ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
СОЮЗА ССР

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

# ХАРАКТЕРИСТИКИ И ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНОВ ДЛЯ РАБОТЫ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ от 0,5 до 15 МГц

ГОСТ 8.555—91
(МЭК 866—87)

Издание официальное

КОМИТЕТ СТАНДАРТИЗАЦИИ И МЕТРОЛОГИИ СССР
Москва

УДК 681.883 : 006.354 Группа Т88.9

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

Государственная система обеспечения единства измерений

# ХАРАКТЕРИСТИКИ И ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНОВ ДЛЯ РАБОТЫ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 0,5 ДО 15 МГц

Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0 5 MHz to 15 MHz

ОКСТУ 6329

**ГОСТ 8.555—91 (МЭК 866—87)**

Дата введения 01.07.92

## 1. ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Настоящий стандарт распространяется на гидрофоны, в которых применяются пьезоэлектрические чувствительные элементы, предназначенные для измерения параметров импульсных и непрерывных ультразвуковых полей, генерируемых ультразвуковым медицинским оборудованием в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц.

Стандарт устанавливает требования к конструкции и исполнению стандартных гидрофонов, а также значениям, необходимым для определения их рабочих характеристик, и определяет стандартный метод измерения чувствительности таких гидрофонов.

Стандарт не распространяется на гидрофоны, изготовленные исключительно для обнаружения ультразвуковых импульсов или бурстов (тоновых посылок).

Издание официальное

© Издательство стандартов, 1992
Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен без разрешения Госстандарта СССР

## 2. ЗАДАЧИ

2.1. Определить рабочие характеристики гидрофонов.
2.2. Разработать схему определения параметров гидрофонов.
2.3. Описать процедуру градуировки гидрофонов.

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

3.1. Свободное поле — звуковое поле в однородной и изотропной среде, в которой влияние границ пренебрежимо мало.

3.2. Дальнее поле — звуковое поле на таком расстоянии от источника, где мгновенные значения звукового давления и колебательной скорости практически совпадают по фазе.

Примечание. В дальнем поле звуковое давление создается сферическими волнами, расходящимися от точки, находящейся на излучающей поверхности или вблизи нее. Таким образом, давление, создаваемое источником звука, обратно пропорционально расстоянию от источника.

3.3. Акустический центр — точка на преобразователе или вблизи него, на достаточном удалении от которой излучаемые преобразователем сферические звуковые волны кажутся исходящими из этой точки.

3.4. Гидрофон (или приемник) — преобразователь, на выходе которого возникает электрический сигнал под действием распространяющихся в воде акустических сигналов.

Примечание. Гидрофоны, используемые для измерения высокочастотных ультразвуковых полей, состоят из тонкого пьезоэлектрического элемента, кот. рый монтируют на конце иглоподобного датчика. Активный элемент обычно не превышает 1,0 мм в диаметре. Этот тип гидрофона, определяемый термином «гидрофон», рассматривается в настоящем стандарте. Если же возникает необходимость сказать о более крупном преобразователе, используемом в качестве гидрофона, то в этих случаях применяется и термин «приемник».

3.5. Обратимый преобразователь — преобразователь, который может работать в качестве гидрофона или излучателя; последний представляет собой устройство, которое преобразует электрические сигналы в звуковые.

3.6. Взаимный преобразователь — линейный, пассивный и обратимый преобразователь.

3.7. Напряжение холостого хода гидрофона — напряжение, которое появляется на выходе гидрофона при отсутствии тока через выводы.

Обозначение: $U$, единица измерения: вольт, В.

Примечание. В настоящем стандарте все значения напряжений, токов и звуковых давлений (если это специально не оговорено) представлены в виде средних квадратических значений.

3.8. Чувствительность гидрофона в свободном поле — отношение напряжения холостого хода гидрофона к звуковому давлению

в месте расположения акустического центра гидрофона в невозмущенном свободном поле плоской волны, которое существовало бы в отсутствии гидрофона.

Обозначение: $M$, единица измерения: вольт на паскаль, В/Па.

Примечание. Давление может быть или синусоидальным, или шумовым, отфильтрованным в узкой полосе среднего геометрического между границами частотной полосы, рассматриваемой как данная частота. Частота и условия на выходе, к которым относится чувствительность, должны быть определены.

3.9. Уровень чувствительности в свободном поле — двадцатикратный десятичный логарифм отношения чувствительности в свободном поле $M$ к опорному значению чувствительности $M_{ref}$. Единица измерения: децибел, дБ.

Примечание. $M_{ref} = 1$ В/мкПа.

3.10. Передаточная характеристика по току излучателя на данной частоте — это отношение акустического давления в звуковой волне, в определенной точке, при отсутствии явлений интерференции, к току на входе.

Обозначение: $S$, единица измерения: паскаль на ампер, Па/А.

3.11. Коэффициент взаимности $J$ — отношение чувствительности преобразователя в свободном поле к его передаточной характеристике по току $S$ для любой системы, в которой взаимный преобразователь действует как излучатель и приемник.

Если распространяющиеся звуковые волны аппроксимируются плоскими волнами, коэффициент взаимности принимает значение $2A/\rho c$ и является коэффициентом взаимности для плоской волны.

Обозначение: $J$, единица измерения: ватт на паскаль в квадрате, Вт/Па$^2$.

Примечание. Коэффициент взаимности для плоской волны применяется к распространению плоской волны, реализуемой в дальнем поле преобразователя, но чистые условия дальнего поля не используются при калибровке по п. 7.3.6. Вследствие этого введен поправочный коэффициент (см. п. 7.2.3), который включает допуски для отклонений от условий плоской волны.

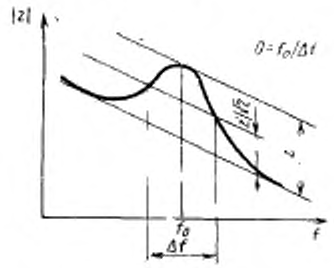
3.12. Диаграмма направленности гидрофона — обычно представляемая графически зависимость чувствительности гидрофона от направления распространения плоской звуковой волны в заданной плоскости, проходящей через акустический центр преобразователя, и на данной частоте.

3.13. Сопротивление утечки на конце кабеля — отношение напряжения на выводах кабеля гидрофона к постоянному току, проходящему через них.

Обозначение: $R_L$, единица измерения: Ом.

3.14. Механическая добротность ($Q$) элемента гидрофона — отношение резонансной частоты к ширине полосы между двумя частотами, при которых полный импеданс излучения гидрофона равен $1/\sqrt{2}$ импеданса на резонансе, как показано на черт. 1.

**Определение механической добротности $Q$ активного элемента по значению измеренного электрического импеданса гидрофона**




$|z|$ — электрический импеданс гидрофона; $f$ — частота

Черт. 1

## 4. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Настоящий стандарт определяет условия измерения высокочастотных ультразвуковых полей в жидкостях, в частности, измерения пространственного и временного распределений давления в полях, излучаемых медицинскими ультразвуковыми преобразователями в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц.

4.1. Выбор метода измерения

Известные и описанные физические методы для количественной оценки полей, генерируемых высокочастотными преобразователями, используемыми в медицинском ультразвуковом оборудовании, применяются для измерений в ультразвуковых полях, излучаемых преобразователями в наполненных водой измерительных бассейнах. Такие методы обеспечивают измерения абсолютных значений локальных или пространственно усредненных определенных параметров ультразвукового поля (например интенсивности, колебательной скорости или амплитуды давления).

Эти методы позволяют проводить измерения в основных единицах физических величин, таких как масса, время и длина. Эти методы также включают измерение силы акустического излучения, использование определенных акустооптических эффектов, калориметрии и измерение посредством методов взаимности. Для полной количественной оценки ультразвукового поля необходимо проводить измерения с достаточной разрешающей способностью как во временной, так и в пространственной областях с тем, чтобы по-

лучить точную и детальную структуру описываемого поля. Для полей с частотными компонентами до 15 МГц требуемые пространственная и временная разрешающие способности имеют порядок значений 0,1 мм и 0,06 мкс соответственно.

4.2. Основы рекомендаций

Настоящий стандарт рекомендует количественно определять медицинские ультразвуковые поля при помощи гидрофонов, которые позволяют измерять мгновенное акустическое давление в любой точке поля. В настоящее время такие гидрофоны обеспечивают наиболее удобный и универсальный метод описания пространственного и временного поведения ультразвуковых полей и позволяют наиболее точно и полно определять параметры поля.

4.3. Влияние конечного размера гидрофона

Активный элемент гидрофона генерирует напряжение на своих электродах, пропорционально среднему акустическому давлению, воздействующему на его поверхность. Если требуется получить хорошее пространственное разрешение, необходимо, чтобы зонд был мал по сравнению со шкалой пространственных изменений давления и небольшим по сравнению с длиной волны наивысшей компоненты частоты в измеряемом ультразвуковом поле. Действующее на чувствительной поверхности гидрофона акустическое давление искажается дифракцией на самом гидрофоне.

Примечание Если зонд сконструирован таким образом, что достаточно хорошо определены размеры его активного элемента, можно устранить зависимость от эффектов усреднения и дифракции зонда при определенной длине волны путем деконволюции (обратной свертки), основанной на известных размерах активного элемента Метод обратной свертки особенно важен в верхней части частотного диапазона, о котором говорится в настоящем стандарте, где акустическая длина волны в воде (0,1 мм при 15 МГц) скорее всего мала по сравнению с размерами элемента гидрофона

4.4. Градуировка гидрофона

Для количественного измерения гидрофоны необходимо градуировать или путем определения их выходного напряжения при помещении их в известное акустическое поле, или методом взаимности. Метод градуировки, предлагаемый в настоящем стандарте, заключается в том, что гидрофоны помещают в известное акустическое поле, создаваемое вспомогательным преобразователем, отградуированным методом самовзаимности.

## 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОФОНА

Гидрофон характеризуется чувствительностью по напряжению в свободном поле и характеристикой направленности. Оба этих параметра изменяются с изменением частоты. Так как гидрофон используется для многих различных по типу измерений, нет необходимости полностью определять их рабочие характеристики для

каждого стандартного устройства. Тем не менее два класса гидрофонов, которые применяются в целях стандартизованных измерений, должны быть определены. Эти классы, как указано ниже, различаются по их основному назначению.

Класс А включает отградуированные точные гидрофоны, необходимые для полной количественной оценки ультразвуковых полей с частотными составляющими до 15 МГц. Они предназначаются для обеспечения средств измерения мгновенного акустического давления в любой точке, включая и те, которые располагаются в (или около) фокальной области медицинских преобразователей большинства типов.

Класс В включает ординарные измерительные гидрофоны, применяемые для относительных измерений, например, для определения пространственных характеристик поля.

Для адекватного определения и контроля рабочих параметров должны выполняться определенные требования в отношении электрической и механической конструкции гидрофонов. Стандартные требования к параметрам конструкции, необходимые для двух отдельных классов, определены в пп. 5.1—5.4.

Примечание. Первоначально могут возникнуть значительные трудности при изготовлении гидрофонов в соответствии с требованиями стандарта, предъявляемыми к рабочим характеристикам гидрофонов класса А. Тем не менее, разработка гидрофонов, соответствующих этому стандарту, необходима в ближайшее время. Изготовителям гидрофонов класса В следует определять те характеристики изделий, которые соответствуют стандарту для класса А.

5.1. Чувствительность

Образцовый гидрофон должен соответствовать следующим характеристикам в отношении чувствительности в свободном поле *М*.

5.1.1. *Уровень чувствительности*

Уровень чувствительности гидрофонов классов А и В должен быть достаточным для измерения акустического давления, равного $3 \cdot 10^3$ Па и выше, с отношением сигнал/шум не менее 6 дБ.

Примечание. На уровень чувствительности гидрофона в свободном поле влияют: размеры активного элемента, тип и длина соединительного кабеля, значение входного импеданса используемых электронных устройств.

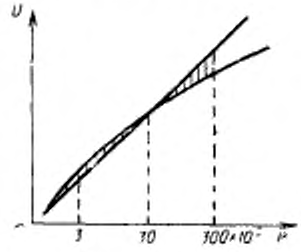
5.1.2. *Линейность*

В динамическом диапазоне от $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^5$ Па выходное напряжение гидрофонов классов А и В должно быть линейным при изменении акустического давления в свободном поле при максимально допустимом отклонении ± 10 %. Это условие удовлетворяется, если на графике зависимости выходного напряжения от акустического давления в свободном поле прямая линия, проходящая через точку со значением напряжения, соответствующим давлению $3 \cdot 10^4$ Па, не отличается от измеренных значений более, чем

на установленный процент допуска (см. черт. 2). Это условие должно выполняться для любой частоты в пределах полосы пропускания данного гидрофона. Если гидрофон остается линейным и для более высоких давлений, превышающих уровень $3 \cdot 10^5$ Па, то должен быть установлен действительный верхний предел линейности.

Примечание На измерения акустического давления в области выше $3 \cdot 10^5$ Па могут повлиять нелинейные эффекты в среде распространения.

**График зависимости выходного напряжения от звукового давления в свободном поле, используемый для оценки линейности гидрофона**




*U* — выходное напряжение; *P* — звуковое давление в свободном поле

Черт. 2

5.1.3. *Частотная зависимость*

Уровень чувствительности в свободном поле должен быть постоянным в установленной полосе частот по крайней мере в две с половиной октавы в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц при максимально допускаемой погрешности 2 дБ для класса А и 4 дБ для класса В. Уровень чувствительности не должен изменяться более чем на ± 0,5 дБ (класс А) и ± 1 дБ (класс В) при любом частотном приращении порядка 100 кГц, попадающем в определенную ранее полосу пропускания.

Примечания:

1. Несмотря на то, что гидрофоны класса А необходимы для полной количественной оценки импульсного поля, удовлетворительные количественные результаты можно получить для полей в непрерывном режиме посредством гидрофона, который не соответствует требованиям, предъявляемым к устройствам класса А в части частотной зависимости, но соответствует всем другим требованиям класса А.

2. На практике наличие отклонений в частотной характеристике необходимо исследовать методом спектрального анализа. Амплитуду любого наблюдаемого отклонения необходимо определять вышеописанным методом градуировки.

5.1.4. *Температурная стабильность*

В температурном диапазоне от 16 до 30 °С уровень чувствительности гидрофонов класса А не должен изменяться более чем на ± 1 дБ по отношению к значению при 23 °С, а в температурном диапазоне от 30 до 40 °С — не более чем на ± 2 дБ по отношению к значению при 23 °С.

5.1.5. *Временная стабильность*

Временная стабильность гидрофонов класса А должна быть такой, чтобы уровень его чувствительности изменялся не более чем на ± 2 дБ в течение одного года при обеспечении работы гидрофона в определенных условиях, соответствующих перечислен-

ным в настоящем стандарте. Из этого следует, что гидрофон нужно повторно градуировать в интервалах времени, которые не должны превышать года.

Примечание. Желательно в некоторых случаях иметь лучшую временную стабильность, но не всегда практично проводить точную градуировку чаще одного раза в год

5.2. Направленность

Для характеристики направленности стандартного гидрофона должны быть удовлетворены следующие условия.

Примечание Чувствительность гидрофонов, рассматриваемая в настоящем стандарте, строго направлена, при этом максимальная чувствительность имеет место в направлении, нормальном по отношению к лицевой плоскости преобразователя

5.2.1. *Симметрия*

Симметрия характеристик направленности гидрофонов классов А и В для верхнего и нижнего пределов установленного частотного диапазона должна быть такой, что, если нормализованный уровень чувствительности, равный — 6 дБ, имеет место в определенном направлении, образующем угол $\Theta$ с направлением максимальной чувствительности (0 дБ), то уровень чувствительности, измеренный во всех других направлениях, лежащих в пределах такого же угла, должен быть в диапазоне — (6 ± 3) дБ.

Примечание Считается нормальным и допустимым выбирать «направление максимальной чувствительности» с тем, чтобы свести до минимума изменения чувствительности по конусу полуугла $\Theta$.

5.2.2. *Эффективный пространственный угол*

Характеристика направленности гидрофона класса А или В, чувствительность которого максимальна в направлении, перпендикулярном к его поверхности, должна быть такой, чтобы при измерении на верхней границе установленной полосы частот в плоскости, содержащей направление максимальной чувствительности, среднее значение двух углов между направлением максимальной чувствительности и тем, при котором нормализованная чувствительность составляет минус 6 дБ, было не менее 15°.

5.3. Электрические характеристики

Чувствительность в свободном поле $M$ гидрофона емкостью $C$ между электродами приводится к значению на конце кабеля $M_c$ в зависимости от емкости $C_c$ экранированного кабеля, соединяющего гидрофон с электронным усилителем, по формуле

$$M_c = \frac{MC}{(C+C_c)} . \qquad (1)$$

Диапазон значений для $C$ от 10 до 150 пФ для гидрофона с пьезоэлектрическим керамическим элементом и 1—5 пФ для гидрофона из пьезоэлектрического пластика, $C_c = 100\ L$ пФ, где $L$ — длина кабеля в метрах.

Нагрузка, представленная в виде входного импеданса любого усилителя, соединенного с гидрофоном, будет уменьшать эффективную чувствительность, и для проведения точных измерений необходимо определить и принять во внимание действительные и мнимые части этого импеданса на конце кабеля. Эта зависимость эффективной чувствительности от присоединенных кабелем электронных цепей особенно важна для гидрофонов, у которых емкость мала по сравнению с емкостями кабеля и входа усилителя, например, для тех гидрофонов, где чувствительный к давлению элемент выполнен из пьезоэлектрических пластиков.

При частотах, превышающих 10 МГц, длина кабеля соизмерима с длиной электромагнитной волны в нем. Во избежание искажений, возникающих в результате трансформации электрического импеданса на этих высоких частотах, необходимо использовать короткие кабели.

Оба класса стандартных гидрофонов должны соответствовать следующим требованиям.

5.3.1. *Длина соединительного кабеля*

Длина кабеля, соединяющего элемент гидрофона с первым каскадом электронного усилителя, должны соответствовать спецификации изготовителя, но не превышать 1,5 м.

5.3.2. *Обнаженные (незащищенные) металлические части*

Обнаженные металлические части корпуса гидрофона и электростатический экран должны соединяться с экраном кабеля.

5.3.3. *Сопротивление утечки*

Сопротивление утечки на конце кабеля должно быть более 100 кОм.

5.4. Механические характеристики

Типовой гидрофон, используемый в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц, имеет цилиндрический диск из пьезоэлектрического материала диаметром менее 1 мм и толщиной менее 0,15 мм. Обычно он крепится при помощи кусочка звукопоглощающего материала, а затем устанавливается на конец тонкой трубки, проволоки или конуса, изготовленных из металла или пластика.

Настоящие требования должны соответствовать классам А и В образцовых гидрофонов в части их механической конструкции и исполнения.

5.4.1. *Акустическая жесткость*

Гидрофон должен быть акустически жестким по отношению к окружающей среде (т. е. его объемная податливость не должна превышать податливости эквивалентного объема воды) для того, чтобы быть прибором, чувствительным к давлению.

5.4.2. *Смачиваемость*

Поверхность гидрофона должна быть гладкой и непористой для того, чтобы при смачивании или полном погружении в воду

на его поверхности не образовывалась воздушная пленка или пузырьки воздуха.

Примечание. Перед тем как использовать гидрофон для измерений, его необходимо почистить и опустить в дегазированную перед этим воду не менее чем на 10 мин до полного и оптимального смачивания его поверхности.

5.4.3. *Сопротивление коррозии*

Все детали (части) гидрофона, соприкасающиеся с жидкостью, должны быть изготовлены из коррозионно-совместимых и коррозионностойких материалов. В частности, следует избегать применения разных металлов в соприкасающихся с жидкостью частях гидрофона, с тем, чтобы избежать возможных явлений гальванической коррозии.

5.4.4. *Отражающая способность*

Активный элемент и корпус гидрофона отражают ультразвуковые волны, искажая первоначальное поле. Для того, чтобы свести до минимума искажение результирующего поля и эффекты интерференции, все поверхности гидрофона, отражающие более 20 % энергии плоской падающей волны (распространяющейся по направлению максимальной чувствительности гидрофона), должны:

а) иметь нормали, направленные под углом не менее 20° к направлению максимальной чувствительности или

б) находиться в круге с радиусом менее 1 мм.

5.4.5. *Внутренняя акустическая реверберация*

Конструкция гидрофона, в частности, его акустическое демпфирование, должна быть такой, чтобы любые задержанные ложные сигналы, возникающие в результате реверберации в самом гидрофоне, были на 20 дБ ниже прямых сигналов, создаваемых падающим акустическим импульсом, состоящим из одного цикла и имеющим частоту в пределах частотного диапазона, определенного для гидрофона.

5.4.6. *Резонанс основной моды колебаний по толщине*

Резонанс основной моды колебаний по толщине закрепленного пьезоэлектрического элемента должен возникать при частоте в два раза выше установленной верхней частоты гидрофона при добротности $Q \leqslant 6$.

Примечание. Это условие необходимо для того, чтобы избежать чрезмерного реагирования гидрофона на основную резонансную частоту, которая в значительной степени искажает измеряемую форму ультразвукового импульса, содержащего относительно небольшую долю составляющих с частотами, превышающими верхний предел установленного для гидрофона частот.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОФОНА

Изготовитель гидрофонов классов А и В обязан представить следующие характеристики.

6.1. Чувствительность по напряжению в свободном поле

6.1.1. Полоса частот, в пределах которой уровень чувствительности гидрофона в свободном поле постоянен, при отклонениях ± 2 дБ (класс А) или ± 4 дБ (класс В).

6.1.2. *Частотная зависимость чувствительности на конце кабеля гидрофона в установленной полосе частот*

Чувствительность должна соответствовать измеренным значениям амплитуды акустического давления, равного $3 \cdot 10^4$ Па. В тех случаях, когда чувствительность определяют в дискретных частотных точках, интервалы должны быть такими, чтобы чувствительность изменялась не более чем на ± 1,5 дБ.

6.1.3. *Температурный коэффициент чувствительности по напряжению в свободном поле*

6.2. Направленность

6.2.1. Ширина диаграммы направленности — угол в плоскости, проходящей через ось максимальной чувствительности, вне пределов которого чувствительность, отнесенная к ее максимальному значению, измеренному на верхней частоте рабочего диапазона, составит менее минус 6 дБ.

6.2.2. Отклонение оси — угловое различие (в пределах точности ± 3°) между направлением геометрической оси гидрофона и направлением максимальной чувствительности

Примечание. Диаграмму направленности гидрофона можно определить следующим образом: испытуемый гидрофон помещают в дальнее поле ультразвукового преобразователя и вращают вокруг оси, которая проходит через активный элемент и перпендикулярна к направлению максимальной чувствительности. Выходное напряжение гидрофона измеряется как функция угла вращения

6.3. Электрические характеристики

6.3.1. Вычисленное значение емкости чувствительного элемента при температуре от 16 до 40 °С.

6.3.2. Емкость на конце кабеля.

6.3.3. Сопротивление утечки на конце кабеля.

6.3.4. Ограничения в электрическом возбуждении, которое может быть приложено к гидрофону при его использовании в качестве излучателя, включая максимальное значение напряжения от пика до пика и скважность импульсов

6.4. Механические характеристики и условия окружающей среды

6.4.1. Материал чувствительного элемента.

6.4.2. Основные размеры чувствительного элемента и гидрофона.

6.4.3. Резонансная частота основной моды по толщине для закрепленного элемента гидрофона.

6.4.4. Типы подвергаемых воздействию окружающей среды материалов (например металл, резина, компаунд и др.).

6.4.5. Максимальная продолжительность погружения в воду (при 37 °С), при которой не происходит значительного искажения рабочих характеристик.

6.4.6. Ограничения по несовместимости материалов (например жидкости, растворы).

6.4.7. Ограничения по механическим нагрузкам, особенно на те детали, которые предназначаются для крепления и юстировки гидрофона.

## 7. ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНА

Рекомендуется стандартные гидрофоны, используемые в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц, градуировать посредством вспомогательного преобразователя, который сам должен быть отградуирован посредством метода самовзаимности. Этот метод градуировки обеспечивает точность, соответствующую назначению гидрофона, в то же время этот метод требует минимального специального оборудования (приложение 1).

7.1. Метод взаимности

Для линейного, пассивного, обратимого электроакустического преобразователя существует хорошо определенная взаимосвязь между чувствительностью в дальнем поле приемника $M$ и передаточной характеристикой по току $S$. Эта зависимость выражена для определенной конфигурации устройств в системе преобразователей в виде определения коэффициента взаимности $J$ (приложение 2).

Все виды градуировки, основанные на принципе взаимности, требуют применения обратимого преобразователя как для излучателя, так и для приемника. Если только изменения, возникающие в акустическом поле, между передачей и приемом известны, то передаточная характеристика и приемная чувствительность преобразователя могут быть определены непосредственно измерением протекающего тока и напряжения принятого сигнала. Очевидное преимущество данного метода в том, что необходимые акустические параметры определяются измерением только электрических величин.

7.1.1. *Метод взаимности с применением трех преобразователей*

Градуировка, в основе которой лежит принцип взаимности, на практике может проводиться разными методами. Метод, обычно используемый в гидроакустике, заключается в применении трех преобразователей.

Этот метод трудно применять на высоких частотах из-за необходимости большой точности установки положения преобразователя и его ориентации, а также из-за сложной природы характеристик направленности преобразователей.

7.1.2. *Самовзаимность*

Градуировка методом самовзаимности состоит в использовании испытательного преобразователя, принимающего излученные им же самим сигналы после их отражения от рефлектора, и требует проведения минимальной геометрической регулировки. Этот метод не всегда применим к высокочастотным гидрофонам, которые из-за своих размеров имеют недостаточную чувствительность для выполнения требования соотношения сигнал/шум в принятом сигнале. (Минимальный диаметр практического излучателя около 2 мм).

7.1.3. *Метод с применением двух преобразователей*

Рекомендуется стандартные гидрофоны градуировать методом с использованием двух преобразователей: гидрофон градуируют в известном поле вспомогательного преобразователя, предварительно отградуированного методом самовзаимности. Посредством этой методики можно обеспечить точность градуировки, соответствующую назначению гидрофонов, но при этой методике нет необходимости производить такую точную юстировку преобразователей, как это требуется в методике градуировки с тремя преобразователями.

Примечание Методики градуировки, описанные в настоящем стандарте, используют тоновые посылки (бурсты) излучения одной частоты Полученные при градуировке данные относятся только к одной этой частоте, а полную кривую частотной зависимости нужно составлять по точкам

7.2. Принцип метода взаимности с применением двух преобразователей

Рекомендуемая процедура градуировки основана на следующих принципах:

7.2.1. *Передаточная характеристика по току на основе метода самовзаимности*

Плоский взаимный преобразователь 1 сначала градуируется методом самовзаимности (см. приложение 2). Кажущуюся передаточную характеристику по току вспомогательного преобразователя в предположении условия измерения идеальной плоской волны $S_1^*$ определяют измерением тока $I_1$ и напряжения принятого сигнала $U_1$ посредством следующих соотношений:

$$S_1^* = \frac{P_1}{I_1} = \left(\frac{U_1}{I_1 J_p}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

и

$$J_p = \frac{2A_1}{\rho c}, \qquad (3)$$

где $P_1$ — звуковое давление в плоской волне, излучаемое вспомогательным преобразователем *1*, Па;

$J_p$ — коэффициент взаимности для плоских волн;

$A_1$ — эффективная площадь поверхности вспомогательного преобразователя 1, м²;

ρ — плотность среды распространения (воды), кг/м³;

$c$ — скорость звука в воде, м/с.

Акустическое давление в поле плоской волны, излучаемой преобразователем 1, становится известным как функция тока.

7.2.2. *Чувствительность в свободном поле по напряжению путем подстановки.*

Гидрофон, который надо отградуировать, помещают в уже известное звуковое поле, генерируемое преобразователем 1, и определяют выходное напряжение $U$ разомкнутой цепи. Чувствительность по напряжению в свободном поле $M^*$ для идеальных условий измерения плоской волны определяют по формуле (4)

$$M^* = \frac{U}{P_1} = \frac{U}{I_1}\left(\frac{I_1 I_0}{U_1}\right)^{1/2} \qquad (4)$$

7.2.3. *Поправка для условий неплоской волны*

Не всегда можно реализовать условия взаимности в либо плоской, либо сферической волне на ультразвуковых частотах из-за сравнимых с длиной волны размеров преобразователей, имеющихся и использующихся на практике, а также из-за относительно высокого акустического поглощения в воде при этих частотах. На практике используются промежуточные условия и учитывается влияние частотно-зависимых факторов, таких как дифракция и затухание, которые влияют на изменение амплитуды акустической волны при ее распространении между излучателем и приемником. В процессе расчета результатов градуировки вводят поправочный коэффициент $k$, где $M = M^*k$. Значение поправочного коэффициента найдено из теоретической модели распределения давления в поле, излучаемом плоским, круглым поршнеобразным источником, в котором скорость в любое время одинакова для всех точек излучающей поверхности (см. приложение 4).

7.3. Условия проведения измерений

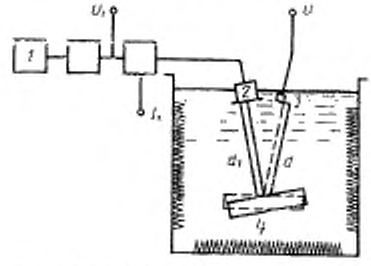
7.3.1. *Общее размещение устройств для проведения измерений*

На черт. 3 приведена схема измерительной установки для проведения градуировки гидрофонов методом взаимности с использованием двух преобразователей.

На черт. 4 изображена блок-схема установки для градуировки методом взаимности с использованием двух преобразователей.

Вспомогательный преобразователь 2 излучает повторяющиеся тоновые посылки импульсов от 10 до 20 циклов в резервуар, наполненный водой, где они отражаются тонким рефлектором из нержавеющей стали. Для градуировки методом самовзаимности вспомогательного преобразователя, последний устанавливают в такое положение, при котором ось излучаемого ультразвукового пучка перпендикулярна к отражающей поверхности; на втором эта-

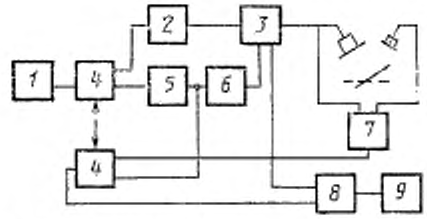
**Схема измерительной установки для проведения градуировки гидрофонов методом взаимности с использованием двух преобразователей**




*1* — импульсный генератор; *2* — вспомогательный преобразователь; *3* — гидрофон; *4* — рефлектор

Черт. 3

**Блок-схема установки для градуировки методом взаимности с использованием двух преобразователей**




*1* — импульсный генератор; *2* — согласующий элемент; *3* — измеритель тока; *4* — сдвоенный переключатель А; *5* — прецизионный аттенюатор; *6* — эквивалентная нагрузка; *7* — переключатель В; *8* — переключатель С; *9* — осциллоскоп

Черт. 4

пе, когда градуируют гидрофон, рефлектор наклоняют (отклоняют) таким образом, чтобы ввести гидрофон в центр отраженного акустического поля. Преобразователь и гидрофон должны быть установлены таким образом, чтобы угол отражения, который используется на втором этапе градуировки, был менее 10° во избежание значительного отклонения коэффициента отражения от его значения при нормальном падении пучка.

*7.3.2. Вспомогательный преобразователь*

Вспомогательный преобразователь должен иметь плоскую круглую активную поверхность диаметром, по меньшей мере, в десять раз больше длины звуковой волны, распространяющейся в воде с частотой, при которой применяется преобразователь. Данный преобразователь должен соответствовать условиям по п. 7.3.4 по своей чувствительности, чтобы соответствовать условиям градуировки методом взаимности. Более того, преобразователь должен обладать свойством создавать поле, которое очень близко совпадает по своим свойствам с полем, теоретически рассчитанным для плоского поршнеподобного источника.

Примечание При выборе подходящего вспомогательного преобразователя рекомендуется экспериментально определить значение эффективного радиуса $a_1$ (п 7.3.3), который не должен отличаться от действительного, физического радиуса активного элемента любого выбранного преобразователя более чем на $^{+2}_{-5}$ %

Хотя при помощи одного вспомогательного преобразователя можно провести удовлетворительные по качеству измерения в ограниченном диапазоне частот, обычно требуется несколько преобразователей для того, чтобы провести полную градуировку для всей ширины полосы.

*7.3.3. Эффективный радиус вспомогательного преобразователя*

Эффективный радиус вспомогательного преобразователя $a_1$ — радиус эквивалентного поршнеподобного источника, для которого пространственное распределение амплитуды акустического давления в дальнем поле очень близко к пространственному распределению самого преобразователя. Эффективный радиус определяют из графической зависимости амплитуды акустического давления в функции от расстояния вдоль оси пучка, полученного посредством гидрофона Описание экспериментального метода, рекомендуемого для определения эффективного радиуса, дано в приложении 3.

*7.3.4. Проверка пригодности преобразователя для использования его в методе взаимности*

Практически достаточно проверить пригодность одного преобразователя для градуировки методом взаимности. Преобразователи проверяют парами: один используют как излучатель, другой как приемник. Сравнивают отношения выходного напряжения в разомкнутой цепи приемника к входному току излучателя, когда функции излучателя и приемника меняются без изменения их положения. Эти две величины не должны отличаться более чем на 10 %. Если разница больше, то значит один преобразователь работает неудовлетворительно. Сравнение двух преобразователей с третьим — обратимым преобразователем — нужно для того, чтобы выяснить, который из двух неисправен.

Примечание. Если преобразователи одинаковы по конструкции, то они могут быть линейными или нелинейными в одинаковой степени и казаться взаимными в ходе измерений, описанных выше. Поэтому измерения следует проводить для нескольких различных типов преобразователей прежде чем принять решение о приемлемости их для использования в процедурах градуировки методом взаимности.

7.3.5. *Рефлектор*

Рефлектор должен быть выполнен в виде диска из нержавеющей стали достаточного диаметра для полного отражения ультразвукового пучка от любого из вспомогательных преобразователей на расстоянии от его поверхности, равном, по меньшей мере, полуторакратному значению $N_1$ ($N_1$ — протяженность ближнего поля), определяемому по формуле

$$N_1 = \frac{a_1^2}{\lambda}, \qquad (5)$$

где $a_1$ — эффективный радиус преобразователя, м;

$\lambda$ — длина звуковой волны в воде при рабочей частоте преобразователя, м.

Толщина рефлектора должна быть такой, чтобы первое отражение от тыльной поверхности не интерферировало с отражением от лицевой стороны при использовании самых низких по частоте колебаний. Он также должен быть плоским до ± 10 мкм, а чистота обработки его поверхности должна быть не более ± 5 мкм.

7.3.6. *Траектория звука*

Во время градуировки рекомендуется, чтобы общая длина траектории звука от вспомогательного преобразователя *2* к рефлектору *4* и обратно к преобразователю *2* ($2d$) (черт. 3), и от преобразователя *2* к гидрофону *3* ($d + d_1$), в 1,5 и 3 раза превышала протяженность ближнего поля $N_1$ для используемого вспомогательного преобразователя *2*.

Примечание. Общая длина траектории между $1{,}5\,N_1$ и $3N_1$ является наиболее удобной для определения коэффициента коррекции (п. 2.3). Использование больших расстояний, особенно при частотах свыше 5 МГц, будет требовать применения значительной коррекции к полученным результатам, т. к. необходимо принимать во внимание явления затухания в среде распространения. Измерения, проводимые в ближнем поле, существенно неточны из-за сложной интерференционной структуры звукового поля.

7.3.7. *Резервуар для проведения испытаний*

Вместимость резервуара для испытаний должна быть достаточной для установления расстояния между вспомогательным преобразователем и рефлектором, равного, по меньшей мере, полуторакратной протяженности ближнего поля для любых используемых преобразователей. Стенки резервуара и поверхность воды должны быть на значительном расстоянии от преобразователя и от гидрофона для того, чтобы любой сигнал, возникающий в результате отражения от этих поверхностей, мог быть задержан по

отношению к основному, прямому сигналу, на время, равное, по меньшей мере, длительности тоновой посылки на самой низкой используемой частоте. По возможности поверхности резервуара должны покрываться звукопоглощающими материалами (резина или шерстяной ковер с плотным ворсом) и их следует устанавливать под углом не менее 10° к плоскости самого отражателя.

Резервуар следует наполнять свежей, дистиллированной или дегазированной водой, которую из-за постоянного поглощения воздуха из атмосферы необходимо менять не реже чем через 48 ч.

Примечание. Воду можно дегазировать выдержкой под атмосферным давлением воздуха, сниженным до 2000 Па или менее, или нагревом ее приблизительно до 80 °С в течение часа.

7.3.8. *Юстировка*

Точное расположение и ориентация преобразователя-гидрофона и рефлектора необходимы, и все устройства для этого должны крепиться на устойчивых жестких держателях, которые позволяют проводить соответствующую регулировку. Рекомендуется гидрофон и преобразователь снабжать специальными устройствами, позволяющими проводить их поперечное смещение с точностью до ± 0,1 мм, и независимо регулировать их ориентацию вокруг их акустического центра с точностью ± 0,05° и точнее. Отражатель необходимо вращать в пределах угла, равного приблизительно 10°, вокруг оси параллельно его поверхности и перпендикулярно к линии, соединяющей акустические центры гидрофона и вспомогательного преобразователя (черт. 3).

7.4. Метод измерения

7.4.1. *Измерение электрических величин*

Чтобы исключить необходимость применения образцовых измерительных приборов для измерения напряжения и тока, которые нельзя непосредственно применять для измерения тоновых посылок (бурстов), рекомендуется $I_1$, $U_1$, $U$ измерять на основе опорного напряжения $U_{ref}$ при известном значении сопротивления $R_0$ посредством точного аттенюатора с выходным импедансом, равным $R_0$.

Тогда

$$U_1 = a_{U_1} U_{ref}, \tag{6}$$

$$U = a_U U_{ref}, \tag{7}$$

$$I_1 = \frac{a_{I_1} U_{ref}}{R_0}, \tag{8}$$

где $a_{U_1}$, $a_U$, $a_{I_1}$ — константы пропорциональности. Подставив выражения (6), (7), (8) в (4), получаем

$$M^* = \frac{a_U}{a_{I_1}} \left( \frac{R_0 a_{I_1} J_p}{a_{U_1}} \right)^{1/2} \tag{9}$$

Таким образом, абсолютное значение чувствительности гидрофона в свободном поле можно определить, не зная значение $U_{ref}$, полагая при этом, что $U_{ref}$ остается постоянным в течение всего периода измерений, и зная абсолютное значение $R_0$. Рекомендуется, чтобы значение $R_0$ было известно с точностью $\pm 1$ % для всего частотного диапазона, в котором оно применяется.

Детали процедуры, рекомендуемой для определения $a_{U_t}$, $a_U$ и $a_{U_1}$, даны в приложении 3.

7.5. Расчет результатов

7.5.1. *Поправочный коэффициент*

При расчете результатов градуировки необходимо оценить допуск на любые отклонения между идеальными граничными условиями, принятыми в формуле (9), и теми условиями, которые существуют на практике. Как было описано в п. 7.2.3, это можно сделать введением поправочного коэффициента $k$, тогда истинная чувствительность гидрофона в свободном поле будет $M*k$.

Полностью оценка поправочного коэффициента описана в приложении 4. Однако в определенных специфических условиях, соответствующих методам градуировки, рекомендуемой настоящим стандартом, можно получить значительное упрощение определения $k$.

Для этого необходимо, чтобы:

а) отношение диаметра вспомогательного преобразователя к диаметру гидрофона было больше 5;

б) все измерения проводились при общей длине акустического пути, лежащего в пределах между полуторной и тройной протяженностями ближнего поля вспомогательного преобразователя.

Определяя нормализованное расстояние $S$ как длину акустического пути между вспомогательным преобразователем и гидрофоном, деленную на протяженность ближнего поля, условие б) можно выразить так:

$$1{,}5 < \frac{2d_1\lambda}{a_1^2} < 3 \text{ и } 1{,}5 < S < 3, \qquad (10)$$

где

$$S = (d_1 + d)\frac{\lambda}{a_1^2}. \qquad (11)$$

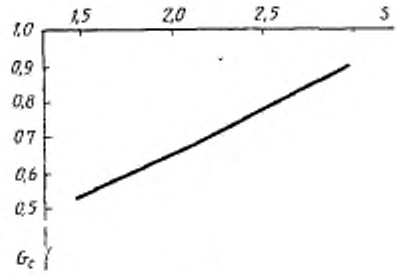
В этих условиях $k$ можно вычислить по формуле

$$k = G_c \frac{k_U^{1/2}}{k_U} e^{\alpha d}, \qquad (12)$$

где $G_c$ — (функция только $S$) дает поправку на изменения в принятом сигнале, обусловленные дифракционными эффектами при распространении ультразвука скорее в виде пучка, а не бесконечно плоской волны. Эти явления представляют отклонения условий

реальной системы от условий плоской волны, принятых при получении $J_p$, тогда $J_p \cdot G_c^2$ можно рассматривать как коэффициент взаимности для промежуточных условий, применяемых в процессе измерений. Значение $G$ как функции $S$ показано на черт. 5.

**Зависимость коэффициента от нормализованного расстояния**




Черт. 5

$\alpha'$ — коэффициент затухания амплитуды ультразвука в чистой, дегазированной воде ($м^{-1}$) определяют при температуре 23 °С по формуле

$$\alpha' = 2{,}2 \cdot 10^{-14} \cdot f^2, \qquad (13)$$

$f$ — частота, Гц.

$k_{U_1}$ — множитель, на который напряжение сигнала вспомогательного преобразователя, действующего как приемник, должно умножаться для получения эквивалентного напряжения разомкнутой цепи. Если условия электрической нагрузки (например выходной импеданс высокочастотного генератора тоновых посылок) неизменны при передаче и приеме, то значение $k_{U_1}$ можно определить, измеряя ток $I_k$, проходящий через цепь, когда преобразователь закорачивают. Тогда

$$k_{U_1} = \frac{I_1}{I_k}. \qquad (14)$$

Примечание. Если имеется электронная ключевая схема, отключающая генератор от преобразователя сразу же после окончания радиоимпульса, и используется схема детектирования с высоким сопротивлением, то значение $k_{U_1}$ можно принять за единицу.

$k_U$ — множитель, на который напряжение гидрофона должно умножаться для того, чтобы получить эквивалентное значение разомкнутой цепи. Обычно гидрофон градуируют при электрической нагрузке, которая предназначена для гидрофона конкретного применения, и в коррекции чувствительности по напряжению для разомкнутой цепи нет необходимости.

7.6. Точность градуировки

Рекомендуемая методика измерений и упрощенный расчет поправочного коэффициента обеспечивают градуировку гидрофонов в диапазоне частот от 0,5 до 15 МГц при общей систематической погрешности менее ±1,5 дБ от уровня чувствительности по напряжению. Методика способна обеспечить случайную погрешность измерений, значительно меньшую ±1,5 дБ.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 1*
*Справочное*

## ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ВЗАИМНОСТИ

Гидрофон обычно градуируют так: гидрофон помещают в акустическое поле в точке, в которой известно абсолютное значение одного из параметров этого поля, например амплитуды акустического давления, которую определили ранее.

В литературе описаны многочисленные методы определения абсолютных параметров акустического поля. Некоторые из них, такие как калориметрия или измерение радиационного давления посредством высокочувствительных весов, включают определение физических величин, усредненных по времени и по всему акустическому пучку (или его значительной части). Другие методы, такие как интерферометрия и измерение радиационного давления, оказываемого на небольшие сферические мишени (шарики), определяют значения пространственного распределения физических величин. В этих методах параметр поля определяется по степени влияния поля, генерируемого ультразвуковым преобразователем, на какой либо чувствительный элемент. Методом взаимности определяют влияние поля на второй преобразователь, а также на преобразователь, который сам генерирует поле.

Имеется множество методов абсолютного измерения параметров акустического поля. При условии некоторых допущений о распространении акустических волн все эти параметры взаимосвязаны. Параметры, определенные различными путями и методами, фактически эквивалентны.

Абсолютное определение амплитуды акустического давления в одной точке поля для градуировки гидрофона можно произвести одним из многих экспериментальных методов; выбор их можно сделать, лишь исходя из удобства применения того или иного метода. Метод интерферометрии является наиболее подходящим и прямым методом измерения, но его довольно сложно осуществить, и поэтому он широко не применяется. Из остальных методов только два имеют определенные преимущества перед другими: метод взаимности и метод измерения общей выходной мощности в сочетании с определением пространственного распределения акустического давления в пучке при помощи гидрофона. Для того, чтобы объяснить, почему именно метод взаимности избран как основной метод измерения в настоящем стандарте, целесообразно разобрать основные черты этих двух альтернативных подходов.

Полное усредненное по времени выходное значение мощности можно определить при помощи либо весов, измеряющих радиационное давление, либо калориметром. В основе принципа измерения радиационного давления при помощи весов лежит тот факт, что силу, приложенную к отражающей мишени, помещенную в ультразвуковом поле, можно соотнести с общей, усредненной по времени акустической мощностью в той части, где пучок падает на мишень. Было разработано большое число систем, в которых применялись мишени различных типов и использовались различные методы измерения силы. Точность, получаемая при измерениях, зависит от конструкции и режима работы, но усредненный по времени уровень полной мощности выше 10 мВт можно определить при общей погрешности не более ± 5 %. Преимущество метода измерения радиационного давления состоит в том, что он не зависит от частоты ультразвукового пучка при условии соответствующей коррекции на поглощение на акустическом пути между лицевой поверхностью преобразователя и мишенью. Основной недостаток этого метода заключается в том, что силы, которые присутствуют в данном случае, очень невелики и требуют очень чувствительных измерительных систем, на которые могут влиять окружающие условия, такие, как изменения температуры и вибрации.

Альтернативным является калориметрический метод, используемый для определения полной усредненной по времени мощности. Принцип его прост: преобразование акустической энергии в тепловую, которую определяют обычным калориметрическим методом. Как было показано, неточности при данном методе достигают ± 7 %. Недостаток этого метода заключается в том, что необходимо много времени для проведения измерений, а сами калориметры являются довольно сложными устройствами, которые, в свою очередь, требуют совершенствования и поддержания в рабочем состоянии, если их использовать в качестве основных устройств при градуировке.

Для того, чтобы применить метод измерения полной усредненной по времени выходной мощности преобразователя для градуировки гидрофона, необходимо интегрировать относительную интенсивность акустического поля, производимого преобразователем в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения. Это позволяет определять абсолютное значение акустической интенсивности в заданной точке поля. Обычно выбирают точку максимальной интенсивности, т. к. ее можно найти многократно, и используют сканируемую плоскость в дальнем поле, где флуктуации скорости и плотности находятся в одной фазе. Сканирование поля требует только относительных измерений, и можно использовать гидрофон класса В, который должен быть мал по сравнению с длиной звуковой волны. В теории должна быть описана процедура определения закона распределения звукового давления в поперечном сечении, перпендикулярном к направлению распространения звука. Там, где возможно предположить цилиндрическую симметрию поля преобразователя, распределение давления может быть получено одномерным сканированием.

Экспериментальные возможности определения распределения давления связаны с точным перемещением гидрофона в поле и измерениями в динамическом диапазоне не менее 40 дБ.

Когда гидрофон, который нужно отградуировать, помещают в поле, необходимо сделать коррекцию для возможного пространственного усреднения, которое имеет место из-за конечных размеров как сканирующего, так и градуируемого гидрофонов, при этом выходная мощность преобразователя и распределение давления должны оставаться неизменными на протяжении всех измерений.

Суммарная погрешность градуировки гидрофона данным методом около ± 12 %.

Метод взаимности требует более простых экспериментальных приспособлений по сравнению с другими методами, описанными выше, и не включает сложных измерительных процедур (метод, описанный в приложении 2). Электрические и акустические поправки необходимо вводить в данные, и анализ результатов оказывается довольно сложным. Используемый преобразователь должен соответствовать типу, близкому к поршнеподобному с тем, чтобы обеспечить оценку поправочных коэффициентов с достаточной точностью, а также должен создавать стабильные и воспроизводимые поля в течение всего периода измерений. Окончательные погрешности больше тех, которые получаются по методике усредненной по времени мощности или по методу построения профиля пучка на частотах выше 5 МГц из-за того, что имеет место несоответствие в рабочем режиме преобразователя. При частотах ниже 5 МГц погрешности сравнимы с погрешностями, получаемыми при других методах. При усовершенствовании конструкции преобразователя его погрешности можно снизить. Метод взаимности — метод абсолютного измерения, в результате применения которого можно получать точностные характеристики, сравнимые с аналогичными, получаемыми другими методами.

Этот метод прост, и его можно реализовать в любой оборудованной для проведения обычных ультразвуковых измерений лаборатории.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 2*
*Справочное*

## ВЗАИМНОСТЬ В ПЛОСКОЙ ВОЛНЕ

Взаимный преобразователь — преобразователь, который удовлетворяет условиям электромеханической взаимности

$$\left|\frac{v}{I}\right| = \left|\frac{U}{F}\right|, \qquad (15)$$

где (при передаче) $v$ — скорость излучающей поверхности преобразователя для входного тока $I$;

$U$ — напряжение разомкнутой цепи, производимое силой $F$, действующей на преобразователь, который в данном случае принимается как жесткий.

После определения передаточной характеристики по току излучателя (п. 3.10) и чувствительности приемника в свободном поле (п. 3.8):

$$S = \left|\frac{P_{tr}}{I}\right| \text{ и } M = \left|\frac{U}{P_{rec}}\right|, \qquad (16)$$

где $P_{tr}$ — акустическое давление в звуковой волне непосредственно перед излучателем при отсутствии явлений интерференции для входного тока $I$;

$P_{rec}$ - акустическое давление в невозмущенном свободном поле плоской волны в месте акустического центра приемника, если его убрать, которое дает напряжение $U$ в разомкнутой цепи.

Для плоской волны давление перед излучателем связано со скоростью однородной поверхности выражением

$$P_{tr} = \rho c v, \qquad (17)$$

где $\rho$ — плотность среды;

$c$ — скорость звука в воде.

Если принять, что акустическая волна распространяется между излучателем и приемником без потерь или без явлений дифракции, как это имеет место в бесконечной плоской волне, распространяющейся в воде без потерь, то

$$P_{tr} = P_{rec} = P. \qquad (18)$$

Сила, действующая на поверхность приемника площадью $A$, в таком случае определяется по формуле

$$F = 2AP. \qquad (19)$$

В принятых граничных условиях плоской волны отношение

$$\frac{M}{S} = \frac{UI}{P^2} = \frac{2A}{\rho c} = J_p \qquad (20)$$

зависит только от площади преобразователя и определяется как параметр взаимности $J_p$ для плоской волны. При известном значении $J_p$ измерение $U$ и $I$ ведет к определению $P$ и, таким образом, $S$ и $M$.

Примечание. Если $I_1$ и $U_1$ — входной ток и измеряемое напряжение для реального преобразователя, передающего и принимающего сигналы тоновых посылок в воде, которые отражаются от плоской границы раздела вода — металл, то тогда

$$\frac{M_1^*}{S_1^*} = \frac{U_1 I_1}{P^2} = J_p, \qquad (21)$$

где $M_1^*$ и $S_1^*$ — кажущиеся значения чувствительности по напряжению в свободном поле и передаточная характеристика преобразователя по току в предположении идеальных условий измерения плоской волны.

Таким образом, из уравнений (16) и (21) имеем:

$$S_1^* = \left( \frac{U_1}{I J_p} \right)^{1/2}, \qquad (22)$$

При любых практических измерениях на частотах, которые рассматриваются в настоящем стандарте, условия плоской волны невозможно реализовать и поэтому необходимо сделать допущение для разницы между $P_{tr}$ и значением $P_{rec}$, усредненным по активной поверхности приемника.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 8*
*Справочное*

## ДЕТАЛИ РЕКОМЕНДУЕМЫХ ПРОЦЕДУР ИЗМЕРЕНИЙ

### Оценка эффективного радиуса вспомогательного преобразователя

Эффективный радиус $a_1$ вспомогательного преобразователя определяется из зависимости изменения амплитуды акустического давления в функции от расстояния вдоль акустической оси при работе преобразователя в непрерывном режиме. Это изменение можно измерить неотградуированным гидрофоном в поле тоновых посылок, обеспечив при этом, чтобы диаметр активного элемента гидрофона был, по крайней мере, в 10 раз меньше диаметра вспомогательного преобразователя, а тоновые посылки были в достаточной степени продолжительны для того, чтобы установились условия стационарного режима измерений. Экспериментально определяемое акустическое распределение сравнивается с распределением, рассчитываемым для идеального поршнеподобного источника, для которого излучающая поверхность движется с пространственно однородной скоростью v. Радиус теоретического источника $a_1$ затем варьируется для получения оптимального соотношения между экспериментальными данными и моделью поля. Теоретическое распределение давления на оси для поршнеподобного источника дано выражением

$$\frac{P}{P_{1t}} = 2\left| \sin\frac{\pi}{\lambda}\left[(Z^2+a_1^2)^{1/2}-Z\right]e^{-\alpha Z_t}\right|, \qquad (23)$$

где $P$ — амплитуда акустического давления на расстоянии $z$ от излучателя вдоль акустической оси;

$P_{1t}$ — амплитуда давления плоской волны, определяемая выражением $P_{1t} = \rho cv$;

$\lambda$ — длина звуковой волны в воде;

$\alpha'$ — коэффициент затухания амплитуды ультразвука в чистой, дегазированной воде ($\alpha' = 2{,}2\times10^{-14}\cdot f^2$) при температуре 23 °С. На практике значения $P_{1t}$ и $a_1$ варьируются для получения оптимального соответствия между экспериментальными и теоретическими данными.

Примечание. Один из методов получения этого соответствия заключается в следующем. Если $Y_i$ $(Z_i)$ определено как 20 $\lg V_i$, где $V_i$ — амплитуда напряжения, производимого гидрофоном на расстоянии $Z_i$ от преобразователя; а $Y_i'$ $(Z_i)$ как

$$20\lg\left|2\sin\frac{\pi}{\lambda}\left[(Z_1^2+a_1^2)^{1/2}-Z_i\right]e^{-\alpha Z_i}\right|, \qquad (25)$$

тогда параметр $\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2$,

где

$$X_i = Y_i(Z_i) - Y_i'(Z_i) - \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} Y_i(Z_i) - \sum_{i=1}^{n} Y_i'(Z_i)\right] \qquad (26)$$

минимизируется по $a_1$. Эта процедура приведения в соответствие применяется только к данным, для которых $Z$ лежит между $1{,}5Z_m$ и $3Z_m$, где $Z_m$ — расстояние от поверхности преобразователя до самого дальнего максимума. Определив

таким образом $a_1$, затем проверяют успешность применения модели в виде реального поля путем оценки $X_m(Z_m)$. Значение $X_m(Z_m)$ менее 0,5 дБ берется для того, чтобы определить, что модель удовлетворительна.

### Оценка коэффициента ослабления напряжения

Коэффициенты ослабления напряжения $a_{U_1}$, $a_U$ и $a_{I_1}$ определяют с помощью единственного прецизионного аттенюатора, включаемого между источником опорного напряжения и его известной стандартной нагрузкой $R_0$ (см. черт. 4)

Для $a_{U_1}$ падение напряжения на $R_0$ отображается соответственно как $U_1$ на осциллоскопе, а аттенюатор устанавливается на такое значение, при котором сигналы имеют одинаковую амплитуду. Таким образом установка аттенюатора обеспечивает прямое измерение $a_{U_1}$. $a_U$ определяют путем сравнения напряжения на $R_0$ с $U$.

Значение $a_{I_1}$ также определяют, регулируя аттенюатор, но в этом случае сравнивают и выравнивают два сигнала — ток, поступающий в преобразователь, и ток, проходящий через $R_0$. За этими величинами наблюдают, пропуская их попеременно через один и тот же датчик тока, выход которого наблюдается на осциллографе. Абсолютную градуировку датчика тока производить не надо.

Примечание. В простой цепи, показанной на черт. 4, используется тот же генератор тоновых посылок, который возбуждает преобразователь и обеспечивает $U_{ref}$. На практике удобнее поместить второй аттенюатор между переключателем $A$ и преобразователем для того, чтобы можно было протекающий ток регулировать независимо от $U_{ref}$.

Процедура измерений, в ходе которой используют схему цепи, приведенной на черт. 4, заключается в следующем.

1. В положении рефлектора, установленного на отражение сигнала на вспомогательный преобразователь, и при переключателях $B$ и $C$ в положении 1, определяют $a_{I_1}$, выравнивая аттенюатором напряжения, регистрируемые в двух положениях переключателя $A$.

2. В положении рефлектора и переключателя $B$, описанном в п. 1, переключатель $C$ переключают в положение *2* и снова определяют $a_{U_1}$, выравнивая аттенюатором сигналы при двух положениях переключателя $A$.

Примечание. Сигналы, регистрируемые в положении *1* ($U_1$), будут задержаны относительно времени тоновой посылки на время распространения акустического импульса в водном резервуаре. В связи с этим необходимо использовать подходящий триггер задержки.

3. В положении рефлектора, отрегулированном таким образом, чтобы направить центр отражаемого пучка на гидрофон, повторяют процедуру, описанную в пп 1 и 2. Это обеспечивает второе измерение $a_{I_1}$ и соответствующее значение $a_U$. Используя значение $a_{I_1}$ в виде квадратного корня уравнения (9), как показано в п. 7.4 настоящего стандарта, нет необходимости поддерживать опорное напряжение $U_{ref}$ постоянным во время регулировки рефлектора.

Для того, чтобы убедиться, что отраженный пучок отцентрирован либо на преобразователь для условий (пп. 1 и 2), либо на гидрофон для условия (п. 3), весьма важно тщательно отрегулировать положение этих устройств для получения максимального регистрируемого сигнала. Юстировку проводят регулировкой положения этих устройств в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения падающих акустических волн и их ориентации относительно их акустических центров. Важно, чтобы эти юстировки проводились с точностью порядка одной длины волны и 0,05° соответственно.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 4*
*Справочное*

## ОЦЕНКА ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Более общий поправочный коэффициент по сравнению с описанным в п. 7.5 стандарта рассчитывают по формуле

$$K = \left(\frac{k_{U_1} G_1}{r}\right)^{1/2} \cdot \frac{e^{\alpha' d}}{k_U G_2}, \qquad (27)$$

где $G_1$ — поправка, которую необходимо принимать в расчет из-за изменений (профиля) акустической волны при излучении и приеме во время градуировки вспомогательного преобразователя методом самовзаимности;

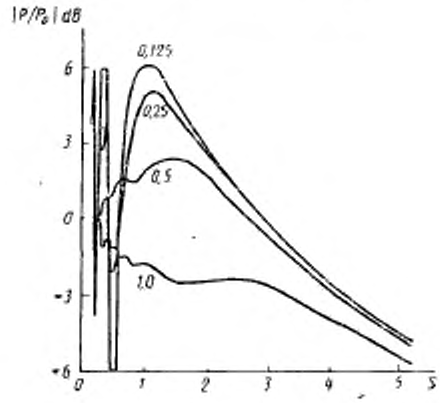
$G_2$ — поправка, которую необходимо принимать в расчет из-за аналогичных изменений при градуировке гидрофона в известном поле, генерируемом вспомогательным преобразователем;

$r$ — амплитудный коэффициент отражения для границы раздела отражатель/вода. Другие параметры определены в п. 7.5.

Значения $G_1$ и $G_2$, применяемые в любой измерительной системе, равны отношению акустического давления, усредненного по поверхности приемника (или гидрофона), к тому же значению в плоской волне непосредственно перед излучателем (при отсутствии интерференции), в виде функции от акустической длины пути.

Отношения $|P/P_0|$ в зависимости от нормализованного расстояния, теоретически для различных отношений радиусов приемника и излучателя, в логарифмическом виде показаны на черт. 6. (Нормализованное расстояние — рас-

**Зависимость среднего давления $|P/P_0|$ от нормализованного расстояния $S$ для преобразователей различных размеров**




Черт. 6

стояние от поверхности преобразователя, деленное на протяженность ближнего поля). Значение $G_1$ относится к вспомогательному преобразователю, используемому и как излучатель, и как приемник, и получается из графика, соответствующего отношению диаметров, равному единице. $G_2$ относится к волне, излучаемой вспомогательным преобразователем и принимаемой гидрофоном, и для его определения необходимо применять график, соответствующий отношению их диаметров. Если следовать рекомендациям данного стандарта, то эти отношения во всех случаях менее 0,2.

Значение $1/r$ для границы раздела вода/нержавеющая сталь равно 1,033.

Остальные значения, используемые в поправочном коэффициенте, приведены в п. 7.5 настоящего стандарта.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. **ВНЕСЕН** Министерством судостроительной промышленности СССР

2. **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ** Постановлением Государственного Комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 21.06.91 № 957
   Настоящий стандарт подготовлен методом прямого применения международного стандарта МЭК 866—87 «Характеристики и калибровка гидрофонов для работы в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц» и полностью соответствует ему

3. Срок проверки — 1997 г.
   Периодичность проверок — 5 лет

4. **ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ**

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ . . . . . 1
2. ЗАДАЧИ . . . . . 2
3 ОПРЕДЕЛЕНИЯ . . . . . 2
4. ОБЩАЯ ЧАСТЬ . . . . . 4
4.1. Выбор метода измерения . . . . . 4
4.2. Основы рекомендаций . . . . . 5
4.3. Влияние конечного размера гидрофона . . . . . 5
4.4. Градуировка гидрофона . . . . . 5
5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОФОНА . . . . . 5
5.1 Чувствительность . . . . . 6
5.2. *Направленность* . . . . . 6
5.3. Электрические характеристики . . . . . 8
5.4. Механические характеристики . . . . . 9
6. ПЕРЕЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОФОНА . . . . . 10
6.1 Чувствительность по напряжению в свободном поле . . . 11
6.2. Направленность . . . . . 11
6.3 Электрические характеристики . . . . . 11
6.4. Механические характеристики и условия окружающей среды . 11
7. ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНА . . . . . 12
7.1 Метод взаимности . . . . . 12
7.2. Принцип метода взаимности с применением двух преобразователей 13
7.3. Условия проведения измерений . . . . . 14
7.4. Метод измерения . . . . . 18
7.5. Расчет результатов . . . . . 19
7.6. Точность градуировки . . . . . 21
Приложение 1. Обоснование метода взаимности . . . . . 22
Приложение 2. Взаимность в плоской волне . . . . . 24
Приложение 3. Детали рекомендуемых процедур измерений . . . 26
Приложение 4. Оценка поправочного коэффициента . . . . . 28

Редактор *В. М. Лысенкина*
Технический редактор *Г. А. Теребинкина*
Корректор *А. И. Зюбан*

Сдано в наб. 19.08.91 Подп. в печ. 20.12.91 Усл. п. л. 2,0. Усл. кр.-отт. 2,13. Уч.-изд. л. 1,98.
Тир. 635

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123557, Москва, ГСП,
Новопресненский пер., 3
Калужская типография стандартов, ул. Московская, 256. Зак. 1600