi_n + \psi'_0 - \psi_0]} \right| \right|}{\left| \sum_0^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \Delta r)]} \right|} \quad (10)$$

Обозначим множитель при  $\frac{E_0}{E'_0}$  в равенстве (10) через  $K$ . Относительная погрешность  $\delta$  будет равна:

$$\delta = \frac{\frac{E_0}{E'_0} - \frac{E_0}{E'_0} K}{\frac{E_0}{E'_0}} = 1 - K. \quad (11)$$

Учтя соотношение  $\left| e^{j[\psi'_0 - \psi_0 + (\vec{k}_0 \Delta r)]} \right| = 1$  и равенство (11), получим:

$$\delta = \frac{\left| \sum_0^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \Delta r)]} \right| - \left| \sum_0^N \frac{E_n}{E_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + (\vec{k}_0 \Delta r) + \psi_n + \psi'_0 - \psi_0]} \right|}{\left| \sum_0^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \Delta r)]} \right|} \quad (12)$$

или, используя очевидные неравенства для модулей разности и суммы векторов и равенство (5), получим выражение погрешности, обусловленной только неточностью установки приемников:

$$\begin{aligned} \delta_1 &\leq \frac{\left| \sum_0^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n \left| e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + (\vec{k}_0 \Delta r) + \psi_n + \psi'_0 - \psi_0]} - e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \Delta r)]} \right| \right|}{\left| \sum_0^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \Delta r)]} \right|} \leq \\ &\leq \frac{2 \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n \left| \sin \frac{(\vec{k}_0 \Delta r) - (\vec{k}_n \Delta r) + (\psi_n - \psi'_n) + (\psi'_0 - \psi_0)}{2} \right|}{\Delta \rho_0 - \left| \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta \rho_n e^{-j[(\vec{k}_n \vec{r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \Delta r)]} \right|} \quad (13) \end{aligned}$$

Обозначив наибольший среди всех слагаемых аргумент синуса через  $\Delta\varphi_{\max}$ , получим:

$$\delta_1 \leq 2 \frac{\sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta\rho_n \left| \sin \frac{\Delta\varphi_{\max}}{2} \right|}{\Delta\rho_0 - \left| \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \Delta\rho_n e^{-i[(\vec{k}'_n \vec{\Delta r}) + \psi'_n + (\vec{k}_n \vec{\Delta r})]} \right|} \quad (14)$$

где

$$\Delta\varphi_{\max} = [(\vec{k}'_0 \vec{\Delta r}) - (\vec{k}_n \vec{\Delta r}) + (\psi'_n - \psi'_0) + (\psi'_0 - \psi_0)]_{\max} \quad (15)$$

Сделаем вполне оправданные физические предположения:

1)  $E'_0 > E'_n$ , т. е. образцовый приемник ориентирован так, что чувствительность в направлении прихода прямой волны у него наибольшая (это всегда выполняется);

2)  $\Delta\rho_0 > \sum_1^N \Delta\rho_n$ , т. е. сумма амплитуд всех отраженных волн не превышает амплитуды прямой (это практически также всегда выполняется при не слишком больших отражениях).

При этих предположениях, если использовать соответствующие векторные неравенства в знаменателе формулы (14), выражение (14) принимает наибольшее значение:

$$\delta_1 \leq 2 \frac{\sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta\rho_n}{\Delta\rho_0}}{1 - \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta\rho_n}{\Delta\rho_0}} \sin \left| \frac{\Delta\varphi_{\max}}{2} \right| \quad (16)$$

Если преобразователи имеют одинаковую симметричную форму (при разных или одинаковых размерах), то выражение (15) примет вид:

$$\Delta\varphi_{\max} = |\Delta r (\vec{k}'_0 - \vec{k}_n)|_{\max} \quad (17)$$

так как

$$(\psi'_n - \psi'_0) + (\psi'_0 - \psi_0) = \varphi'_0 - \varphi_0 = 0.$$

Найдем выражение для  $\Delta\varphi_{\max}$ .

Воспользуемся очевидными неравенствами:

$$|\Delta r (\vec{k}'_0 - \vec{k}_n)| \leq |(\Delta r \vec{k}'_0)| + |(\Delta r \vec{k}_n)| \leq \Delta x k + \Delta r k.$$

Так как  $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ , то, приняв погрешность установки координат  $x, y, z$  одинаковой и равной наибольшей из трех, т. е.  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ , получим  $\Delta\varphi_{\max} = 2,73 \cdot k \Delta x$ .

Формула (14) при этом приобретает вид:

$$\delta_1 \leq 2 \frac{\sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta\rho_n}{\Delta\rho_0}}{1 - \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta\rho_n}{\Delta\rho_0}} \sin \left| 2,73\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \right| \quad (18)$$

Формула (18) может быть записана еще в другом виде, удобном для подсчета погрешности по экспериментальным данным:

$$\delta_1 \leq 2 \frac{\frac{1}{V_0'} \sum_1^N V_n'}{1 - \frac{1}{V_0'} \sum_1^N V_n'} \sin \left[ 2,73\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \right]. \quad (19)$$

Здесь  $V_0'$ ,  $V_1'$ , ...,  $V_n'$  — напряжения на выходе образцового приемника, соответствующие прямой и отраженным волнам.

#### Оценка систематической погрешности сличения приемников с разными диаграммами направленности при точной установке их координат

В этом случае  $\frac{E_n}{E_0} \neq \frac{E_n'}{E_0'}$  и выполняется равенство (6). Выражение для отношения напряжений на выходе поверяемого и образцового преобразователей будет иметь вид выражения (7).

Обозначая в выражении (7) множитель при  $\frac{E_0}{E_0'}$  через  $K$  и пользуясь формулой (11) для относительной погрешности, обусловленной различием диаграмм направленности, получим:

$$\delta_2 = \frac{\left| \sum_0^N \frac{E_n'}{E_0'} \overline{P_n(r)} \right| - \left| \sum_0^N \frac{E_n}{E_0} \overline{P_n(r)} \right|}{\left| \sum_0^N \frac{E_n'}{E_0'} \overline{P_n(r)} \right|}. \quad (20)$$

Используя, как и при выводе формулы (13), очевидные неравенства для модулей разности и суммы векторов и те же физические предпосылки, что и при выводе выражения (16), получим для оценки максимальной погрешности следующую формулу:

$$\delta_2 \leq \frac{\sum_1^N \frac{\Delta \rho_n}{\Delta \rho_0} \left| \frac{E_n'}{E_0'} - \frac{E_n}{E_0} \right|}{1 - \sum_1^N \frac{E_n'}{E_0'} \frac{\Delta \rho_n}{\Delta \rho_0}}. \quad (21)$$

Для подсчета погрешностей по экспериментальным данным формула (21) может быть записана в другой форме:

$$\delta_2 \leq \frac{\sum_1^N \left| \frac{V_n'}{V_0'} - \frac{V_n}{V_0} \right|}{1 - \sum_1^N \frac{V_n'}{V_0'}}. \quad (22)$$

Здесь  $V_0$ ,  $V_1$ , ...,  $V_n$  и  $V_0'$ ,  $V_1'$ , ...,  $V_n'$  — напряжения на выходе поверяемого и образцового приемников, соответствующие приходящим с разных направлений волнам.

Оценка систематической погрешности сличения приемников при наличии отраженных волн в общем случае разных диаграмм и неточной установки координат сличаемых приемников

Относительная погрешность получается из формулы (12) при условии  $\frac{E_n}{E_0} \neq \frac{E'_n}{E'_0}$  и при тех же физических предположениях, если использовать те же неравенства для модулей суммы разности векторов, что и при выводе выражения (22):

$$\delta \leq \frac{\sum_1^N \frac{\Delta p_n}{\Delta p_0} \left| \frac{E_n}{E_0} e^{-j[(\vec{k}_n r) + (k_0 \Delta r) + \psi_n + \psi'_0 - \psi_0]} - \frac{E'_n}{E'_0} e^{-j[(\vec{k}_n r) + (k'_0 \Delta r) + \psi'_n]} \right|}{1 - \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta p_n}{\Delta p_0}} \quad (23)$$

Прибавив и отняв в каждом слагаемом соответственно член

$$\frac{E'_n}{E'_0} e^{-j[(\vec{k}_n r) + (k_0 \Delta r) + \psi_n + \psi'_0 - \psi_0]},$$

используя обычные неравенства для суммы модулей векторов и принимая во внимание формулы (13), (18), (19), (21), (22) и (23), получим:

$$\delta \leq \frac{\sum_1^N \frac{\Delta p_n}{\Delta p_0} \left| \frac{E'_n}{E'_0} - \frac{E_n}{E_0} \right| + 2 \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta p_n}{\Delta p_0} \sin \left| 2,73\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \right|}{1 - \sum_1^N \frac{E'_n}{E'_0} \frac{\Delta p_n}{\Delta p_0}} \quad (24)$$

Для удобства подсчета погрешности по экспериментальным данным формула (24) может быть записана в виде:

$$\delta \leq \frac{\sum_1^N \left| \frac{V'_n}{V'_0} - \frac{V_n}{V_0} \right| + 2 \frac{1}{V'_0} \sum_1^N V'_n \sin \left| 2,73\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \right|}{1 - \frac{1}{V'_0} \sum_1^N V'_n} \quad (25)$$

Таким образом, общая погрешность оказывается меньшей или равной сумме двух найденных выше погрешностей:

$$\delta \leq \delta_1 + \delta_2 \quad (26)$$

При использовании новой методики сличения приемников с применением специального отражателя, учитывая равенства (8') и то, что приемники ставятся в пучность волны (см. [2]), формулу для оценки

погрешности, связанной с оставшимися отраженными волнами, следует записать в виде:

$$\delta' \leq \frac{\sum_2^N \left| \frac{V'_n}{V'_0} - \frac{V_n}{V_0} \right| + 2 \sin \left| 2,73\pi \frac{\Delta x}{k} \right| \frac{1}{V'_0} \sum_2^N V'_n + 2 \frac{V'_1}{V'_0} \sin \left| 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \right|}{1 + \frac{V'_1}{V'_0} - \frac{1}{V'_0} \sum_2^N V'_n} \quad (27)$$

Сравнение (27) и (25) показывает, что в числителе уменьшился член под знаком суммы, связанный с первым отражением, а знаменатель увеличился на двойную величину слагаемого, связанного с первым отражением. Таким образом, использование отражателя приводит к уменьшению погрешности, связанной с оставшимися отраженными волнами.

### Физический смысл полученных формул для оценки систематической погрешности

Из вывода формул (19), (22), (25) для оценки систематической погрешности, которая может возникнуть при сличении приемника (при наличии отраженных волн), следует, что знак равенства в этих формулах, т. е. предельное значение погрешности, соответствует такой физической картине:

- 1) фазы всех отраженных волн, приходящих на приемник, противоположны фазе прямой волны;
- 2) чувствительность одного приемника в любом направлении прихода отраженных волн по абсолютному значению всегда больше, чем чувствительность другого;
- 3) все отраженные волны приходят с наиболее невыгодного направления, для которого вектор, выражающий погрешность установки приемников, максимален.

При одновременном выполнении первого и второго условий знак равенства надо взять для погрешности  $\delta_2$  в формуле (22); при одновременном выполнении первого и третьего условий — для погрешности  $\delta_1$  в формуле (19); при одновременном выполнении всех трех условий — для общей погрешности в формуле (25).

Первое условие относится ко всем трем погрешностям и соответствует замене суммы комплексных векторов алгебраической суммой их модулей. Это общее условие наиболее сильное с точки зрения возможности замены знаков неравенства на знаки равенства в формулах для подсчета погрешности.

Естественно, что одновременное выполнение всех трех условий маловероятно и не соблюдается на практике. В общем случае большого числа отражений полученные формулы дают очень грубую и явно завышенную оценку ожидаемой систематической погрешности. Для правильной оценки систематической погрешности в этом случае следует пользоваться статистическими методами усреднений.

Однако первое условие часто выполняется на практике и, следовательно, подсчет систематической погрешности по выведенным формулам вполне приемлем и не дает грубо завышенного результата. Это случай хорошо заглушенного бассейна, когда все отражения выше третьего пренебрежимо малы. Наглядными геометрическими рассуждениями можно показать, что при трех отражениях, одно из которых противоположно по направлению прямой волне, а два других идут под произвольными углами (или тем более при двух отражениях под произвольными углами), в ультразвуковом поле всегда будет иметься конечное число регулярно расположенных в пространстве (на расстоянии

порядка полволны) точек, где будет выполняться первое условие (это положение можно доказать математически совершенно строго).

Действительно, две противоположно идущие плоские волны (одна из которых отраженная) с произвольными начальными фазами всегда образуют в пространстве множество параллельных узловых плоскостей, где фазы отраженной и прямой волн противоположны. Вторая волна, отраженная с произвольной фазой под углом к этим плоскостям (вернее, ее фронты, на которых фаза противоположна фазе прямой волны), всегда образует при пересечениях с этими узловыми плоскостями множество регулярно расположенных узловых прямых линий, где одновременно две отраженные волны противоположны по фазе прямой волне. Третья отраженная с произвольной фазой волна (идущая под углом к этим узловым линиям) дает множество регулярно расположенных (на расстоянии порядка полволны) точек, где все три отраженные волны противоположны по фазе прямой волне. Четвертая отраженная волна может прийти в эти точки с противоположной фазой лишь при определенных начальной фазе и угле падения. При произвольных начальной фазе и угле падения этой волны в пространстве крайне редко будут встречаться точки (либо их вообще не будет), в которых фаза четырех отраженных волн и фаза прямой волны противоположны. При большем числе отражений наличие в пространстве точек, где фаза прямой волны и фазы всех отраженных волн противоположны, становится вообще маловероятным из-за необходимости соблюдения для всех отраженных волн вполне определенных углов падения и фазы отражения.

Таким образом, в случае хорошо заглушенного бассейна, т. е. когда число поддающихся измерению отражений не больше трех, всегда можно рассчитывать на то, что сличаемые приемники окажутся достаточно близко от указанных точек, где погрешность наибольшая и наиболее точно оценивается выведенными формулами.

#### Основные выводы из теории

1. Показана возможность сличения приемников, обладающих одинаковыми диаграммами направленности, одинаково ориентированных и установленных в одну точку в сколь угодно сложном поле, состоящем из бегущей волны и многих отраженных волн. Отраженные волны не влияют в этом случае на результат сличения.

2. При неодинаковых диаграммах направленности и неточной установке приемников возникает систематическая погрешность, связанная с отраженными волнами. Для уменьшения этой погрешности образцовый и сличаемый приемники следует по возможности брать однотипными по форме, размерам, конструкции и т. п., одинаково ориентировать в отношении их диаграммы направленности и стремиться к более точной установке в одну точку.

3. Из полученных формул для оценки величины систематической погрешности видно, что на низких частотах общая систематическая погрешность  $\delta$ , связанная с отраженными волнами, будет уменьшаться, так как диаграммы направленности приемников на этих частотах стремятся к круговой, а относительная неточность установки координат по сравнению с длиной волны уменьшается. Этот вывод согласуется с хорошо известным экспериментальным фактором, что на низких частотах приемники можно сличать в незаглушенных или плохо заглушенных объемах.

4. Из полученных формул видно также, что на высоких частотах общая погрешность будет определяться погрешностью  $\delta_1$ , связанной с неточностью установки приемников при сличения. Действительно, погрешность  $\delta_2$ , связанная с различной направленностью, не должна заметно расти: хотя диаграммы направленности на высоких частотах

более неравномерны и сильнее отличаются друг от друга даже у одинаковых приемников, но, с другой стороны, величина отраженных волн заметно падает вследствие поглощения и худшего отражения. Погрешность  $\delta_1$  должна давать заметный рост с увеличением частоты, поскольку относительная неточность установки координат с уменьшением длины волны увеличивается.

5. Теоретически возможно возникновение значительных погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (много более 100%) при относительных величинах суммарных отражений, не превосходящих 100%. Когда образцовый приемник обладает круговой диаграммой направленности и с ним сличается остронаправленный, погрешность, как это следует из формулы (22), стремится к бесконечности, если амплитуды отраженных волн в сумме составляют около 100% от прямой. Действительно, на выходе приемника с круговой диаграммой направленности сигнал равен нулю в точке, где отраженные волны приходят в противофазе к прямой волне, а на выходе сличаемого направленного приемника сигнал пропорционален давлению в бегущей волне (в той же точке). В другом случае, когда сличаемые приемники обладают одинаковыми диаграммами направленности, но при сличении допускаются ошибки в установке координат в полволны, погрешность  $\delta_1$  будет максимальной и будет стремиться к бесконечности, если суммарные амплитуды отраженных волн стремятся к 100% от амплитуды прямой волны. Физический смысл здесь заключается в том, что сличаемые приемники, вследствие допускаемой погрешности, по координате могут оказаться один в пучности, а другой в узле стоячей волны.

6. При сличении приемников новым методом с использованием отражателя уменьшается систематическая погрешность, связанная с отраженными волнами за счет: 1) исключения погрешности, вносимой первым отражением, обычно самым большим по величине, и 2) относительного увеличения веса прямого сигнала благодаря помещению сличаемых приемников в пучность давления. Поэтому новый метод сличения приемников может рассматриваться как способ уменьшения (или исключения) систематической погрешности, связанной с отраженными волнами.

#### Экспериментальные результаты и сравнение их с выводами теории

В табл. 1 и 2 приведены экспериментальные результаты измерения величин отражений и связанных с ними погрешностей  $\delta$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , проведенных в заглушенном резиновыми клиньями бачке в диапазоне 120—350 кГц, где наблюдались еще два-три отражения. Выше 350 кГц измерения не проводились, так как из-за малости отражения они не поддавались измерению. При исследованиях применялся обычный импульсный метод, которым пользуются также в архитектурной акустике [1]. Отражения измерялись по осциллографу с погрешностью  $\pm 0,2$  мм. В качестве образцового приемника использовался титанат-бариевый шарик диаметром 12 мм, а в качестве сличаемого приемника — титанат-бариевый цилиндр диаметром 10 мм и высотой 12 мм. Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Погрешность  $\delta_2$  (в процентах, см. табл. 2) обусловленная влиянием отраженных волн из-за неодинаковости диаграмм направленности сличаемых приемников, во всех случаях (кроме частоты 250 кГц) значительно меньше первого отражения (выраженного в процентах к прямой волне по амплитуде) и тем более меньше суммы всех отражений, хотя сами отражения не малы (см. табл. 1). Это подтверждает вывод теории, что в случае почти одинаковых диаграмм направленности (в нашем эксперименте были почти одинаковы размеры приемников), погрешность  $\delta_2$  должна быть весьма малой.

Таблица 1

Амплитуды отраженных волн (в импульсном режиме)

Частота $f$ кГц	Образцовый приемник			Поверхностный приемник		
	Отраженные волны в процентах от прямой волны			Отраженные волны в процентах от прямой волны		
	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я
120	18,3	5,0	3,3	15,0	5,0	3,3
130	11,7	11,7	6,7	13,3	13,3	5,0
160	10,0	3,3	3,3	16,7	3,3	3,3
180	5,0	3,3	1,6	5,0	1,6	1,6
195	5,0	5,0	1,6	5,0	1,6	1,6
200	5,0	1,6	1,6	3,3	3,3	1,6
250	8,4	8,4	1,6	11,7	3,3	3,3
280	10,0	3,3	1,6	8,3	3,3	1,6
300	10,0	3,3	3,3	8,3	3,3	1,6
350	6,7	3,3	1,6	3,3	3,3	3,3

Таблица 2

Расчет систематических погрешностей  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\delta$  по данным табл. 1  
(точность установки приемников  $\Delta x = \pm 0,3$  мм)

$f$ , кГц	$\lambda$	$\sin 2,73 \frac{\Delta x}{\lambda}$	$\delta_2$ , %	$\delta_1$ , %	$\delta$ , %
120	12,7	0,20	4,5	14,4	18,9
130	11,7	0,22	7,1	19,0	26,1
160	9,5	0,27	8,0	10,8	18,8
180	8,45	0,30	1,8	6,7	8,5
195	7,8	0,32	3,8	8,3	12,2
200	7,6	0,34	3,6	6,2	9,8
250	6,1	0,41	12,2	18,4	30,6
280	5,43	0,45	2,0	16,2	18,1
300	5,06	0,49	4,0	19,4	23,6
350	4,35	0,56	5,7	14,8	20,5

2. При увеличении частоты не наблюдается заметного роста погрешности  $\delta_2$ . Это подтверждает теоретический вывод, что на высоких частотах общая погрешность определяется величиной  $\delta_1$ . Погрешность  $\delta_2$  не должна заметно расти с увеличением частоты, так как хотя с одной стороны, диаграммы направленности становятся более неравномерными и сильнее отличаются друг от друга, но с другой стороны величина отражений падает. При уменьшении частоты величина отражений растет, но диаграммы направленности стремятся к круговым и мало отличаются друг от друга.

3. Погрешность  $\delta_1$  во всех случаях (кроме частоты 120 кГц) больше первого отражения, выраженного по амплитуде в процентах от прямой волны, а на более высоких частотах и суммы всех отражений. Таким образом, погрешность  $\delta_1$ , связанная с влиянием отраженных волн из-за неточности установки координат, является определяющей в величине общей погрешности и имеет тенденцию к росту с увеличением частоты, что подтверждает соответствующие теоретические выводы.

4. Общая погрешность сличения приемников, которая может возникнуть при наличии отраженных волн из-за неодинаковости диаграмм направленности и неточности установки координат сличаемых приемников, всегда значительно превышает величину первого отражения (в процентах от прямого сигнала) в данном диапазоне частот.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дрейзен И. Г. Электроакустика и звуковое вещание, М., Связьиздат, 1961, стр. 431.

2. Резников А. Е. Методика сличения приемников и определения их диаграмм направленности в стоячей волне (см. наст. сборник).

Статья поступила в июне 1962 г.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
А. Н. Кристалевич и Т. А. Пустовалова. Работы по обеспечению единства аудиометрических измерений . . . . .	5
И. Г. Русаков. О выражении и измерении показателей шума . . . . .	13
А. Н. Голенков. Об одном специфическом требовании к пьезоэлектрическим приемникам инфразвука для воды . . . . .	20
А. Н. Голенков и С. Г. Голубь. Опыт применения индикатора малых смещений в диапазоне от инфразвука до 300 гц . . . . .	24
Д. З. Лопашев. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне . . . . .	31
Л. П. Блинова. Установка для измерения скорости распространения звука в воде . . . . .	41
А. Е. Резников. Методика сличения акустических приемников и определения их диаграмм направленности в поле стоячей волны . . . . .	46
В. Л. Власов. О систематической погрешности сличения акустических приемников, связанной с отраженными волнами . . . . .	59

Редактор изд-ва Л. В. Ярова. Техн. редактор А. Е. Матвеева.  
Корректоры: Т. М. Короткова, Г. М. Фролова.

Т-08804. Стандартгиз. Москва. Сдано в набор 11/1 1963 г.  
Подп. к печати 21/VI 1963 г. Формат 70×108<sup>1/16</sup>. 4,5 печ. листов. 6,15 усл. печ. листов.  
Тир. 1 000 экз. Цена 43 коп. Зак. 82

Типография Госхимиздата. Москва. Угрешская, 12.

nr.  
3

5  
13

20

24

31

41

46

59

OB.

