Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIX, вып. 1, 1969 г.

РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ И ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ ПРИ ЗВУКОВОЙ ЛОКАЦИИ В МАРКШЕЙДЕРСКИХ РАБОТАХ

А. А. Гурич, В. М. Меркулова

Звуколокационный метод маркшейдерского контроля и съемок горных выработок используется в практике горнодобывающих предприятий сравнительно недавно [2].

В настоящее время такой метод измерения расстояний применяется при маркшейдерском обслуживании дражных полигонов, глубоких карьерных рудоспусков, недоступных подземных камер выщелачивания соли и подземных хранилищ нефтепродуктов, а также шахтных стволов и скважин, проводимых бурением [3].

Успешная разработка новых методов и их внедрение в практику непосредственно связаны с созданием комплекса измерительной аппаратуры. Очевидно, что оптимально установленные параметры звуколокатора и целесообразная конструкция его основных блоков позволяют резко сократить объем макетирования, лабораторных и производственных экспериментов, что является определяющим в общем объеме работ по внедрению звуколокационного метода измерений на том или ином объекте.

В данной статье рассматриваются вопросы расчета максимальной дальности действия и оптимальных частот при звуковой локации. Подобные расчеты, в отличие от гидроакустики, имеют свои особенности, определяемые требованиями к маркшейдерским съемкам, а также физическими условиями изме-

рений. Даже неполный перечень объектов применения звуколокации в горном деле наглядно показывает разнообразие физических условий, встречающихся при производстве измерений. Различие сред локации (вода, рассолы, глинистая пульпа, нефтепродукты, илы, горные породы), разнообразие характера отражающих поверхностей (донная поверхность естественных водоемов; поверхность массива горных пород, образованная взрывом; поверхность размыва соляного массива; скрытые контактные поверхности различных пород; бетонное и металлическое крепление горных выработок) приводят к сильно отличающимся условиям распространения и отражения звуковых волн. Значения акустического затухания при этом могут на несколько порядков превосходить затухание звука в морской воде и иметь другую частотную зависимость.

При осуществлении маркшейдерских съемок горных выработок приходится лоцировать протяженные поверхности, которые в первом приближении могут апроксимироваться плоскими стенками. Для простоты положим, что функции излучателя и приемника совмещены в одном преобразователе, который находится на достаточно большом расстоянии от отражающей стенки,

$$r \gg S_{\text{и}}/\Lambda,$$

где $S_{\text{и}}$ — эффективная площадь излучателя; Λ — длина звуковой волны.

При этих условиях интенсивность эхо-сигнала $J_{\text{э}}$ в месте расположения преобразователя связана с излучаемой акустической мощностью $W_{\text{и}}$ уравнением [6]

$$J_{\text{э}} = \frac{W_{\text{и}} \gamma R^2}{16\pi r^2} e^{-4\alpha r}, \qquad (1)$$

где α — коэффициент пространственного затухания звука в лоцируемой среде; R — коэффициент, учитывающий потери при отражении; γ — коэффициент осевой концентрации излучателя. Для случая когда $\sqrt{S_{\text{и}}} > \Lambda$

$$\gamma = \frac{4\pi S_{\text{и}}}{\Lambda^2}. \qquad (2)$$

Поскольку на практике измеряется амплитуда отраженного импульса, которая пропорциональна звуковому давлению $p_{\text{э}}$,

то данную величину целесообразно ввести в формулу (1), используя соотношения

$$I_э = \frac{p_э^2}{2\rho c}, \quad W_и = \frac{S_и p_и^2}{2\rho c}, \tag{3}$$

где $p_и$ — амплитуда давления, развиваемая преобразователем в режиме излучения.

После подстановки (3), (2) в (1) получим

$$p_э = p_и \frac{S_и R}{2r\Lambda} e^{-2\alpha r}. \tag{4}$$

Отсюда устанавливается соотношение уровней излученного и принятого сигналов

$$20 \lg \frac{p_и}{p_э} = \left[20 \lg \frac{2r\Lambda}{S_и R} + 8{,}68\alpha 2r\right]. \tag{5}$$

В дальнейшем целесообразно перейти к безразмерным переменным, измеряя расстояния и поперечные размеры излучателя в длинах волн $y = r/\Lambda$, $n = \sqrt{S_и}/\Lambda$. Величины затухания при этом должны браться в расчете на длину волны $\alpha\Lambda = \Delta$ (Δ — логарифмический декремент потерь). В безразмерных переменных формула (5) перепишется в виде *

$$20 \lg \frac{p_и}{p_э} = \left[20 \lg \frac{2y}{n^2 R} + 8{,}68\Delta 2y\right]. \tag{6}$$

Если $p_э$ соответствует минимальному пороговому сигналу, который может быть еще зарегистрирован приемником на фоне помех, то решение уравнения (6) позволяет находить максимальные величины лоцируемых расстояний при данном значении коэффициента затухания в среде. Переходя к количественным расчетам, произведем сначала численные оценки величин, входящих в формулу (6).

Максимальное значение излучаемого давления $p_{и\max}$ ограничивается кавитационным порогом. Как показывают экспериментальные исследования, для воды, находящейся в естественных условиях, явление газовой кавитации становится заметным уже при $p_и \approx 10^6$ *дин/см*^{2} [5], поэтому разумное значение $p_{и\max}$ должно быть принято около $6 \cdot 10^5$ *дин/см*^{2}, что соот-

* При расчетах по формуле (6) необходимо, чтобы выполнялось условие $y > n^2$.

ветствует $I_{и}=0{,}1$ *вт/см²*. Величина $p_{и\min}$ зависит от чувствительности акустического приемника и уровня входных помех усилительного тракта.

Чувствительность магнитострикционных и пьезокерамических приемников, применяемых в маркшейдерских звуколокаторах, в среднем может быть принята 10 *мкв·см²/дин*. Величина шумовой помехи, приведенной ко входу усилителя, при обычных значениях полосы пропускания лежит в пределах $1 \div 10$ *мкв*. Если ограничиться требованием, чтобы полезный сигнал превышал помеху по крайней мере на 6 *дб*, то минимальная величина регистрируемого сигнала составит $0{,}2 \div 2$ *дин/см²*. Таким образом, максимальный динамический диапазон звуколокационной аппаратуры, определяемый как отношение излученного и принятого сигналов, должен быть оценен в $110 \div 130$ *дб*. Величина коэффициента отражения R определяется соотношением акустических сопротивлений граничащих сред и размерами неровностей самой отражающей поверхности. Так, например, для илистых и глинистых грунтов $R=0{,}2 \div 0{,}5$, для плотных каменистых пород, граничащих с водной средой, — $0{,}7 \div 0{,}9$.

Из формулы (6) видно, что наиболее существенное влияние на дальность локации оказывает коэффициент затухания звука. Его величина для сред, с которыми приходится иметь дело на практике, колеблется в широких пределах:

Цементное тесто	~ 1
Глинистые грунты и водонасыщенный песок	$0{,}2 - 0{,}3$
Скальные породы	$0{,}01 - 0{,}1$
Цемент	$0{,}02 - 0{,}1$
Водные суспензии	$10^{-2} - 10^{-4}$
Вода пресная ($f=500$ *кгц*, $t=15°$ С)	$\sim 2{,}6 \cdot 10^{-5}$

На рис. 1 представлены результаты расчетов максимальной дальности локации при разных величинах коэффициентов осевой концентрации излучателя ($\gamma=4\pi n^2$); динамический диапазон принят 110 *дб*. Этот график может быть использован для выбора одного из важнейших параметров проектируемой звуколокационной аппаратуры — энергетической дальности действия на различных рабочих частотах.

При лоцировании неоднородных сред (массивов крупнокристаллических пород, воды, содержащей пузыри воздуха или взвешенные твердые частицы) возникают реверберационные помехи, обязанные обратному рассеянию звуковых волн. При

большой степени упругой неоднородности величины этих помех могут оказываться столь значительными, что будут полностью маскировать полезный эхо-сигнал. Для оценки влияния реверберационных помех можно воспользоваться выражением [5]

$$I_{\text{р}} = \frac{\sigma_{\text{р}} W_{\text{и}} \eta c \tau}{8\pi r^2} e^{-4\alpha r}. \qquad (7)$$

Здесь $I_{\text{р}}$ — интенсивность реверберации в точке приема; τ — длительность импульса (принимается, что $2\alpha\, c\, \tau \ll 1$ — условие,

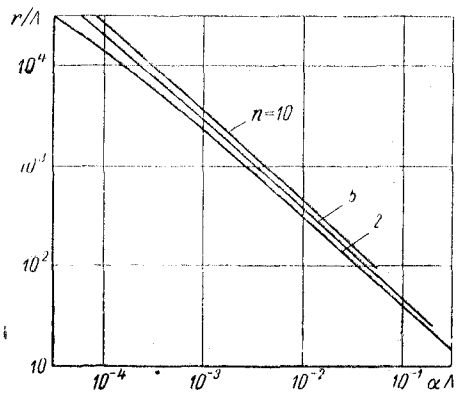


Рис. 1. Зависимость максимальной дальности звуколокации от затухания в среде

которое обычно выполняется при всех практически используемых τ); η — коэффициент, зависящий от направленности приемного и излучающего преобразователей (как показывают расчеты [5], при $\sqrt{S}/\Lambda > 2$ значение η практически остается постоянным и равным $\sim 0{,}7$); $\sigma_{\text{р}}$ — коэффициент объемной реверберации, характеризующий рассеивающую способность среды (в нашем случае приближенно можно полагать $\sigma_{\text{р}} = 2\alpha_{\text{р}}$); $\alpha_{\text{р}}$ — амплитудный коэффициент затухания звука за счет рассеяния). Из сравнения формул (4) и (7) легко находится соотношение амплитуд полезного сигнала $p_{\text{э}}$ и реверберационной помехи $\sqrt{\overline{p_{\text{р}}^2}}$, равное

$$\frac{p_{\text{э}}}{\sqrt{\overline{p_{\text{р}}^2}}} = \frac{nR\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha_{\text{р}} \eta c \tau}}. \qquad (8)$$

Положим в этой формуле $n=1$, $R=0{,}1$, $\tau=10^{-3}$ *сек*, $c=4\cdot10^3$ *м/сек*, получим, что $p_э \approx \sqrt{\overline{p_р^2}}$ при $\alpha_р \approx 0{,}01$ *неп/м*. Последняя величина соответствует, например, среднему значению коэффициента рассеяния в песчаном бетоне на частоте 50 *кгц* [7].

Для получения лучшего отношения сигнал — реверберационная помеха лоцирование неоднородных сред следует проводить на более низких рабочих частотах (с понижением частоты $\alpha_р$ резко падает), применяя высоконаправленные приемно-излучающие системы.

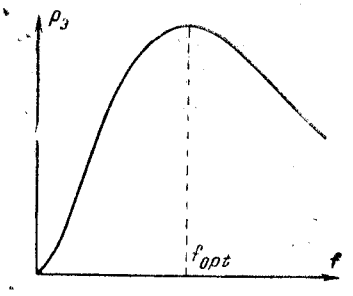


Рис. 2. Выбор оптимальной рабочей частоты звуколокатора

Рассмотрим теперь другой важный вопрос, касающийся выбора оптимальных рабочих частот звуколокационной аппаратуры. Из физических соображений очевидно, что увеличение частоты сопровождается улучшением направленности излучателя и приводит к повышению уровня полезного сигнала. Однако при дальнейшем увеличении частоты преобладающую роль начинает играть фактор затухания звука. Поэтому амплитуда принимаемого эхо-сигнала в функции от частоты должна иметь максимум, который соответствует наиболее высокой чувствительности при постоянной мощности звуколокатора (рис. 2). Если наоборот, задать величину порогового сигнала, регистрируемого приемником, то f_{opt} будет отвечать той частоте, для которой требуется минимум акустической мощности.

Из выражения (4) видно, что частотная зависимость эхо-сигнала, отраженного от плоскости, соответствует

$$p_э \sim f e^{-2\alpha(f)r}. \qquad (9)$$

Коэффициент затухания звука в горных породах, как показывают экспериментальные исследования [4], для широкого диапазона частот может быть апроксимирован выражением

$$\alpha(f) = A_1 f + A_2 f^2, \qquad (10)$$

где первый член определяет потери на диссипативное поглощение, второй — потери вследствие рассеяния упругих волн от зерен структуры. Оптимальная частота определится из условия

$$\partial p_э/\partial f = 0. \tag{11}$$

Подставляя выражение (10) в (9) и (11), получим

$$f_{opt} = \frac{A_1}{4A_2}\left[\sqrt{1+\frac{4A_2}{rA_1^2}} - 1\right]. \tag{12}$$

В общем случае f_{opt} оказывается зависящий от расстояния, а также соотношения потерь на расстояние и поглощение. Если соблюдается условие $r \gg \frac{4A_2}{A_1^2}$, эффектом рассеяния можно пренебречь. При этом

$$f_{opt} \approx 1/2\, rA_1. \tag{13}$$

Коэффициенты акустического поглощения в массивах различных пород колеблются в широких пределах $A_1 = 10^{-3} \div 10^{-1}$ *неп/м · кгц*

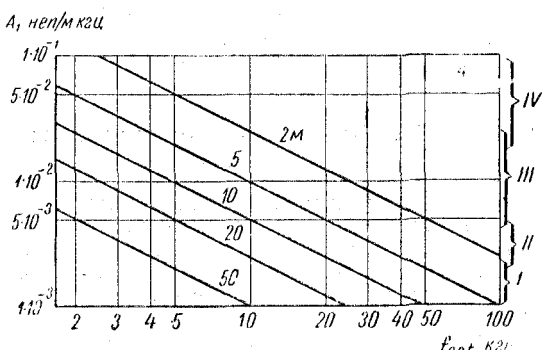


Рис. 3. Оптимальные частоты локации при различном звукопоглощении в горных породах:

I — кварциты; II — базальты, габбро; III — граниты, песчаники; IV — известняки, глинистые сланцы, угли

Номограмма рис. 3 может быть использована для выбора рабочих частот локации.

Для крупнозернистых пород, когда заметно сказываются потери на рассеяние, расчеты оптимальных частот следует производить по общей формуле (12). Эффект рассеяния при-

водит к некоторому снижению величин f_{opt} (по сравнению с рис. 3), особенно для малых расстояний. При большом уровне помех от структурной реверберации выбор рабочих частот должен также определяться условиями получения наилучшего соотношения полезный сигнал — помеха.

Проведем оценку f_{opt} для случая локации в водной среде. Если принять квадратичную зависимость коэффициента поглощения от частоты, то положив в (12) $A_1=0$, находим

$$f_{opt} = \frac{1}{\sqrt{2rA_2}}. \qquad (14)$$

Для пресной воды при $t=15°$ С $A_2=3{,}5\cdot10^{-8}$ *неп/м · кгц*^{2}, если $r=100$ *м*, то $f_{opt}=380$ *кгц*.

На основании проведенных расчетов можно заключить, что в тех случаях, когда по условиям работы требуется большой диапазон измеряемых расстояний, целесообразно предусматривать несколько рабочих частот. Этим достигается существенное расширение возможностей звуколокационной аппаратуры. Результаты эксплуатации многочисленных звуколокаторов типа Луч-1, ДЗ-64, разработанных на кафедре маркшейдерского дела ЛГИ, подтверждают данный вывод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грубник Н. А. Исследование акустических свойств подводного грунта на высоких звуковых частотах. Акуст. ж. АН СССР, т. VI, № 4, 1960.

2. Дзенис В. В. К вопросу исследования структурообразования цементного камня импульсным акустическим методом. Сб. статей «Исследования по бетону и железобетону», т. IV, V. Изд-во АН Лат.ССР, 1960.

3. Казаковский Д. А., Кротов Г. А., Гурич А. А. Применение акустической аппаратуры для решения маркшейдерских задач НДВШ, Горн. дело, № 2, 1959.

4. Казаковский Д. А. и др. Применение звуколокационной съемки в маркшейдерском деле. В кн.: «Маркшейдерское дело в социалистических странах». Недра, 1964.

5. Меркулова В. М. Исследование акустических свойств горных пород в широком диапазоне частот. Автореф. канд. диссерт. ЛГИ, 1967.

6. Сташкевич А. П. Акустика моря. Судостроение, 1966.

7. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Тарапов Э. С. Основы гидроакустики. Судостроение, 1966