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

СПОСОБ УЧЕТА ПОПРАВКИ НА НЕПОСТОЯНСТВО СКОРОСТИ ЗВУКА ПРИ ЗВУКОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СКВАЖИН

В. К. Чумак

В процессе бурения и крепления технических скважин большого диаметра (1,0—3,6 *м*) возникает ряд технических задач, решение которых представляется возможным в том случае, если известны геометрия и размеры ствола скважины (искривление оси, величина разработки стенок и т. д.), а также положение крепи при ее возведении. Скважины бурятся вертикально глубиной до 1000 *м*. Бурение ведется с применением промывочной жидкости, в качестве которой используется глинистый раствор с удельным весом до 1,25 *г/см*^{3} в зависимости от крепости пород. Так как скважина (как в процессе бурения, так и крепления) заполнена буровым раствором, то применяемые методы маркшейдерского контроля состояния стенок ствола и крепи горных выработок, проходимых обычными способами, здесь непригодны. Наиболее приемлемым в данном случае является способ ультразвуковой локации.

Звуколокатор «Донецк», созданный кафедрой маркшейдерского дела ЛГИ, представляет импульсный локатор, который измеряет радиусы горизонтальных сечений ствола скважины (или крепи) на основании измерения времени распространения звукового сигнала от звуколокатора до стенки и обратно при известной скорости распространения звука в среде локации. Измеряемое расстояние определяется из выражения

$$R = \frac{t_2 - t_1}{2} c = \frac{T}{2} c, \qquad (1)$$

где t_1, t_2 — моменты времени посылки и приёма сигнала; c — скорость распространения звука; T — время распространения звукового сигнала от локатора до объекта и обратно.

Локатор состоит из двух основных частей: скважинного снаряда, опускаемого на кабель в выработку, и наземной измерительной аппаратуры, смонтированной на каротажной станции АЭКС-1500.

Съемка заключается в звуколокационном обзоре контуров горизонтальных сечений ствола через определенные интервалы по высоте и их регистрации на диаграммном бланке самописца в соответствующем линейном масштабе. По требованиям производства средняя ошибка измерения расстояний не должна превышать $\pm 1\%$. Экспериментальная проверка точности измерения расстояний звуколокатором показала, что среднеквадратическая ошибка локатора составляет $\pm 1{,}1\%$, что удовлетворяет требованиям производства.

Из (1) следует, что звуколокационная съемка возможна, если известна скорость распространения звука в глинистом растворе. Скорость звука может быть легко определена в процессе тарировки прибора, которая производится перед съемочными работами в устье скважины ($H = H_0$). Однако с увеличением глубины скважины изменяется температура и концентрация бурового раствора. Эти факторы, а также гидростатическое давление оказывают влияние на величину скорости звука. Следовательно, если пользоваться значением тарировочной скорости для определения расстояния на горизонте съемки ($H = H_n$), то ошибка звуколокатора в несколько раз превысит установленную величину за счет непостоянства скорости звука с глубиной.

Таким образом, введение поправки за изменение скорости звука с глубиной является необходимым условием производства звуколокационной съемки технических скважин. Причем аппаратура и методика определения величины этой поправки должна быть такова, чтобы случайная составляющая поправки после введения ее в результат измерения была ничтожно мала.

Согласно [1] поправка ΔR_c к показаниям звуколокатора за счет изменения скорости звука на горизонте H_n составит

$$\Delta R_c = R - R_n = R_n \left[\frac{c(H_n)}{c(H_0)} - 1 \right], \qquad (2)$$

где R — фактическое расстояние; R_n — расстояние по прибору; $c(H_n)$ — скорость звука на глубине H_n; $c(H_0)$ — скорость звука

у устья скважины (тарировочная скорость). Для определения численного значения поправки ΔR_c нам неизвестна скорость звука на глубине H_n, которая зависит от температуры, концентрации раствора на этой глубине и гидростатического давления. Поэтому предварительно необходимо установить зависимость скорости звука от этих параметров.

Измерения скорости звука проводились Р. Уриком [2] в суспензии каолина в воде. В растворах коллоидальной глины (с удельным весом до 1,18 *г/см*^{3}) измерения были выполнены лабораторией ультраакустики ЛГУ [3] и получена зависимость скорости звука от концентрации раствора. Для расширения диапазона концентраций и установления температурной зависимости скорости звука в глинистых растворах коллоидного типа, применяемых при бурении, в лаборатории ультразвука ЛГИ проведены измерения скоростей звука в диапазоне температур от +5° до +40° С и концентраций от 0 до 40%.

Измерения выполнялись импульсно-фазовым методом (импульсный интерферометр), который позволяет достичь высокой точности измерения. Для измерений использовался прибор УЗИС-6 с рабочей частотой 0,42 *мгц* (вместо паспортной 1,67 *мгц*), что вызвано значительным затуханием звука в глинистом растворе.

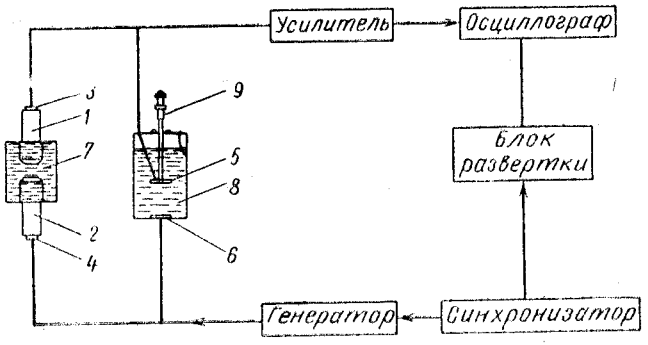


Рис. 1. Схема измерения скорости звука

Методика измерений заключалась в следующем (рис. 1). Металлические стержни-задержки *1, 2* с приемо-излучающими пьезокварцами *3, 4* погружались в сосуд *7*, заполненный глинистым раствором, приготовленным из высококоллоидальной глины Часов-Ярского месторождения. В сосуд *8* эталонной

линии, где размещены пьезокварцы *5, 6,* заливалась дистиллированная вода, скорость звука в которой достаточно точно известна.

Процесс исследования включал измерение времени прохождения звукового импульса через измерительную линию при двух положениях верхней задержки и сравнение его с временем импульса, прошедшего через эталонную линию. Подвижная задержка *1* устанавливалась в первоначальное положение с условием, чтобы расстояние между стержнями *1* и *2* было, по крайней мере, больше длины полуволны сигнала. Этим устранялось влияние контактного слоя на фазу волны при прохождении ее границы зедержка — раствор. Для повышения точности измерений при каждом из положений задержки *1* бралась серия отсчетов из 8—10 совмещений с помощью микрометрического винта *9.*

Величина скорости определялась по формуле

$$c_{\text{р}} = \frac{l}{n_2 - n_1} c_{\text{э}}, \qquad (3)$$

где $c_{\text{р}}$ — скорость звука; l — расстояние между задержками при первом и втором положениях; n_1, n_2 — показания микрометра, соответственно, при первом и втором положениях подвижной зарежки; $c_{\text{э}}$ — скорость звука в эталонной жидкости.

Среднеквадратическая ошибка измерения скорости составила $\pm 0{,}2\%$. Результаты измерений приведены на рис. 2.

На основании полученных экспериментальных данных и с учетом формулы Р. Вудда выведена эмпирическая зависимость скорости звука от концентрации и температуры

$$c = 1449 + 4{,}25\,t - 0{,}029\,t^2 - 1{,}145\,(s + 47) + 0{,}16\,P, \qquad (4)$$

где c — скорость звука, *м/сек*; t — температура, град.; s — весовая концентрация, %; P — давление, *ати.*

Ошибка расчета по этой формуле минимальная при температурах близких к 15° С и различных значениях концентрации. При этом разность между измеренным и расчетным значениями скорости не превышает 1,8 *м/сек.* Наибольшее отклонение (3,4 *м/сек*) наблюдается для глинистого раствора 7-процентной весовой концентрации при температуре +40° С.

Зависимость скорости звука от давления экспериментально не определялась. Влияние гидростатического давления, возрастающего с глубиной линейно, на изменение скорости звука

незначительно. По данным П. Бикара и Т. Холтона [2] для воды слагаемое, учитывающее приращение скорости с давлением, составляет 0,156 P, а для соляного рассола (в пределах концентрации 0—40%) по данным Р. Вудда 0,175 P [4]. Приняв для глинистого раствора в формуле (4) значение этого слагаемого 0,16 P, можно гарантировать, что ошибка определения коэффициента, учитывающего влияние давления на изменение скорости, находится в пределах ошибки измерения скорости звука.

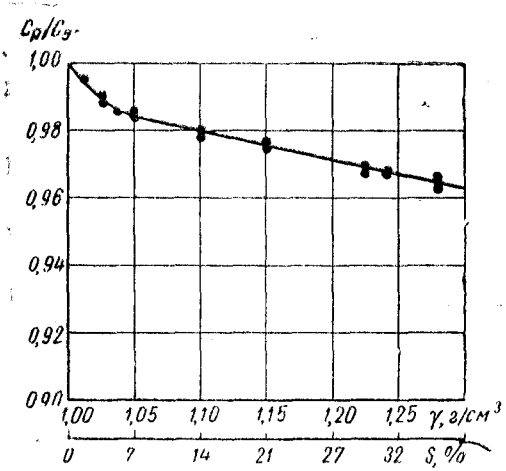


Рис. 2. Зависимость скорости звука от концентрации глинистого раствора

Пользуясь формулой (4), можно определить скорость звука на любом горизонте съемки, если известны t, s и P. Гидростатическое давление

$$P = H_n\gamma, \tag{5}$$

где H_n — глубина съемки (определяется по счетчику), $м$; γ — удельный вес раствора, $т/м^3$.

Для определения t и s предлагается перед съемочными работами выполнить ряд подготовительных операций: 1) термокаротаж (аппаратурой станции АЭКС-1500, на которой смонтирован звуколокатор) и измерение удельного веса (концентрации) раствора полевым ареометром АГ-2; 2) тарировку прибора для определения тарировочной скорости звука,

а также исключение из результатов измерений систематических ошибок, вызванных конструктивными особенностями аппаратуры и несовершенством измерительного устройства звуколокатора. После выполнения этих операций и определения планового положения точки схода кабеля относительно центра ствола скважины приступают к съемке. Полученные в результате съемки эхограммы горизонтальных сечений подлежат камеральной обработке. Обработка эхограмм начинается с расшифровки записи контуров сечений, при которой выделяются участки, требующие корректуры. После этого в измененные радиусы сечения вводится поправка ΔR_c за счет отличия скоростей распространения звука на горизонте съемки от тарировочной.

Для введения поправок измеряются радиусы горизонтального сечения ствола R_i' по радиальным линиям эхограммы и к ним добавляется (или вычитается) поправка ΔR_c. Исправленные радиусы

$$R_i = R_i' \pm \Delta R_c \tag{6}$$

откладываются от центра эхограммы по соответствующим радиальным линиям и отмечаются точкой. Соединяя плавной кривой эти точки, получаем контур сечения ствола скважины, свободный от систематических ошибок. Однако при определении величины поправки ΔR_c и введении ее в результат измерений возникает ряд случайных ошибок, которые как остаточные погрешности искажают конечный результат.

Погрешность определения скорости звука будет определяться ошибками параметров t, s и P. Согласно (4) ошибка скорости звука m_{c_t} за счет ошибки измерения температуры равна

$$m_{c_t} = \pm \sqrt{(4{,}25 - 0{,}06\,t)^2\, m_t^2}\,, \tag{7}$$

где t — температура на горизонте съемки; m_t — средняя ошибка измерения температуры.

Ошибка скорости звука m_{c_s} в зависимости от ошибки измерения концентрации

$$m_{c_s} = \pm 1{,}15\, m_s, \tag{8}$$

где m_s — средняя ошибка измерения концентрации раствора. Ошибкой скорости звука m_{cp} за счет ошибки измерения давления можно в нашем случае пренебречь. Действительно, если

$$m_{cp} = \pm 0{,}16\,P, \tag{9}$$

а из (5)

$$m_p = \pm \sqrt{H^2 m_\gamma^2 + \gamma^2 m_H^2}, \tag{10}$$

то при $H = 1000$ *м*, $m_\gamma = \pm 0{,}02$ *г/см*^{3} и $m_H = \pm 0{,}1$ *м* имеем

$$m_{cp} = \pm 0{,}16 \sqrt{10^4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} + 10^{-2}} = \pm 0{,}3 \text{ м/сек} = \pm 0{,}02\%,$$

где m_p — ошибки определения гидростатического давления, m_γ — удельного веса раствора, m_H — глубины спуска скважинного снаряда на горизонт съемки.

Результирующая ошибка определения скорости звука с учетом независимого и случайного характера составляющих ее ошибок и формул (7) и (8) составит

$$m_c = \pm \sqrt{m_{c_t}^2 + m_{c_s}^2} = \pm \sqrt{(4{,}25 - 0{,}06\,t)^2 m_t^2 + 1{,}32\, m_s^2}. \tag{11}$$

При измерении температуры раствора термометрами сопротивлений типа ЭС-СБ ($m_t = \pm 0{,}5°$ С) и удельного веса (концентрации) полевым ареометром АГ-2 ($m_s = \pm 1{,}9\%$) средняя ошибка определения скорости звука равна $\pm 0{,}2\%$, т. е. находится в пределах точности экспериментальных данных, по которым выведена эмпирическая формула (4). В этом случае ошибка определения скорости звука при принятой аппаратуре измерения *t, s* и методике учета поправки за счет непостоянства скорости звука с глубиной практически не оказывает влияния на ошибку измерения расстояний звуколокатором «Донецк».

Звуколокационная съемка вентиляционного ствола шахты 3—5 Соколоторовка показала, что изложенный способ учета и введения поправки ΔR_c вполне пригоден для практического пользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аранович В. Б. и др. Технические ошибки звуколокационных измерений в маркшейдерских работах. Зап. ЛГИ, т. XLVI, вып. 2, 1963.

2. Бергман Л. Ультразвук. ИЛ, 1957.

3. Лейбензон Б. И. Контроль вертикальности шахтных стволов методом ультразвуковой локации. Шахтн. стр-во, № 4, 1965.

4. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. Судостроение, 1966.