*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVI, вып. 2, 1963 г.*

# ТЕХНИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ЗВУКОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МАРКШЕЙДЕРСКИХ РАБОТАХ

*В. Б. Аранович, А. А. Гурич, Г. А. Кротов, Л. Н. Руднев*

При применении звуколокационной аппаратуры в маркшейдерских работах естественно возникает вопрос о ее точности и, следовательно, возможности использования для решения конкретных инженерных задач. В настоящее время — в период разработки и становления звуколокационного метода измерений в маркшейдерском деле — этот вопрос приобретает особую актуальность.

Исследование точности звуколокационных измерений предусматривает разрешение вопросов: 1) о возможных видах и величинах технических ошибок звуколокационных измерений; 2) о характере и закономерностях изменения ошибок аналогии, возникающих при звуколокационных измерениях.

## Сущность звуколокационного метода измерения расстояний и виды технических ошибок измерений

Звуколокационный метод определения расстояний основан на измерении времени распространения звукового сигнала от звуколокатора до объекта и обратно (рис. 1). Генератор возбуждает излучатель *И* и одновременно дает на индикатор сигнал синхронизации, отмечающий момент посылки звукового импульса излучателем. Звуковой импульс, отраженный от объекта локации, воспринимается приемником *П* и подается через приемный усилитель на индикатор, фиксирующий момент возвращения импульса. Усилитель с приемником составляют приемный тракт звуколокатора.

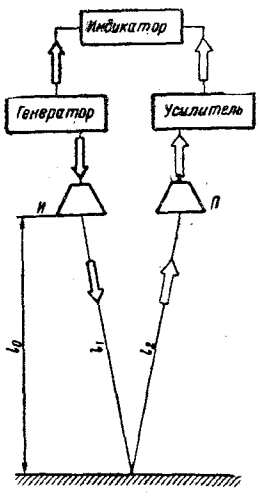



Рис. 1. Типовая функциональная схема звуколокатора

Измеренное расстояние

$$l_0 \cong \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{(t_1 - t_0)}{2} c, \qquad (1)$$

где $l_1$ и $l_2$ — фактические пути прохождения звука в среде;

$t_1$ и $t_0$ — моменты приема и излучения сигнала;

$c$ — скорость распространения звука в среде.

Из выражения (1) следует, что звуколокационные измерения возможны, если известна скорость распространения звука в среде, а точность этих измерений определяется точностью измерения временно́го интервала $(t_1 - t_0)$ и скорости $c$. Ошибки измерений, вытекающие из (1), характеризуют погрешность звуколокационных измерений,

не связанную с формой лоцируемой поверхности. Их называют техническими ошибками измерений.

Технические ошибки звуколокационных измерений можно подразделить на случайные и систематические. Случайные ошибки не могут быть исключены из результатов измерений, но должны быть определены при решении конкретных задач. Их величина характеризует точность полученных результатов. Систематические ошибки, независимо от источника возникновения, должны по возможности учитываться и исключаться из результатов измерений, причем делать это надо как в процессе измерений (выбор соответствующей методики работ), так и во время камеральной обработки результатов.

## Характеристика основных технических ошибок

**Ошибка разности натурного и приборного уровней отсчета.** *1. Ошибка рефлектора преобразователя (излучателя и приемника).* В практике звуколокационных измерений применяются два вида преобразователей (рис. 2): стержневые *I* и рефлекторные *II*. Излучающая поверхность *И* стержневого преобразователя является одновременно и его формирующей поверхностью *Ф* (поверхность, определяющая направление распространения звуковой волны). У рефлекторного преобразователя формирующей поверхностью является выходное сечение рефлектора. Таким образом, в рефлекторном преобразователе звуковая волна

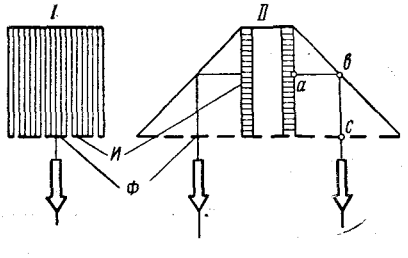



Рис. 2. Стержневые и рефлекторные преобразователи

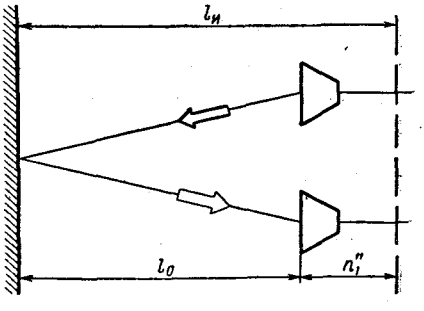



Рис. 3. Ошибка положения формирующей поверхности

проходит дополнительный путь *авс* (см. рис. 2), который необходимо учитывать как систематическую ошибку. Величина поправки $n_1'$ определяется непосредственным измерением элементов преобразователя. Расстояние, фиксируемое звуколокатором,

$$l_п = l_0 + n_1'. \qquad (2)$$

*2. Ошибка положения формирующей поверхности.* В ряде случаев (рис. 3) формирующая поверхность преобразователей не совпадает с началом отсчета в натуре. Например, при звуколокационном измерении глубины водоема началом отсчета в натуре является поверхность воды, а преобразователи помещаются на некоторой глубине. Величина поправки $n_1''$ определяется непосредственным замером. Измеряемое расстояние

$$l_и = l_0 + n_1'' \qquad (3)$$

или, учитывая (2) и (3),

$$l_и = l_п - n_1' + n_1''.$$

Таким образом, общая поправка на разность приборного и натурного уровней отсчета

$$n_1 = n_1'' - n_1'. \qquad (4)$$

**Ошибка базы акустической системы.** При акустических системах, состоящих из двух независимых преобразователей (излучающего и приемного), расстояние $l_п$, фиксируемое звуколокатором, содержит систематическую ошибку, возникающую за счет базы акустической системы $в$. Как очевидно из рис. 4,

$$l_0 = l_п \cos\alpha = l_п \sqrt{1 - \left(\frac{в}{l_п}\right)^2}. \quad (5)$$

На практике $\left(\text{при } \frac{2в}{l_п} \leqslant 0{,}5\right)$ искомое расстояние $l_0$ часто можно определять более простым выражением

$$l_0 = l_п - \frac{в^2}{2l_п}, \quad (6)$$

полученным, как первый член разложения $l_п \sqrt{1 - \frac{в^2}{l_п^2}}$ из формулы Ньютона. Поправка за счет влияния базы при этом составляет

$$n_2 = \frac{в^2}{2l_п}. \quad (7)$$

Если $\frac{2в}{l_п} \leqslant 0{,}1$, то $n_2$ так незначительна по сравнению с измеряемым расстоянием, что учитывать ее не имеет смысла.

**Ошибка непостоянства скорости распространения звука.** Если имеет место строгое постоянство скорости распространения звука во всем объеме среды, где проводятся измерения, то величина ее может быть определена с точностью, достаточной для решения любых маркшейдерских задач. В практике такие условия встречаются чрезвычайно редко. Обычно скорость звука изменяется как вдоль пути его распространения, так и от измерения к измерению — вдоль пути движения акустической системы. Так как в маркшейдерских задачах почти не встречается одновременного существования значительных градиентов скорости звука по двум координатам, зависимости $c(x)$ и $c(z)$ можно рассмотреть раздельно (рис. 5).

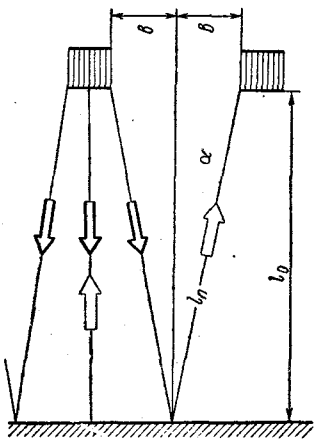



Рис. 4. Влияние базы акустической системы

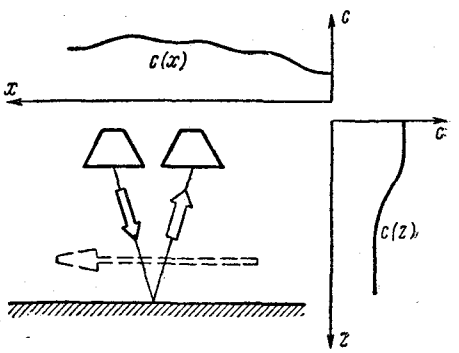



Рис. 5. Схема зависимости $c(x)$ и $c(z)$

1. *Непостоянство скорости звука вдоль пути движения акустической системы* $c(x) \neq \text{const}$, $c(z) = \text{const}$. Разность скорости распространения звука чаще всего вызывается различием состава и температуры участков среды. Например, при профилировании шахтных стволов разность скоростей звука в воздухе верхней и нижней частей ствола обусловлена изменением температуры воздуха. В массиве горных пород изменение

скорости звука связано обычно с изменением состава или структуры горных пород.

При значительной величине градиента скорости звука по координате $x$ траектория распространения звука может заметно искривляться (подобно рефракции света в атмосфере). В этом случае $l_0 \neq \frac{l_1 + l_2}{2}$ и для определения искомого расстояния необходимо строить траектории звуковых «лучей» [1]. Так как учет рефракции сложен, рассмотрим случай, когда ее влиянием можно пренебречь (например, при профилировании шахтных стволов) и считать траекторию распространения звука прямолинейной.

Если скорость звука определена в некоторой точке наблюдения $x=x_1$ и этим значением скорости пользуются для определения расстояния в точке наблюдения $x=x_n$, то из (1) действительное расстояние

$$l_{0_n} = \frac{t_{1_n} - t_{0_n}}{2} c(x_n);$$

расстояние по прибору

$$l_{\text{п}_n} = \frac{t_{1_n} - t_{0_n}}{2} c(x_1).$$

Их отношение

$$\frac{l_{0_n}}{l_{\text{п}_n}} = \frac{c(x_n)}{c(x_1)}. \tag{8}$$

Из (8) поправка к показаниям прибора в произвольной точке $x_{\text{п}}$

$$n_3' = l_0 - l_{\text{п}} = l_{\text{п}} \left[ \frac{c(x_n)}{c(x_1)} - 1 \right]. \tag{9}$$

При исправлении результатов за счет изменения скорости звука некоторая часть ошибки, соответствующая ошибке интерполяции между точками контрольных замеров скорости, остается и искажает результат измерения. Величина случайной ошибки $m_3$ в конкретных условиях определяется густотой сетки контроля скоростей. Полное исключение этой ошибки возможно при непрерывном измерении скорости звука в процессе наблюдения.

2. *Непостоянство скорости звука вдоль пути его распространения* $c(x) = \text{const}$, $c(z) \neq \text{const}$. В реальных физических условиях процесс изменения скорости звука в некотором объеме среды может протекать различно. В одних случаях (например, в многослойной среде) скорость изменяется скачкообразно на каких-либо границах физико-химических свойств среды. В других — этот процесс протекает непрерывно во всем объеме среды и определяется плавным изменением какого-либо или каких-либо свойств этой среды

При скачкообразном изменении скорости звуковой импульс отражается от границ раздела слоев и они фиксируются звуколокатором. Мощности слоев, показанные на рис. 6, по (1) могут быть определены:

$$H_1 = \frac{t_1 - t_0}{2} c_1;$$

$$H_2 = \frac{t_2 - t_1}{2} c_2;$$

$$H_3 = \frac{t_3 - t_2}{2} c_3.$$

Скорости звука $c_2$ и $c_3$, как правило, не известны и определить их обычными способами невозможно, так как к слоям $H_2$ и $H_3$ нет доступа.

Определить скорости без непосредственного замера можно одним из двух известных косвенных методов. Первый требует знания расстояний $H_2$ и $H_3$ в одной или нескольких точках наблюдений (данные шурфовой разведки, горных работ). Сравнивая показания звуколокатора в этих точках с известными значениями $H_2'$ и $H_3'$, можно определить по выражению (8) скорости распространения звука $c_2$ и $c_3$ и далее пользоваться этими величинами в других точках наблюдений. Определяемые величины слоев

$$H_n = H_{\text{п}n}\frac{c_n}{c_{\text{п}}}, \tag{10}$$

где $c_{\text{п}}$ — скорость звука, на которую тарирован звуколокатор.

Второй метод основан на анализе зависимостей временных интервалов $T_1=(t_1-t_0)$, $T_2=(t_2-t_0)$, $T_3=(t_3-t_0)$ от расстояния между излучателем и приемником $x=2в$. Для построения годографов $T_1(x)$, $T_2(x)$ и $T_3(x)$ измерения производят при различных значениях базы акустической системы. По элементам соответствующего годографа находят значение эффективной скорости

$$c_l = \sqrt{\frac{x}{T}\frac{dx}{dT}},$$

которая используется для определения искомых мощностей слоев [2].

При непрерывном изменении скорости звука в среде локации соотношение между фактическим расстоянием и показаниями звуколокатора может быть выражено через значение средней скорости распространения звука

$$\frac{t_1 - t_0}{2} = \frac{l_0}{c_{\text{ср}}} = \frac{l_{\text{п}}}{c_{\text{п}}},$$

откуда

$$l_0 = l_{\text{п}}\frac{c_{\text{ср}}}{c_{\text{п}}}. \tag{11}$$

Поправка к показаниям прибора

$$n_3'' = l_{\text{п}}\left(\frac{c_{\text{ср}}}{c_{\text{п}}} - 1\right). \tag{12}$$

Упомянутые выше методы косвенного определения скоростей приемлемы и в данном случае, однако точек контрольных замеров необходимо брать значительно больше, так как $c_{\text{ср}}$ является функцией измеряемого расстояния.

В условиях, для которых может быть найдена зависимость $c(z)$, среднюю скорость распространения звука вычислим интегральным способом. Рассмотрим этот способ на примере измерения глубины водоема.

В верхней части водного слоя водоема скорость звука меняется в соответствии с изменением температуры. Ниже они остаются неизменными (зависимость скорости звука от гидростатического давления начинает заметно проявляться только при глубинах в сотни метров и вследствие этого не имеет значения при решении маркшейдерских задач, связанных с малыми глубинами). В соответствии с выражением (11) фактическая глубина водоема в точке наблюдения

$$H_n = H_{\text{п}n}\frac{c_{\text{ср}}}{c_{\text{п}}}.$$

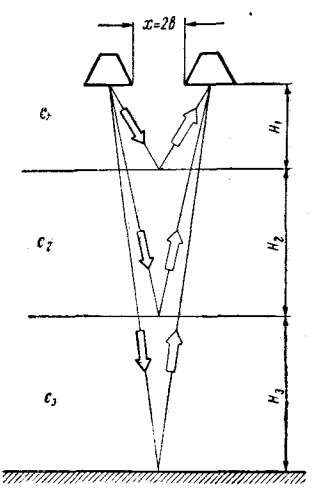



Рис. 6. Схема звуколокации многослойной среды

Средняя скорость распространения звука и фактическая глубина водоема определяются в следующем порядке:

1. Температура воды измеряется от поверхности водоема до глубины, с которой она перестает изменяться.

2. По измеренным значениям температуры с помощью известной формулы

$$c = 1450 + 4{,}2t^\circ - 0{,}0366\,(t^\circ)^2 \qquad (13)$$

строится график функции $c(H)$ и соответствующий ему график $\frac{1}{c(H)}$.

3. Средняя скорость определяется соотношением

$$\frac{t_1 - t_0}{2} = \frac{H}{c_{ср}} = \int_0^H \frac{dH}{c(H)},$$

из которого

$$c_{ср} = \frac{H}{\int_0^H \frac{1}{c(H)}\,dH}. \qquad (14)$$

4. В соответствии с выражением (14) строится график функции $c_{ср}(H)$ и определяется значение интеграла $\int_0^H \frac{1}{c(H)}\,dH$ графическим способом по кривой $\frac{1}{c(H)}$.

5. С помощью графика функции $c_{ср}(H)$ и (11) строится график зависимости $H(H_п)$, по которому определяется фактическая глубина водоема в любой точке наблюдений по показаниям звуколокатора.

**Ошибка определения времени прохождения сигнала.** *1. Ошибка, определяющаяся нестабильностью развертки.* Временной интервал $(t_1 - t_0)$ между посылкой и возвращением звукового импульса измеряется в звуколокаторе следующим образом: одновременно с посылкой в среду звукового сигнала вдоль шкалы индикатора начинает движение отметчик (перо самописца, луч осциллографа и т. п. — в зависимости от типа индикатора), регистрирующий момент возвращения сигнала. Таким образом, при звуколокационных измерениях распространение звукового импульса сопоставляется в выбранном масштабе с движением отметчика, называемым разверткой.

Произвольные отклонения скорости развертки от заданного значения, называемые нестабильностью развертки, вызывают появление случайных ошибок, пропорциональных этим отклонениям,

$$\frac{l_п}{l_0} = \frac{v_р}{v_{р_0}}, \qquad (15)$$

где $v_р$ — скорость развертки в момент наблюдений;

$v_{р_0}$ — заданная (тарировочная) скорость развертки.

Из (15) следует, что величина ошибки измерения за счет нестабильности развертки

$$m_4' = l_п\left(1 - \frac{v_{р_0}}{v_р}\right). \qquad (16)$$

Величина нестабильности развертки определяется конструкцией индикатора и в большинстве современных приборов составляет 0,5—1%.

2. *Ошибка, определяющаяся десинхронизацией развертки.* Произвольное отклонение момента начала развертки от момента посылки в среду звукового импульса, называемое десинхронизацией развертки, определяет появление ошибки измерения. Ее величина, учитывая (1),

$$m_4'' = t_c'' \frac{c}{2}, \qquad (17)$$

где $t_c''$ — десинхронизация развертки в точке наблюдения.

В тех приборах, где синхронизация развертки осуществляется кулачковой контактной группой непосредственно или с помощью электронно-ламповых схем, десинхронизацией почти всегда можно пренебречь. В приборах, где для синхронизации развертки используется релейный элемент, десинхронизация может быть значительной (до

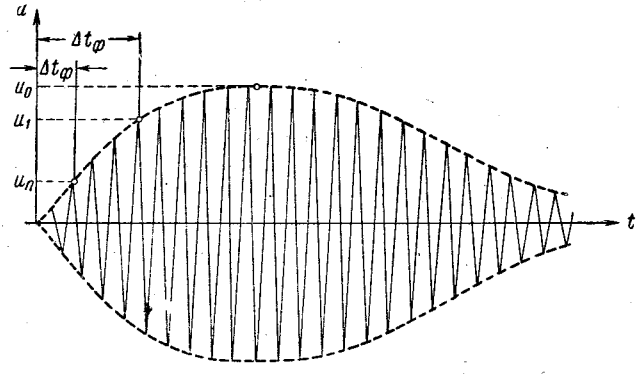



Рис. 7. Форма рабочего импульса в координатах амплитуда—время

$2 \cdot 10^{-3}$ *сек*). Она должна определяться при снятии характеристик с прибора и обязательно учитываться при оценке точности звуколокационных измерений.

**Влияние формы акустического импульса и характеристик приемного тракта на точность звуколокационных измерений (ошибка фиксации).** В звуколокационных приборах используют импульсы, заполненные несущей (рабочей) частотой. В идеальном случае рабочий импульс, изображенный в координатах амплитуда—время, должен быть прямоугольным, т. е. амплитуда колебаний в импульсе должна с самого начала принимать установившееся значение, а по окончании импульса — мгновенно становится нулевой. В действительности, генератор и излучатель звуколокатора обладают некоторой инерционностью, которая обусловливает постепенное нарастание и спад амплитуды колебаний в акустическом импульсе. Приемный тракт, воспринимающий этот импульс, в свою очередь, вносит искажение в его форму. В результате на индикатор приходит электрический импульс, значительно отличный от прямоугольного. Чем больше инерционных звеньев проходит сигнал, тем медленнее нарастает в нем амплитуда колебаний. Нарастание колебаний характеризует огибающая импульса (рис. 7, пунктирная кривая). При анализе влияния формы импульса на точность результатов измерений рассматривается огибающая импульса, а не мгновенные значения сигнала.

Значение амплитуды сигнала, начиная с которого фиксируется сигнал на индикаторе, называется порогом чувствительности. Величина порога чувствительности определяется конструкцией звуколокатора. По рис. 7, где линии уровней $u=u_1, \ldots, u=u_n$ отражают различное значе-

ние порога чувствительности, легко установить, что момент фиксации сигнала зависит от соотношения

$$\gamma_k = \frac{u_0}{u}, \tag{18}$$

называемого запасом чувствительности или запасом по усилению.

Интервал времени $\Delta t_\Phi$ между моментом возвращения импульса и моментом его фиксации индикатором есть ошибка в определении времени прохождения сигнала. Вызываемая в свою очередь ею ошибка определения расстояния, аналогично (17),

$$m_5 = \Delta t_\Phi \frac{c}{2}. \tag{19}$$

Поскольку запас чувствительности при измерении неизвестен (к тому же он может многократно изменяться в процессе измерения), $m_5$ представляет собой случайную ошибку. Максимальную величину эта ошибка приобретает при минимальном запасе чувствительности, т. е. когда $\gamma_k$ только обеспечивает устойчивую фиксацию показаний прибора.

В готовом приборе процесс нарастания сигнала можно получить при снятии характеристик, после чего величину $\Delta t_\Phi$ (для любого запаса чувствительности) легко найти графически. Наибольший интерес представляет, однако, анализ переходного процесса до выполнения звуколокатора. При большом числе инерционных звеньев в аппаратуре этот анализ чрезвычайно осложняется и должен служить предметом специального исследования. В настоящей статье приводятся результаты только для некоторых частных случаев.

**Пример 1** — излучатель возбуждается в импульсном режиме (заполненным импульсом). Если из всех звеньев, через которые последовательно проходит сигнал, одно обладает инерционностью существенно большей, чем остальные, влиянием последних можно пренебречь. В этом случае переходный процесс описывается выражением

$$u = u_0\left(1 - e^{-\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}\right), \tag{20}$$

где $\tau$ — постоянная времени инерционного звена по огибающей.

Учитывая $\gamma_k = \frac{u_0}{u}$ и (20),

$$\Delta t_\Phi = \tau \ln \frac{\gamma_k}{\gamma_k - 1}. \tag{21}$$

В случае преобладающего влияния $n$ звеньев с равной инерционностью переходный процесс можно выразить

$$u = u_0\left[1 - \left(1 + \sum_{k=1}^{k=n-1} \frac{\left\{\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}\right\}^k}{k!}\right) e^{-\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}\right]. \tag{22}$$

Из (22) следует, что величина $\Delta t_\Phi$ явно не выражается и может быть найдена только из графика, построенного по формуле

$$\frac{\gamma_k}{\gamma_k - 1} = \frac{e^{\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}}{1 + \sum_{k=1}^{k=n-1} \frac{\left\{\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}\right\}^k}{k!}}. \tag{23}$$

**Пример 2** — излучатель возбуждается в ударном режиме (коротким незаполненным импульсом). Если, кроме излучателя, инерционным является только одно звено (например, приемник) с инерционностью, равной инерционности излучателя, то переходный процесс может быть характеризован выражением

$$u = u_0 \frac{\Delta t_\Phi}{\tau} e^{-\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}. \tag{24}$$

Из (24) определяется значение запаса чувствительности

$$\gamma_k = \frac{\tau}{\Delta t_\Phi} e^{\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}. \tag{25}$$

Если, кроме излучателя, имеется $n$ звеньев с равной инерционностью, переходный процесс

$$u = u_0 \frac{\left(\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}\right)^n}{n!} e^{-\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}, \tag{26}$$

откуда запас чувствительности

$$\gamma_k = n! \left(\frac{\tau}{\Delta t_\Phi}\right)^n e^{\frac{\Delta t_\Phi}{\tau}}. \tag{27}$$

В более сложных случаях решение может быть найдено посредством методики исследования переходных процессов [3, 4].

Следует помнить, что переходный процесс и частотно-избирательные свойства в любой системе связаны между собой. Эта связь для резонансных звеньев, которые в подавляющем большинстве случаев и определяют инерционность звуколокатора, выражается простым соотношением

$$\tau = \frac{2Q}{\omega_0}, \tag{28}$$

где $Q$ — добротность резонансного звена;

$\omega_0$ — его резонансная частота.

Как следует из (28), повышение избирательности (добротности) звеньев звуколокатора так же, как и снижение его рабочей частоты, влечет за собой увеличение ошибки фиксации.

**Ошибка считывания показаний индикатора.** Ошибка считывания определяется точностью, с которой оператор воспринимает показания индикатора и не зависит от точности самих показаний звуколокатора. В звуколокаторах, применяемых для решения маркшейдерских задач, в качестве индикаторов используются в основном самописцы и указатели.

Ошибка считывания при пользовании самописцем складывается из ошибки измерения расстояния между линиями записи и ошибки определения положения этих линий (обусловлена нечеткостью кромки записи). Поскольку вторая составляющая ошибка значительно больше первой, ее можно принять за ошибку считывания. Анализ большого количества эхограмм различных комплектов звуколокационной аппаратуры показывает, что ошибка считывания показаний самописца составляет 1—1,5 *мм* в масштабе записи. Соответственно, в натуре ошибка считывания

$$m_6' = \frac{1 \div 1{,}5}{M}, \ мм, \tag{29}$$

где $M$ — численный масштаб записи

При визуальном индикаторе (указателе) ошибка считывания представляет собой погрешность определения положения указывающего индекса (стрелки или световой отметки) относительно шкалы. Эту ошибку можно принять равной половине наименьшего деления шкалы

$$m_6'' = 0{,}5\xi, \tag{30}$$

где $\xi$ — цена деления шкалы.

**Результирующая техническая ошибка измерений.** Перечисленные выше технические ошибки звуколокационных измерений по причинам возникновения подразделяются на ошибки, которые определяются несовершенством звуколокационной аппаратуры (ошибки звуколокатора) и, ошибки, появление и величина которых определяются принятой методикой звуколокационных измерений.

Суммарная ошибка звуколокатора $M_{зв}$ зависит от величин ошибок $m_4'$, $m_4''$, $m_5$, $m_6'$, $m_6''$ и в общем виде может быть выражена как их функция:

$$M_{зв} = \varphi(m_4', m_4'', m_5, m_6', m_6'').$$

Учитывая независимость и случайный характер составляющих ошибок, величина $M_{зв}$ может быть вычислена по формуле

$$M_{зв} = \pm\sqrt{m_4'^2 + m_4''^2 + m_5^2 + m_5^2 + m_6'^2 + m_6''^2}. \tag{31}$$

Ошибки, зависящие от принятой методики звуколокационных измерений, проявляются как систематические погрешности и должны исключаться из результатов введением соответствующих поправок: $n_1'$, $n_1''$, $n_2$, $n_3'$, $n_3''$. Однако при определении величин перечисленных поправок и введении их в результаты измерений возникает ряд случайных ошибок, которые как остаточные погрешности искажают конечные результаты. Иногда эти погрешности (как случайные составляющие систематических ошибок) достигают значительных величин. Тогда они учитываются при оценке точности звуколокационных измерений.

Суммарная ошибка, образующаяся за счет принятой методики работ $M_{мет}$ представляется как функция случайных составляющих систематических ошибок:

$$M_{мет} = f(m_1', m_1'', m_2, m_3', m_3'').$$

Ее величина может быть подсчитана по формуле

$$M_{мет} = \pm\sqrt{m_1'^2 + m_1''^2 + m_2^2 + m_3'^2 + m_3''^2}. \tag{32}$$

Результирующая техническая ошибка звуколокационных измерений $M_т$ вычисляется как квадратичная сумма суммарных ошибок $M_{зв}$ и $M_{мет}$:

$$M_т = \pm\sqrt{M_{зв}^2 + M_{мет}^2}. \tag{33}$$

### Оценка величины результирующей технической ошибки в конкретных случаях звуколокационных измерений

Приведем, например, оценку ошибки $M_т$ для двух различных случаев звуколокационных измерений.

**Профилирование шахтного ствола.** Для звуколокационного профилирования шахтных стволов имеется только один готовый прибор — ультразвуковой профилограф УЗП-3, разработанный и выпущенный малой серией институтом Ленгипроречтранс и ЦНИИ Подземшахтострой.

УЗП-3 представляет собой звуколокатор со стержневыми магнитострикционными преобразователями на рабочую частоту 21,3 *кгц*. Излучатель возбуждается в ударном режиме. Индикатор-самописец с электротермической бумагой. Ширина диаграммной ленты 100 *мм*. Масштаб записи $^1/_{20}$. Прибор рассчитан для измерения расстояний от 0,5 до 2,5 *м* и от 2,5 до 4,5 *м*.

Согласно (31) ошибка звуколокатора $M_{зв}$ зависит от величин $m_4'$, $m_4''$, $m_5$, $m_6'$ и $m_6''$.

Нестабильность развертки для УЗП-3, по данным лаборатории ультразвукометрии Ленинградского горного института, $\pm 1\%$. Согласно (16)

$$m_4' = \pm 0{,}01 l_п \text{ (при } l_{п_{max}} = 2{,}5 \text{ м и } l_{п_{min}} = 0{,}5 \text{ м)}.$$

Ошибка за счет десинхронизации развертки $m_4''$ практически отсутствует, так как в УЗП-3 синхронизация развертки осуществляется кулачковой контактной группой.

Ошибка фиксации $m_5$ в схемном решении УЗП-3 определяется инерционностью излучателя и приемника, значительно превосходящих инерционность всех остальных звеньев, через которые проходит сигнал. Величина этой ошибки определялась теоретически [по формулам (18), (19), (24) и (25)] и экспериментально — анализом записей на эхограммах. В первом случае ее величина составила для минимального запаса по усилению 2,5 *см* и для максимального 0,5 *см*. При экспериментальном определении ошибка фиксации была соответственно равна 3 и 0,5 *см*. Расхождение в максимальном значении ошибки фиксации обусловлено тем, что теоретическим расчетом не учтена инерционность других звеньев системы (контура усилителя). Значение 0,5 *см* является систематической ошибкой и результаты измерений должны быть исправлены на ее величину. Случайная составляющая в этом случае будет 2,5 *см*.

Ошибка отсчитывания показаний индикатора, согласно (29),

$$m_6' = \frac{1}{\frac{1}{20}} \text{ мм} = \pm 2 \text{ см},$$

$m_6' = 0$, так как визуальный индикатор в комплекте УЗП-3 отсутствует. Ошибка звуколокатора, учитывая (31),

$$M_{зв} = \pm \sqrt{(0{,}01 l_п)^2 + 2{,}5^2 + 2^2}.$$

При минимальном возможном расстоянии локации $l_п = 0{,}5$ *м* ошибка звуколокатора

$$M_{зв} = \pm \sqrt{0{,}5^2 + 2{,}5^2 + 2^2} \approx \pm 3{,}3 \text{ см}.$$

В этом случае определяющими являются ошибки $m_5$ и $m_6'$. Ошибка $m_4'$ не оказывает существенного влияния на величину $M_{зв}$.

При расстоянии локации $l_п = 2{,}0$ *м* ошибка звуколокатора

$$M_{зв} = \pm \sqrt{2^2 + 2{,}5^2 + 2^2} \approx \pm 3{,}7 \text{ см}.$$

В этом случае все ошибки, определяющие $M_{зв}$ одного порядка и практически одинаково влияют на ее величину.

Определим величину $M_{мет}$. По (32) она определяется величинами ошибок $m_1'$, $m_1''$, $m_2$, $m_3'$, $m_3''$.

Ошибка $m_1' = 0$, так как в комплекте УЗП-3 используются стержневые вибраторы, не имеющие рефлекторов.

Ошибка положения формирующей поверхности образуется в процессе профилирования шахтного ствола за счет отклонения акустической системы при движении от отвесной линии (раскачивание системы

при свободном спуске, отклонение от вертикали проводников или направляющих канатов). Методикой работ необходимо предусматривать совместное профилирование объекта локации и контрольного отвеса. В этом случае поправка за счет ошибки положения формирующей поверхности $n_1''$ графически определяется по всему профилю (снимается в любой точке эхограммы).

Случайная составляющая тогда равна ошибке считывания

$$m_1'' = \pm 2 \text{ см}.$$

Ошибка базы акустической системы даже при минимально возможном расстоянии локации ничтожна ($^5/_{50} \leqslant 0{,}1$) и может не учитываться при обработке наблюдений. Естественно, и ее случайная составляющая $m_2$ практически равна нулю.

Ошибка за счет непостоянства скорости звука вдоль пути движения акустической системы может быть значительна, так как перепады температуры в шахтных стволах могут достигать десятков градусов [5]. При изменении температуры воздуха в стволе на 20° (что возможно в любых географических условиях) в соответствии с (9) поправка $n_3' = l_п 0{,}035$.

Поскольку ни конструкция УЗП-3, ни методика его использования не предусматривает контрольных замеров температуры среды, случайная составляющая $m_3'$ будет равна всей величине поправки $n_3'$, т. е. $m_3' = 0{,}035 l_п$. Ошибка $m_3''$ — ничтожна и может не учитываться при оценке величины $M_{мет}$. Величина $M_{мет}$, учитывая (32),

$$M_{мет} = \pm \sqrt{2^2 + 0{,}035 l_п^2}.$$

При минимально возможном расстоянии локации 0,5 *м* ошибка

$$M_{мет} = \pm \sqrt{2^2 + (0{,}035 \cdot 50)^2} \approx \pm 2{,}7 \text{ см}.$$

При $l_п = 2$ *м*

$$M_{мет} = \pm \sqrt{2^2 + (0{,}035 \cdot 200)^2} \approx + 7{,}3 \text{ см}.$$

В этом случае ошибка $m_3'$ определяет $M_{мет}$.

Результирующая техническая ошибка в соответствии с (33):

$$M_т = \pm \sqrt{3{,}3^2 + 2{,}7^2} \approx 4{,}2 \text{ см при } l_{п_{min}} = 0{,}5 \text{ м};$$

$$M_т = \pm \sqrt{3{,}7^2 + 7{,}3^2} \approx \pm 8{,}1 \text{ см при } l_п = 2 \text{ м}.$$

Анализ показывает, что при профилировании шахтных стволов звуколокатором УЗП-3 основным источником технических ошибок является изменение скорости распространения звука, определяемое перепадами температуры воздуха в шахтных стволах. Это определяет необходимость постоянного контроля температуры воздуха или непосредственно скорости распространения звука.

После исключения ошибки $m_3'$ величина технической ошибки все равно остается значительной (примерно ±4 *см*). Уменьшить общую ошибку можно следующими мерами: 1) ошибку считывания $m_6'$ (входящую дважды в выражение технической ошибки $M_т$) — за счет увеличения ширины диаграммной ленты, т. е. укрупнения масштаба записи; 2) ошибку нестабильности развертки $m_4'$ — стабилизацией скорости вращения приводного электродвигателя самописца (практически в два-три раза); 3) ошибку фиксации $m_5$ — за счет увеличения запаса по усилению или повышения рабочей частоты (инерционность излучателя и приемника не поддается изменению).

**Профилирование дна водоема.** При профилировании дна водоема в маркшейдерских целях (дражные полигоны) наиболее целесообразны

промерные эхолоты. Определим величину результирующей технической ошибки при использовании промерного эхолота ПЭЛ-2.

ПЭЛ-2 представляет собой звуколокатор со стержневыми магнитострикционными преобразователями на рабочую частоту 21,3 *кгц*. Режим возбуждения излучателя — ударный. Излучатель и приемник однотипные и взаимозаменяемые. Индикатор-самописец с электротермической бумагой шириной 200 *мм*. Масштаб записи $^1/_{100}$. Основная шкала самописца 20 *м*.

Нестабильность развертки ПЭЛ-2 составляет ±0,5%:

$$m_4' = \pm 0{,}005 l_{\text{п}}.$$

Ошибка дисинхронизации развертки $m_4''$ практически отсутствует. Ошибка фиксации $m_5$, определяемая инерционностью излучателя и приемника при $\gamma_{k_{\min}} = 2$ равна примерно 7 *см*; при $\gamma_{k_{\min}} = 5 \cdot 10^3$ — около 0 (т. е. систематическая составляющая ошибки фиксации отсутствует).

Ошибка считывания

$$m_6' = \frac{1}{\frac{1}{100}} \text{ мм} = \pm 10 \text{ см}.$$

Ошибка звуколокатора

$$M_{\text{зв}} = \pm \sqrt{(0{,}005 l_{\text{п}})^2 + 7^2 + 10^2}.$$

При минимальном расстоянии локации 0,5 *м* (по паспорту эхолота ПЭЛ-2)

$$M_{\text{зв}} = \pm \sqrt{0{,}25^2 + 7^2 + 10^2} \approx \pm 12 \text{ см}.$$

При $l_{\text{п}} = 20$ *м* (максимальное расстояние локации по основной шкале)

$$M_{\text{зв}} = \pm \sqrt{10^2 + 7^2 + 10^2} \approx \pm 16 \text{ см}.$$

Ошибка методики наблюдений $m_1' = 0$, так как в комплекте ПЭЛ-2 используются стержневые вибраторы, не имеющие рефлекторов.

Ошибка $m_1''$ образуется за счет ошибок при измерении погружения акустической системы и колебаний уровня водоема.

Поправка $n_1''$ определяется в каждом конкретном случае маркшейдерскими замерами достаточно точно. Соответственно мала ее случайная составляющая $m''_1$ — она может не учитываться при вычислении $M_{\text{мет}}$.

Поправка за счет влияния базы акустической системы ($b = 10$ *см*) достигает при минимальном возможном расстоянии локации $l_{\text{п}} = 0{,}5$ *м*. По (7)

$$n_2 = -\frac{10}{2 \cdot 50} = 1 \text{ см}.$$

В связи с этим случайная составляющая $m_2$ пренебрежительно мала.

Ошибка $m_3'$ практически отсутствует, поскольку трудно ожидать существенных изменений скорости распространения звука в различных участках одного и того же водоема. Но ошибка $m_3''$, определяемая изменением температуры воды с глубиной, обязательно должна учитываться. Для оценки ее величины рассмотрены конкретные условия измерений на Гладышевском озере (Ленинградская область) в июне 1960 г. Изменение температуры воды изучалось в зависимости от глубины (рис. 8, *а*) и в соответствии с этим изменением рассматривались зависимости $c(H)$,

$\frac{1}{c(H)}$ (рис. 8, *б*) и $c_{ср}(H)$ (рис. 8, *в*). ПЭЛ-2 тарировался на глубине 3 *м* ($c_{ср} = 1472$ *м/сек*).

В соответствии с (12) для $l_п = 20$ *м* (основная шкала прибора) поправка

$$n_з'' = 20 \cdot 10^3 \left(\frac{1438}{1472} - 1\right) \approx -48 \text{ см}.$$

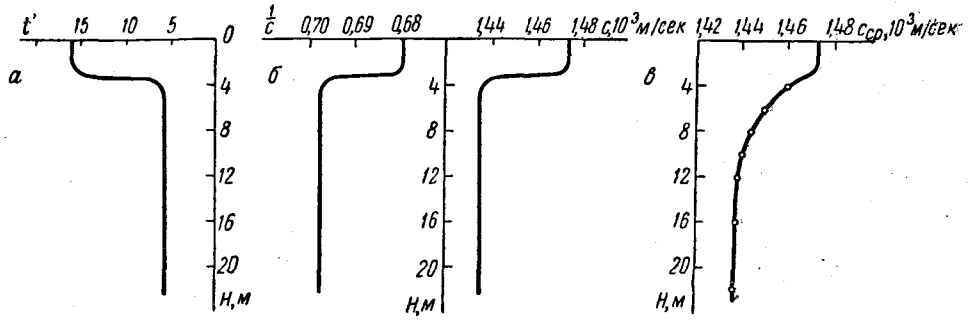



Рис. 8. Графики расчета поправки $n_з''$

Так как поправка $n_з''$ при маркшейдерских работах обычно не вводится, ее величина влияет на результат измерений, как случайная составляющая $m_з''$ и целиком определяет $M_{мет}$.

Результирующая техническая ошибка $M_т$ по (33):

$$M_т = M_{зв} \approx 12 \text{ см при } l_{п\,min} = 0{,}5 \text{ м};$$

$$M_т = \pm\sqrt{16^2 + 48^2} \approx \pm 50 \text{ см при } l_{п\,max} = 20 \text{ м}.$$

Итак, ошибка $m_з''$ больше всех остальных ошибок искажает результаты измерений и, следовательно, ее совершенно необходимо учитывать как систематическую ошибку и исключать из результатов одним из изложенных выше методов.

## ЛИТЕРАТУРА


1. «Физические основы подводной акустики». Пер. с англ. Изд-во «Советское радио», 1955.
2. Пузырев Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. Гостоптехиздат, 1959.
3. Фатеев А. В. Основы линейной теории автоматического регулирования. Госэнергоиздат, 1954.
4. Меерович Л. А., Зеличенко Л. Г. Импульсная техника. Изд-во «Советское радио», 1954.
5. Щербань А. Н. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. Углетехиздат, 1953.