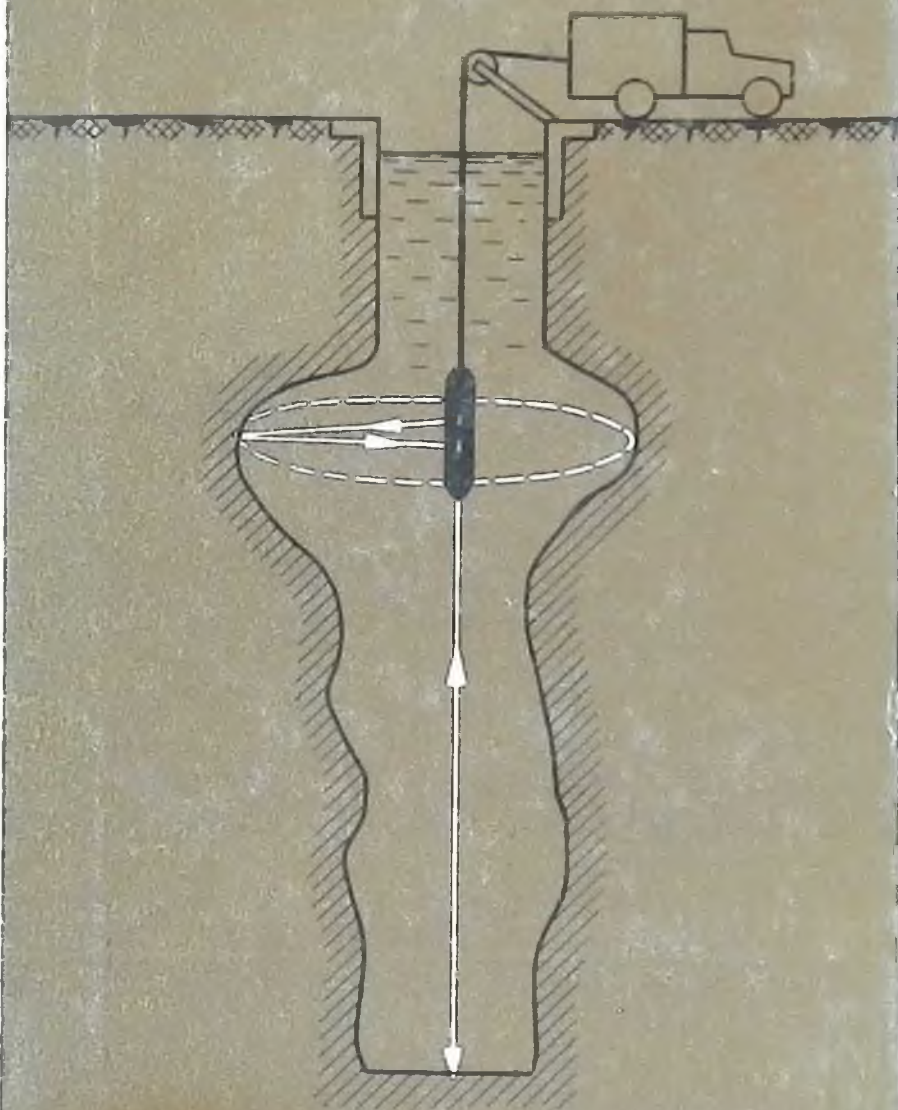


622.1

З-УУ

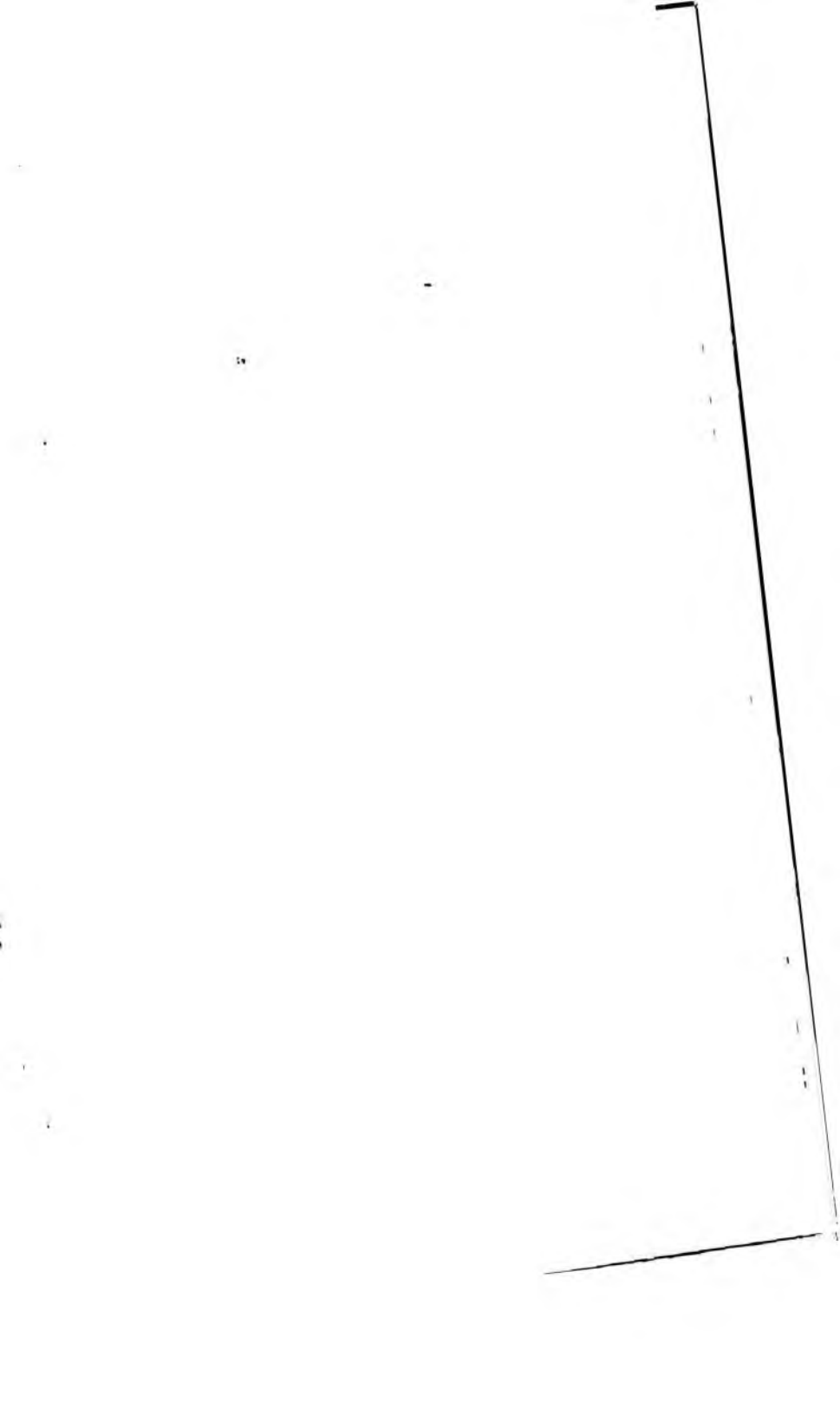
Звуколокационная съёмка горных выработок

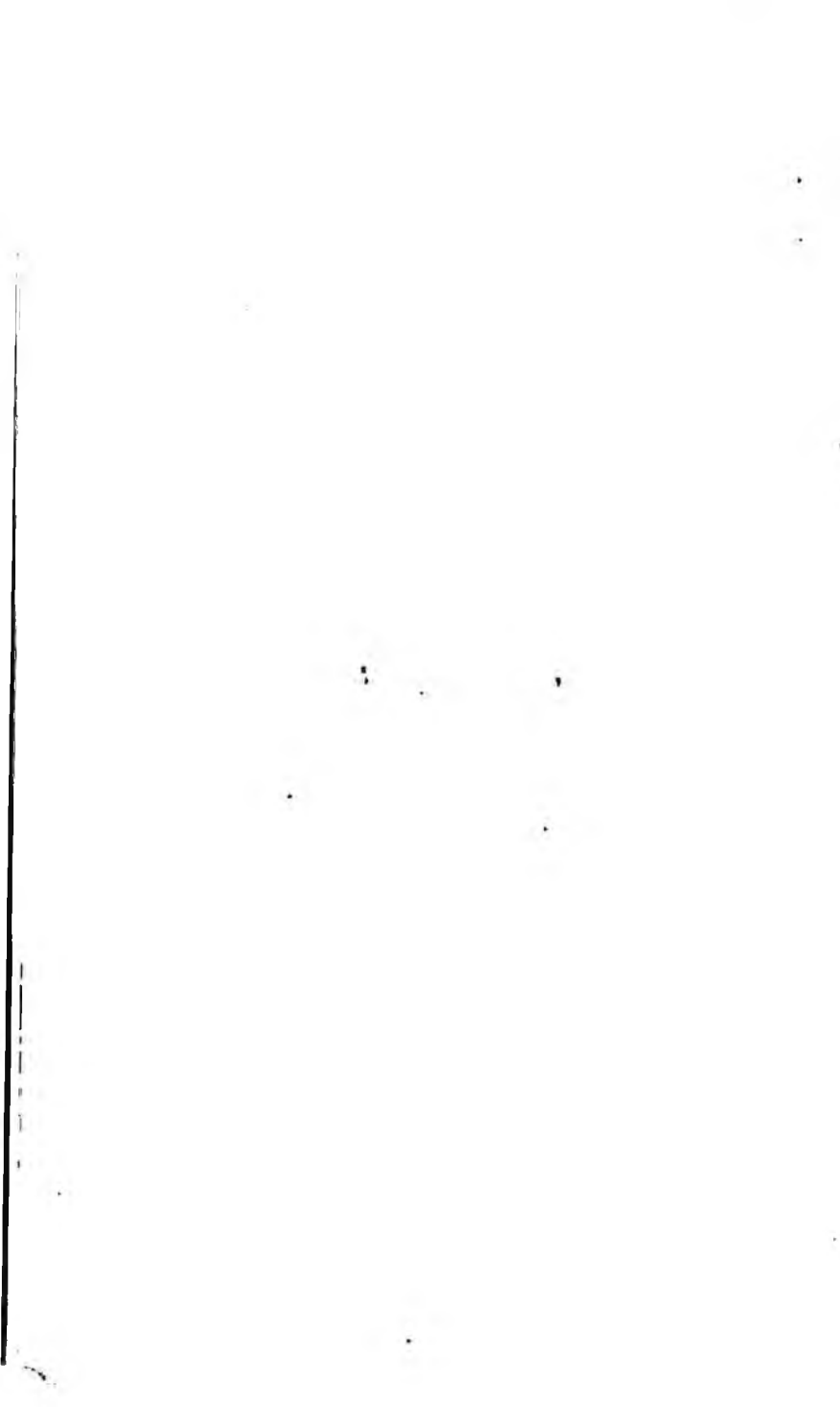


022.1	26769
3-44.	Звукозаписи
на с'ємке горних	
выработок	
	1-41

Книга должна быть возвращена не
позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач _____	



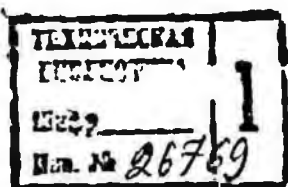


78

2004

622.1
3-44

Звуколокационная
съемка
горных
выработок



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1973

Звуколокационная съемка горных выработок. М., «Недра», 1973 248 с. Авт.: Д. А. Казаковский, А. А. Гурнич, Г. А. Кротов и др.

В книге рассмотрены физические основы звуколокации, область применения ее при решении горнотехнических задач. Изложены вопросы разработки звуколокационной аппаратуры. Приведена методика съемки горных выработок в различных условиях: в воздушной среде (рудоспуски, очистные камеры), в воде (дражные разработки и подводно-строительные работы) и в технических жидкостях (камеры выщелачивания соли, скважины большого диаметра). Дан анализ ошибок звуколокационных измерений. Обобщен отечественный и зарубежный опыт применения звуколокации в маркшейдерской практике.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся разработкой и применением звуколокационной аппаратуры, а также может быть полезна студентам горных вузов.

Таблиц 16, иллюстраций 97, список литературы — 54 назв.

Авторы: Д. А. КАЗАКОВСКИЙ, А. А. ГУРНИЧ, Г. А. КРОТОВ, Л. Н. РУДНЕВ, И. А. ПРУДОВ, В. Б. АРАНОВИЧ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Звуколокация как метод измерения расстояний практически реализована в начале XX в. в эхолотах для измерения морских глубин и в гидролокаторах для обнаружения подводных лодок. По мере совершенствования аппаратуры область ее применения расширялась. В 30-е гг. эхолоты стали использовать также для картирования дна водоемов и исследования поверхности слоя донных отложений. Первые попытки применения звуколокации для инженерно-геологических изысканий и съемки горных выработок относятся к послевоенным годам.

Необходимость изыскания новых методов маркшейдерского обслуживания горных работ была обусловлена ускоренным развитием горнодобывающей промышленности: внедрением новых технологических процессов, механизацией и автоматизацией производства, а также требованиями безопасности работ. Одними из первых направлений, где традиционные способы маркшейдерского контроля оказались недостаточно надежными и эффективными, были дражные разработки россыпных месторождений. В 1958 г. кафедра маркшейдерского дела ЛГИИ начала исследования по применению звуколокации для контроля за глубиной черпания и полнотой отработки россыпи драгами на Исовских приисках треста Уралзолото. На первом этапе работ были опробованы существующие типы эхолотов, а затем начата разработка специальной аппаратуры и методики, удовлетворяющих запросам современного производства. Эти исследования, проводившиеся Г. А. Кротовым, А. А. Гуричем, В. Б. Арановичем под руководством и при участии Д. А. Казаковского, показали перспективность звуколокации в маркшейдерских измерениях.

В тот же период горными предприятиями были поставлены задачи съемки камер выщелачивания солей, глубо-

ких вертикальных рудоспусков и других недоступных для человека выработок через буровые скважины. Для их решения в 1960 г. при кафедре маркшейдерского дела ЛГИИ была организована лаборатория электроакустических методов съемки горных выработок, проводившая исследования в трех основных направлениях: звуколокационные измерения в воздухе (рудоспуски, очистные камеры и другие подземные полости), в воде и рыхлых отложениях (подводная разработка месторождений полезных ископаемых и подводно-строительные работы) и в технических жидкостях (камеры выщелачивания соли, подземные хранилища нефтепродуктов, шахтные стволы и технические скважины). В этих исследованиях принимали участие также Л. Н. Руднев, И. А. Прудов и В. К. Чумак.

Практическое применение электроакустической аппаратуры дистанционного действия способствовало повышению безопасности горных работ и съемок, рациональному изменению технологии горных работ, повышению извлечения и снижению разубоживания полезных ископаемых.

Совершенно очевидно, что работа по созданию и применению в маркшейдерских целях звуколокационной аппаратуры должна быть продолжена. Во-первых, необходимо внедрение уже созданной звуколокационной аппаратуры. Во-вторых, надо продолжить разработку новых звуколокаторов для полной съемки камер выщелачивания, автоматической и детальной съемки очистных забоев при разработке месторождений полезных ископаемых на дне морей и в материковом шельфе, измерения глубины буровых скважин и автоматической профилировки стенок вертикальных шахтных стволов.

Следует также расширить область приложения звуколокации в маркшейдерском деле, например, для контроля за толщиной потолочин при разработке месторождений опасных с точки зрения прорыва воды и плывунов, прозвучивания целиков, изучения физических свойств массива горных пород и т. д.

План книги разработан проф. Д. А. Казаковским. Глава I написана В. Б. Арановичем, глава II — И. А. Прудовым и Л. Н. Рудневым, глава III — А. А. Гуричем и глава IV — Г. А. Кротовым.

Глава I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗВУКОЛОКАЦИИ

Все способы использования звука (ультразвука) в промышленности подразделяются на две принципиально отличные группы — активного и пассивного действия. К первой группе относятся способы, при которых звуковые колебания непосредственно воздействуют на объект применения (коагуляция золь, диспергирование нерастворимых компонентов, ускорение химических реакций и процессов флотации под действием звука и т. д.).

Способами пассивного действия получают информацию об объекте с помощью звука (определение физикомеханических свойств среды, измерение уровней, расстояний и т. п.). Звуколокация относится, естественно, к этой группе.

В данной главе рассмотрены те общие вопросы по распространению звука и принципам построения звуколокационной аппаратуры, которые служат основой для решения конкретных задач горнодобывающей промышленности. Знание физических основ метода необходимо также для правильной оценки практических возможностей звуколокации и области применения ее в маркшейдерском деле.

Поскольку звуколокация основана на измерениях параметров звукового поля, в первую очередь следует рассмотреть эти параметры и возможные способы получения информации.

§ 1. ПАРАМЕТРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ И ПРИНЦИП ЗВУКОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Под термином звуковое поле понимают совокупность явлений, связанных с распространением звука. Количественную характеристику этих явлений в каждой

отдельной точке дают параметры звукового поля: скорость распространения звука, звуковое давление, интенсивность, частота и период колебаний, длина волны, фаза.

Звук называют упругие колебания, которые воспринимаются человеческим ухом. Диапазон частот этих колебаний лежит в пределах $20-16 \cdot 10^3$ Гц. Колебания более низких частот принято называть инфразвуком, а более высоких — ультразвуком, но физическая природа их и законы распространения одинаковы, поэтому терминами звук и ультразвук в дальнейшем будем пользоваться независимо от конкретной частоты.

Скорость звука. В силу взаимосвязи между частицами упругой среды любое возмущение в ней (сжатие, разрежение, деформация) будет передаваться во все стороны от той точки, где оно возникло. Скорость, с которой передается возмущение, называют скоростью распространения звука c . В неограниченной среде скорость звука не зависит от частоты и определяется только упругостью среды σ и плотностью ρ

$$c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}. \quad (1)$$

В телах конечных размеров упругость может зависеть не только от свойств материала, но также от соотношения между размерами тела и длиной звуковых волн. Скорость звука при этом становится зависимой от частоты. Однако формула (1) всегда остается справедливой, если под σ понимать не отвлеченную характеристику материала, а упругость тела для данного вида колебаний. Например, когда волна сжатия распространяется вдоль тонкого стержня, его поперечные размеры под действием сжатия успевают измениться. Поэтому в тонком стержне, у которого поперечный размер значительно меньше длины волны, скорость распространения звука будет определяться уже не объемной упругостью, а упругостью одноосного сжатия, так называемым модулем Юнга.

В твердых телах, обладающих упругостью объема и формы, могут существовать различные типы звуковых волн: продольные, поперечные, поверхностные и др. Поскольку для звуколокации в горном деле используют

ся продольные волны, лишь о них и будет говориться в дальнейшем. Продольные волны можно представить как сжатие или разрежение (или их чередование), распространяющееся внутри тела. Для продольных волн характерно, что движение частиц колеблющейся среды в любом ее участке происходит вдоль линии распространения звука.

Жидкости и газы не обладают упругостью формы, поэтому в них могут существовать только продольные волны¹.

Звуковое давление p выражает собой отклонение давления в данной точке среды от равновесного состояния вследствие распространения звуковой волны. Таким образом, p показывает величину сжатия или разрежения, вызванного волной. Звуковое давление измеряется в ньютонах на метр квадратный (Н/м^2).

Период колебаний T — время между двумя последовательными сжатиями или разрежениями в какой-либо точке поля, измеряемое в секундах (с).

Частота f — величина, обратная периоду, показывает число колебаний в секунду. Единица частоты называется герц и обозначается Гц. Круговая частота ω , равная $2\pi f$, измеряется в радианах в секунду и имеет размерность $1/\text{с}$. Круговую частоту удобно использовать для математического описания гармонических процессов. Мгновенные значения звукового давления в любой точке поля в случае гармонической волны можно записать в виде:

$$p = p_m \sin \omega t \text{ или } p = p_m e^{i\omega t},$$

где p_m — амплитуда давления; t — время.

Амплитудой называют максимальное значение в пределах одного периода колебаний. Реальные процессы редко бывают чисто гармоническими, однако понятие частоты сохраняет свой физический смысл при любом характере возмущения, поскольку любую функцию можно разложить на гармонические составляющие (гармоники) в виде ряда Фурье. Каждая гармоника ряда будет иметь свою амплитуду. Зависимость амплитуды

¹ Те поверхностные волны, которые разбегаются от брошенного в воду камня, своим возникновением обязаны силам гравитации, а не упругости и, следовательно, не относятся к звуковым.

от частоты в той совокупности гармоник, которая соответствует реальному процессу, называют спектром. Это понятие аналогично понятию спектра в оптике и теории электромагнитных колебаний. Имея в виду спектр, всегда можно говорить о частоте звуковых колебаний, даже в тех случаях, когда распространяющееся возмущение представляет собой однократный всплеск давления.

Длина волны λ — расстояние между двумя последовательными сжатиями или разрежениями. Из предыдущих определений очевидно, что $\lambda = cT = c/f$. Понятие длины волны сохраняет свой смысл для негармонических процессов, если относить его к спектру.

Фаза колебаний. В пределах длины волны звуковое давление имеет все значения между положительной и отрицательной амплитудами. При этом гармоническому процессу соответствует изменение давления по синусоидальному закону: $p = p_m \sin \psi$. Аргумент ψ — фаза, измеряемая в радианах. Период по угловому аргументу составляет, как известно, 2π . На эту величину фаза колебаний в любой точке пространства должна измениться за промежуток времени, равный периоду. Отсюда следует

$$\psi(t) = 2\pi \frac{t}{T} = \omega t.$$

Аналогично этому, в любой момент времени зависимость фазы от расстояния

$$\psi(R) = 2\pi \frac{R}{\lambda} = kR,$$

так как периодичность по расстоянию определяется длиной волны λ .

Коэффициент k называют волновым числом.

С учетом совместного изменения фазы во времени и пространстве получим

$$p = p_m \sin(\omega t \pm kR) = p_m e^{j(\omega t \pm kR)}. \quad (2)$$

Знак определяется направлением отсчета R : плюс при движении к источнику звука, минус — от источника.

Интенсивность J — мощность, приходящаяся на единицу площади, ориентированной по нормали к направлению распространения волны, измеряется в ваттах на метр квадратный (В/м^2). Можно выразить ин-

тенсивность через звуковое давление, если воспользоваться понятием акустического сопротивления.

Решение волнового уравнения, описывающего распространение звука, показывает, что звуковое давление и скорость смещения частиц среды v_c связаны между собой соотношением $p/v_c = \rho c$. Величину ρc , обозначаемую для краткости ω , называют акустическим сопротивлением.

Выражая интенсивность звука как любую механическую мощность через скорость движения и действующую силу, получим

$$J = p v_c = p^2 / \omega. \quad (3)$$

Формула (3) относится к мгновенным значениям давления и интенсивности. Для гармонических процессов она дает среднеквадратическую интенсивность за период, когда в правой части стоит эффективная величина звукового давления $p = p_m / \sqrt{2}$.

Перечисленные параметры характеризуют поле в отдельных точках. Для представления поля в целом надо знать закономерности изменения параметров в пространстве, т. е. учитывать все явления, имеющие место при распространении звука. Легко показать, что частота и период в собственно звуковом поле не изменяются. Действительно, если источник звука за единицу времени генерирует f колебаний, а в какой-либо точке, неподвижной относительно источника, зафиксировано другое их число, то это означало бы исчезновение или самопроизвольное возникновение волн. Иная картина будет в движении. Когда приемник перемещается относительно источника, он фиксирует дополнительное число волн $n = \Delta R / \lambda$, где ΔR — изменение расстояния между ним и источником. Поскольку ΔR за единицу времени равно скорости движения приемника, то изменение наблюдаемой частоты $\Delta f = \pm v / \lambda$, где v — скорость движения приемника. Выразив частоту через длину волны и скорость звука ($f = c / \lambda$), получим кажущееся изменение частоты

$$\frac{\Delta f}{f} = \pm \frac{v}{c}.$$

Это изменение, вызванное движением, называется эффектом Доплера.

Длина волны в отличие от частоты может быть различной в разных участках поля, если скорость звука меняется, что видно из определения длины волны.

Для оценки изменения интенсивности следует рассмотреть сначала некоторые геометрические характеристики поля. На рис. 1 ненаправленный источник, от которого звуковые волны рас-

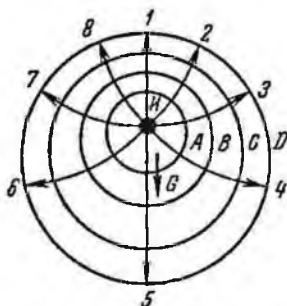


Рис. 1. Волновые фронты и траектории звуковых лучей при наличии градиента скорости звука

пространяются во все стороны, помещен в точке И. В любой момент времени можно выделить в окружающей среде точки равных фаз (например, начало волны или ее максимум). Совокупность таких точек представит собой поверхность волнового фронта. Отмечая положение фронта через равные промежутки времени, получим семейство волновых фронтов А, В, С, D. Линии, проведенные по нормали к волновым фронтам, показывают траектории распростра-

нения звука — звуковые лучи 1—8. Если скорость распространения постоянная по всему полю, волновые фронты будут представлять собой сферы с источником в центре. Звуковые лучи при этом совпадают с радиусами сфер и, естественно, все они прямолинейны. На рис. 1 показан случай, когда скорость распространения волны непостоянна по полю. Вниз от источника она увеличивается, вверх — уменьшается, т. е. имеется положительный градиент скорости G , направленный вниз. Из рисунка нетрудно установить, что звуковые лучи 1 и 5, направление которых совпадает с линией изменения скорости, остаются прямолинейными. Все остальные приобретают искривление и отклоняются в сторону меньших скоростей. Это явление называется рефракцией.

Кривизна луча в любой точке определяется соотношением скорости звука и ее градиента [49]

$$r = \frac{c}{G \sin \theta}, \quad (4)$$

где r — радиус кривизны; θ — угол между направлениями луча и градиента в данной точке поля.

Для оценки изменения интенсивности с расстоянием уточним понятия плоской и сферической волн. Если волновой фронт плоский, то в процессе распространения звука площадь его не изменится. Следовательно, при отсутствии поглощения в среде интенсивность звука, согласно закону сохранения энергии, меняться не будет. Другая отличительная черта плоской волны состоит в том, что для нее акустическое сопротивление выражается величиной $\omega = \rho c$. Однако строгой плоскости фронта для этого не требуется — достаточно, чтобы радиус кривизны фронта был больше длины волны. В звуколокации второе условие почти всегда выполняется, поскольку размеры излучателей направленного действия превышают длину волны. Но площадь волнового фронта изменяется при любом соотношении с длиной волны, если имеется кривизна. В равной степени это относится к ненаправленным и направленным излучателям: первые генерируют сферический волновой фронт, а у вторых излучение сконцентрировано в пределах определенного телесного угла, т. е. представляет собой часть сферической волны. В обоих случаях площадь волнового фронта, как площадь сферы, пропорциональна квадрату расстояния от источника.

Таким образом, при определении параметров поля в какой-либо точке, достаточно удаленной от излучателя, звуковые волны считаются плоскими, а в процессе распространения — сферическими.

Предположим, что в среде, где распространяется звук, поглощение энергии звуковых колебаний отсутствует. Тогда общая мощность волны, согласно закону сохранения энергии, изменяться не будет, а интенсивность изменится соответственно площади волнового фронта

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R_0^2}{R^2}. \quad (5)$$

С учетом формулы (3) получим

$$\frac{p}{p_0} = \frac{R_0}{R},$$

где R — текущее значение дальности; R_0 — значение дальности, когда звуковое давление p_0 или интенсив-

ность J_0 известны. Уменьшение интенсивности и давления, обусловленное чисто геометрическим фактором расширения волнового фронта, называют ослаблением за счет геометрического расхождения.

В любой среде из-за внутреннего трения, теплопроводности и других причин часть энергии колебаний теряется, переходя в тепло. Такого рода необратимые потери вызывают ослабление интенсивности звука, называемое диссипативным. Посмотрим, как сила звука при этом изменяется в зависимости от расстояния. Обозначив через β_1 коэффициент снижения давления на единице длины, будем иметь

$$\beta_1 = \frac{p_1}{p_0} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \dots,$$

где p_0 , p_1 и p_2 — давление на расстоянии соответственно R_0 , R_0+1 и R_0+2 .

Отсюда для произвольной дальности R , как в любой геометрической прогрессии

$$\frac{p}{p_0} = \beta_1^{(R-R_0)}; \quad \frac{J}{J_0} = \beta_1^{2(R-R_0)}$$

или

$$\frac{J}{J_0} = e^{-2\alpha(R-R_0)}; \quad \frac{p}{p_0} = e^{-\alpha(R-R_0)}, \quad (6)$$

где α — коэффициент затухания; $\alpha = \ln 1/\beta_1$.

В действительности эффекты геометрического расхождения и диссипации проявляются совместно, поэтому результирующая зависимость силы звука от дальности согласно формулам (5) и (6)

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R_0^2}{R^2} e^{-2\alpha(R-R_0)}; \quad \frac{p}{p_0} = \frac{R_0}{R} e^{-\alpha(R-R_0)}. \quad (7)$$

Эти формулы достаточно наглядны, но не всегда удобны для определения силы звука, поскольку в них входят параметры поля в некоторой контрольной точке R_0 .

Найдем теперь прямое выражение интенсивности через акустическую мощность источника P_a . Если источник ненаправленный, то мощность его равномерно распределяется по площади сферического волнового фронта

$$S = 4\pi R^2.$$

У направленного источника мощность излучения, сконцентрированная внутри некоторого телесного угла, распределяется на часть той же поверхности

$$S_{\gamma} = 4\pi R^2/\gamma,$$

где γ — коэффициент концентрации, выражающий отношение площадей волновых фронтов ненаправленного и направленного источников.

Из определения интенсивности как мощности, приходящейся на единицу площади волнового фронта, следует, что:

без учета диссипативного затухания

$$I = \frac{P_a}{S_{\gamma}} = \frac{P_a \gamma}{4\pi R^2},$$

с учетом диссипативного затухания

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\gamma P_a}{4\pi R^2 e^{2\alpha R}}; \\ \rho &= \sqrt{I \omega} = \frac{1}{Re^{\alpha R}} \sqrt{\frac{\gamma P_a \omega}{4\pi}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Формулы изменения интенсивности получены в предположении одинакового угла расхождения звукового пучка источника при любом удалении от него. Это предположение верно лишь на достаточно больших расстояниях. Действительно, если расхождение считать неизменным вплоть до источника, то при $R=0$ будем иметь $S=S_{\gamma}=0$ и $I=\infty$. На самом деле, площадь источника не равна нулю, поэтому интенсивность у его поверхности не обращается в бесконечность. Следовательно, формулы (5), (7) и (8) справедливы только для дальней зоны.

Звуковое давление и интенсивность в пределах поля могут изменяться в широких пределах, при этом числовой масштаб сравнения не всегда удобен, так как зависимость от расстояния выражается экспоненциальной функцией. Поэтому целесообразно использовать логарифмический масштаб. Отношение акустических величин выражают в децибелах (дБ). Один децибел соответствует $1/20$ десятичного логарифма отношения звуковых давлений и соответственно $1/10$ логарифма отношения интенсивностей, так как показатель степени для интенсивности удваивается. Коэффициент затухания α как ве-

личина логарифмическая тоже задается в децибелах, при этом вместо экспоненциальных выражений (7) будем иметь

$$(J/J_0)_{\text{дБ}} = (p/p_0)_{\text{дБ}} = -[\alpha(R - R_0) + 20 \lg R/R_0]_{\text{дБ}},$$

т. е. изменение интенсивности и давления выражается одним и тем же числом децибел. Следует только помнить, что каждые 20 дБ соответствуют изменению давления в 10 раз, а интенсивности — в 100 раз.

Отражение звука происходит там, где резко изменяется акустическое сопротивление, обычно на границе раздела сред. Наиболее простым является случай падения звуковой волны на гладкую границу раздела двух жидких или газообразных сред, показанный на рис. 2. При

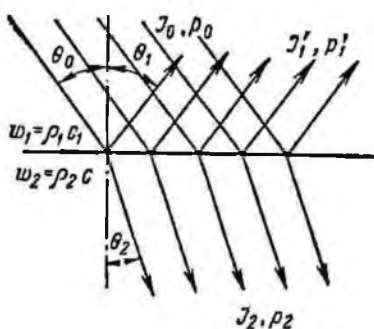


Рис. 2. Отражение и преломление звука

этом имеет место зеркальное отражение, при котором угол отражения θ_1 равен углу падения θ_0 , а угол преломления θ_2 определяется соотношением скоростей,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_2}{c_1}.$$

Коэффициент отражения по давлению

$$K_p = \frac{p_1}{p_0} = \frac{w_2 \cos \theta_1 - w_1 \cos \theta_2}{w_2 \cos \theta_1 + w_1 \cos \theta_2}. \quad (9)$$

При нормальном падении, когда $\theta_1 = \theta_2 = 0$,

$$K_p = \frac{w_2 - w_1}{w_2 + w_1}. \quad (10)$$

Из этой формулы видно, что модуль коэффициента отражения не изменится, если волна падает в противоположном направлении — из среды w_2 в среду w_1 , так как при этом поменяются местами только индексы акустических сопротивлений. По той же причине сдвиг фаз между прямой и отраженной волнами вследствие изме-

нения знака в числителе при обратном направлении падения изменится на π . Фазы прямой и отраженной волн совпадают, когда $\omega_2 > \omega_1$.

Интенсивность отраженной волны

$$J_1' = (\rho_1')^2 / \omega_1 = J_0 K_p^2.$$

Пользуясь законом сохранения энергии, несложно найти:

интенсивность звука за границей раздела

$$J_2 = J_0 - J_1' = J_0 \frac{4\omega_2\omega_1}{(\omega_2 + \omega_1)^2};$$

звуковое давление

$$p_2 = \sqrt{J_2 \omega_2} = p_0 \frac{2\omega_2}{\omega_2 + \omega_1}.$$

Коэффициенты, которые выражают зависимость между параметрами падающей волны и волны, проходящей сквозь границу раздела, называют соответственно коэффициентом прозрачности по интенсивности и коэффициентом по давлению

$$D_J = \frac{4\omega_2\omega_1}{(\omega_2 + \omega_1)^2}; \quad D_p = \frac{2\omega_2}{\omega_2 + \omega_1}. \quad (11)$$

На границе раздела двух твердых тел или жидкости с твердым телом при нормальном падении коэффициенты отражения и прозрачности выражаются через акустические сопротивления так же, как в рассмотренном примере с двумя жидкостями. При падении звуковой волны на границу твердого тела под углом картина может сильно усложниться из-за частичного преобразования энергии продольных волн в поперечные и поверхностные.

Гладкие границы раздела, где имеет место зеркальное отражение (см. рис. 2), редко встречаются в действительности. Такие поверхности могут быть у деталей аппаратуры или искусственных сооружений, а поверхности горных выработок и границы раздела пород в массиве всегда неровные, шероховатые. На неровных поверхностях звук при отражении рассеивается по разным направлениям. Характер рассеяния зависит от формы неровностей и их размеров по отношению к длине звуковой волны. Заметное рассеяние возникает, когда сред-

ний размер неровностей превышает $0,05\lambda$. По мере увеличения неровностей или уменьшения длины волны рассеяние усиливается, однако, если каждый из элементов поверхности станет значительно больше длины волны, то он будет самостоятельным отражателем и равномерность рассеяния вновь нарушится. Наилучшее рассеяние дают поверхности, имеющие неровности разных порядков, где грани крупных неровностей заполнены более мелкими выступами и впадинами, а они, в свою очередь, имеют шероховатости.

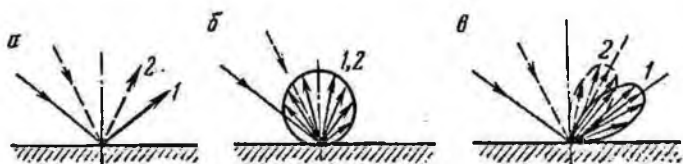


Рис. 3. Индикатриссы рассеяния на поверхностях с различной реакцией

Степень рассеивающего действия поверхности оценивается индикатриссой рассеяния, которая показывает зависимость интенсивности отраженной волны от угла между данным направлением и направлением зеркального отражения. Примеры индикатрисс приведены на рис. 3. У зеркально отражающей границы (рис. 3, а) индикатрисса отображается прямой линией, направление которой 1 или 2 определяется падающей волной (угол отражения равен углу падения). Поскольку при этом имеет место однозначное соответствие между направлениями падающей и отраженной волн, такую границу раздела называют поверхностью с локальной реакцией. Идеально рассеивающую границу (рис. 3, б) где индикатрисса изображается окружностью и совсем не зависит от угла падения исходной волны, называют поверхностью с диффузной реакцией. Рис. 3, в, где наблюдаемое рассеяние существенно зависит от направления падающей волны, соответствует поверхности с локально-диффузной реакцией.

Рассчитать индикатриссу рассеяния реальной поверхности практически невозможно, так как закон распределения неровностей неизвестен. Обычно индикатрис-

сы получают экспериментально для каждого типа поверхности. Общая интенсивность отраженной волны при неровной поверхности определяется суммой элементарных еще сложнее, чем индикатриссу. Можно дать только еще сложнее, чем индукатриссу. Можно дать только приближенную оценку общего коэффициента отражения по формуле (9) или (10).

Благодаря статистическому усреднению реальных коэффициентов отражения такая оценка, несмотря на некоторую неточность, позволяет получать вполне достоверные исходные данные для инженерных расчетов.

Под интерференцией звуковых волн понимают их взаимодействие. Взаимодействовать могут волны любого вида и частоты, однако наибольший интерес представляет интерференция когерентных волн, т. е. волн, имеющих одинаковую частоту и вполне определенный сдвиг фазы. В качестве примера можно рассмотреть интерференцию при отражении звука по нормали от гладкой поверхности. При этом взаимодействуют между собой падающая и отраженная волны. На участках поля не слишком большой протяженности ослабление звука при распространении можно не учитывать. Тогда из формулы (2) будем иметь:

для падающей волны

$$p_0 = p_{0m} \sin(\omega t + kR);$$

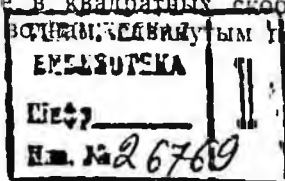
для отраженной волны

$$p_1' = p_{1m}' \sin(\omega t - kR) = p_{0m} K_p \sin(\omega t - kR).$$

Перемена знака в аргументе отраженной волны учитывает обратное направление ее распространения. Понятие направления относится только к процессу распространения волны, а само по себе звуковое давление никакого направления не имеет, поэтому давления обеих волн в любой точке можно складывать алгебраически. Складывая p_0 и p_1' , для результирующей волны получим

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 + p_1' = p_{0m} [\sin(\omega t + kR) + K_p \sin(\omega t - kR)] = \\ &= p_{0m} [(1 + K_p) \sin \omega t \cos kR + (1 - K_p) \cos \omega t \sin kR]. \quad (12) \end{aligned}$$

Последнее выражение в квадратных скобках соответствует двум стоячим волнам, сдвинутым по фазе во



времени и пространстве на $\pi/2$. В чистом виде каждую из этих стоячих волн можно получить при $K_p = \pm 1$, например, на границе вода — воздух. Акустическое сопротивление воздуха настолько мало, что им можно пренебречь по сравнению с водой. Тогда из формул (10) и (12) для случая падения звуковой волны со стороны воздуха будем иметь

$$K_p = 1 \text{ и } p_1 = 2p_{0m} \sin \omega t \cos kR,$$

а в обратном направлении

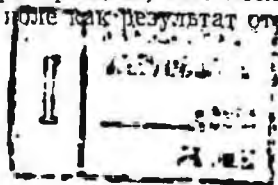
$$K_p = -1 \text{ и } p_1 = 2p_{0m} \cos \omega t \sin kR.$$

Нетрудно убедиться в том, что эти волны действительно стоячие. Изменения давления во времени и пространстве выражаются двумя независимыми аргументами, поэтому в точках, где $kR = n\pi$ ($n=0, 1, 2, 3, \dots$) при $K_p = 1$ всегда будет максимум давления, а при $K_p = -1$ в этих же точках звуковое давление в любой момент времени равно нулю. Таким образом, волна как бы стоит на одном месте и лишь давление меняется во времени с той же частотой, как у исходной волны, но с удвоенной амплитудой. Следует заметить, что стоячая волна не переносит энергии, поэтому интенсивность в среде ω_1 нельзя определять через звуковое давление p_1 . Можно говорить лишь раздельно об интенсивностях прямой и отраженной волн, определяемых соответственно значениями p_0 и p_1' .

Если коэффициент отражения не равен единице, то интерференция дает в итоге сумму стоячей и обычной (бегущей) волн.

Дифракция — способность волн огибать препятствия. Более точным будет определение дифракции как искажения геометрии поля, вызванного неоднородностью волнового фронта. Дифракция полностью отсутствует только у однородных сферических волн, фронт которых ничем не нарушен. Проявления дифракции совершенно одинаковы как для препятствия, закрывающего отдельный участок волнового фронта, так и для «окна» такого же размера в сплошном препятствии на пути распространения волны.

Реверберация, или послезвучание, возникает в звуковом поле как результат отражений звука. Причины



реверберации могут быть самыми различными, например многократные отражения звука от стенок замкнутого объема, отражения от неоднородностей среды, заполняющей этот объем, и т. д.

Любое из рассмотренных явлений в звуковом поле может быть использовано для получения информации. Измерения скорости распространения звука могут дать сведения о свойствах среды (состав, температура, напряженное состояние и т. д.), если зависимость измеряемых параметров от этих свойств заранее известна.

По эффекту Допплера можно судить о скоростях движения различных тел в звуковом поле и таким образом определить, например, скорость перемещения звуколокатора по створу при съемках дна водоема. Изучая отражение звуковых сигналов от поверхностей горных выработок, можно получить представление о рельефе и других свойствах поверхности. И, наконец, измеряя время распространения звуковых сигналов до границ горной выработки, можно определить ее форму и размеры, если скорость распространения звука известна. Решение последней задачи и составляет предмет звуколокации. Таким образом, звуколокация представляет собой лишь один из многих методов получения информации с помощью звукового поля. Ее основу составляет измерение времени распространения звуковых сигналов. Расстояние определяется звуколокационным методом всегда через скорость и время распространения звука

$$R = \frac{1}{2} \Delta t c, \quad (13)$$

где Δt — интервал между посылкой и приемом звукового сигнала; двойка в знаменателе учитывает, что звук должен дважды пройти измеряемое расстояние — от приемопередатчика к объекту и обратно.

Когда по условиям работы излучатель и приемник находятся в разных местах объекта, то измеряется время распространения сигнала между ними. В этом случае удваивать знаменатель не надо. Если скорость звука, необходимая для интерпретации результатов измерений расстояния неизвестна заранее, она может быть определена тем же самым методом звуколокации — по времени распространения звука на известной базе.

Существует несколько способов определения времени распространения: фазовый, частотный и импульсный (рис. 4), а также их комбинации.

При фазовом способе излучатель *И* непрерывно посылает звуковой сигнал одной и той же частоты. Отразившись от объекта локации, сигнал возвращается обратно. Разность фаз между излучаемым и принимаемым сигналами, или модуляция фазы, как ее называют иногда, будет пропорциональна расстоянию до

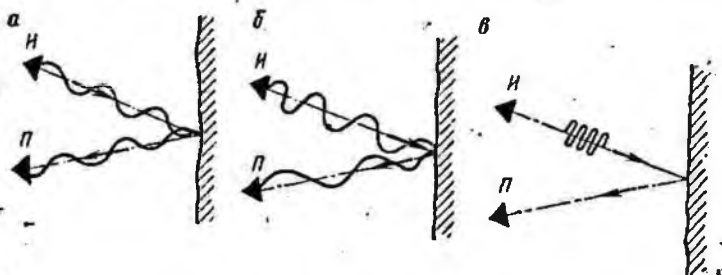


Рис. 4. Основные способы определения времени распространения звуковых сигналов:

а — фазовый; б — частотный; в — импульсный

лоцируемой поверхности. Измерив сдвиг фаз и зная частоту, нетрудно найти сдвиг по времени, а затем расстояние, соответствующее измеренному сдвигу. Этот процесс в целом носит название демодуляции, поскольку он представляется обратным по отношению к модуляции.

Современная аппаратура позволяет выполнять фазовую демодуляцию с точностью до $0,01 \lambda$. Это весьма высокая точность. Например, в воздухе, где скорость звука составляет примерно 340 м/с, длина волны λ на частоте $20 \cdot 10^3$ Гц будет приблизительно равна 17 мм и фазовая демодуляция позволит при этом отметить изменение расстояния до 0,2 мм. Однако реализовать высокую точность фазового способа можно лишь в определенных условиях. Во-первых, сдвиг фазы вследствие периодичности процесса измеряется в пределах лишь одной длины волны, а общее число волн остается неизвестным. Во-вторых, на неровной поверхности фаза отраженного сигнала будет иметь флуктуацию, соответ-

ствующую размеру неровностей. Таким образом, фазовый способ измерений в чистом виде пригоден для локации гладких поверхностей и только тогда, когда вариации измеряемого расстояния не превышают одной длины волны. Так, он может быть применен для профилирования проводников вертикальных шахтных стволов, где необходима высокая точность и где лоцируемая поверхность удовлетворяет указанным требованиям.

При частотном способе измерения на излучатель посылается сигнал, модулированный по частоте. Частота линейно меняется от некоторого начального значения до максимального, а затем вновь возвращается к исходному, и цикл повторяется. Период линейного изменения частоты должен превышать максимальное время задержки отраженного сигнала. Тогда, сравнивая частоты на приеме и излучении, можно найти время задержки. Точность частотной модуляции и демодуляции невысокая, погрешность достигает 2%. В этом отношении частотный способ уступает фазовому, но не требует особой ровной отражающей поверхности. Правда, для ступенчатых поверхностей, где дальность локации меняется скачкообразно, он тоже неприменим.

Импульсный способ основан на импульсной модуляции излучаемого сигнала. Время задержки определяется непосредственно как промежуток между излучением и приемом импульса. Точность измерений в значительной степени зависит от условий и колеблется в пределах 0,5—3%. Импульсный способ применим для поверхностей с любыми неровностями, в том числе для ступенчатого рельефа со значительными скачками дальности. Благодаря этому свойству и упрощенной интерпретации результатов измерений в производственных условиях применяется почти исключительно импульсная локация.

Комбинированный импульсно-фазовый способ используется в лабораторных измерениях, например для точного измерения скорости распространения звука. Время задержки определяется в первом приближении по сдвигу излученного и принятого импульсов, а уточняется по сдвигу фаз колебаний в них. Точность комбинированного способа достигает 0,1%.

Во всех упомянутых способах звуколокационных измерений можно заметить общую последовательность

операций. Соответствующая ей общая функциональная схема звуколокационной аппаратуры показана на рис. 5. Модулятор вырабатывает электрические сигналы для возбуждения излучателя, который преобразует их в акустические и посылает во внешнюю среду. Отраженный сигнал, возвратившись от объекта, поступает на приемник и вновь преобразуется им в электрические колебания.

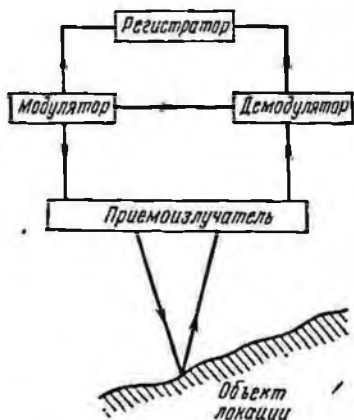


Рис. 5. Общая функциональная схема звуколокатора

Поскольку излучатель и приемник выполняют преобразование энергии одного вида в другой: электрической — в акустическую и обратно, то их обычно называют преобразователями. Излучатель и приемник могут быть отдельными или совмещенными в одном преобразователе. На рис. 5 они показаны обобщенным функциональным блоком. С приемника сигналы передаются на демодулятор и

далее на регистратор. Функция демодулятора состоит в том, чтобы на основе сравнения электрических сигналов на приеме и излучении выдавать результат измерения в форме, пригодной для фиксации его на регистрирующем устройстве.

В конкретной звуколокационной аппаратуре каждый из перечисленных блоков обобщенной схемы может иметь различное содержание и, в свою очередь, состоять из многих функциональных узлов.

§ 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

За время применения звуколокации в горном деле накоплены сведения по многим объектам, хотя они, конечно, не охватывают всех возможных условий. В настоящем разделе дается подборка материалов, относя-

щихся к горным выработкам, заполненным воздухом и жидкими средами. Обширный комплекс вопросов по распространению звука в массиве горных пород пока еще мало разработан. В этой части мы ограничимся некоторыми сведениями по водонасыщенным донным отложениям, в которых звуколокационные измерения выполняются при подводной отработке месторождений полезных ископаемых и некоторых видах подводных строительных работ.

Скорость распространения звука. При нормальном атмосферном давлении и нулевой температуре скорость звука в воздухе составляет 331 м/с. Уменьшение атмосферного давления с высотой снижает упругость воздуха и одновременно его плотность, поэтому скорость звука изменяется значительно медленнее, чем давление. Зависимость скорости звука от высоты H над уровнем моря и температуры t может быть определена по данным [24] эмпирической формулой

$$c(t, H) \approx 331(1 + 1,8 \cdot 10^{-3}t)(1 - 0,95 \cdot 10^{-5}H), \quad (14)$$

из которой видно, что поправка за высоту составляет менее 0,1% на каждые 100 м. Для горных выработок, где глубина не превышает нескольких сот метров, эта поправка не имеет значения. Наоборот, температурная поправка, приблизительно равная 1,8% на 10°C , может заметно повлиять на результаты измерений. Запыленность воздуха, так же как и влажность, практически не изменяет скорость распространения звука в нем.

В воде и водных растворах в отличие от воздуха температурная зависимость скорости имеет ярко выраженную нелинейность [6, 35]. Для пресной воды она близка к параболической (рис. 6) с максимумом 1557 м/с при температуре 74°C и определяется формулой

$$c(t, H) \approx 1405[1 + 0,292 \cdot 10^{-2}t(1 - 0,675 \cdot 10^{-2}t)] \times \\ \times (1 + 1,2 \cdot 10^{-5}H). \quad (15)$$

Поправка за изменение гидростатического давления с глубиной H невелика, но при больших глубинах может достигать нескольких процентов.

В глинистых буровых растворах температурная зависимость скорости звука аналогична температурной зависимости скорости звука в чистой воде.

Большое количество взвешенных частиц в технической воде и буровых растворах заметно понижает скорость звука (см. рис. 6), причем наиболее крутое падение имеет место при концентрации взвесей до 60‰.

Растворенные в воде соли уменьшают ее сжимаемость и скорость звука возрастает пропорционально концентрации. В морской воде и хлорнатриевых промышленных рассолах приращение скорости

$$\Delta c(s) \approx 1,1s, \quad (16)$$

а в промышленных рассолах KCl

$$\Delta c(s) \approx 0,75s, \quad (17)$$

где s — концентрация рассола, ‰.

Водонасыщенные горные породы отличаются большим разбросом значений скорости. Помимо плотности пород на скорость распространения звука влияют вещественный и гранулометрический составы, условия образования и другие факторы [15]. Однако мож-

Рис. 6. Графики зависимости скорости звука в воде от температуры t и концентрации взвешенных частиц s (глинистый раствор)

но заметить общую тенденцию возрастания скорости звука с увеличением плотности среды.

	$c \cdot 10^3, \text{ м/с}$
Ил	1,46—1,62
Илистый песок	1,58—1,63
Песок	1,58—1,78
Глина	1,55—2,2
Песчанники	2—2,5
Известняки	3—4

Приведенные цифры получены разными авторами при измерениях скорости в условиях естественного залегания донных отложений. Лабораторные измерения на образцах дают обычно заниженные значения. При извлечении образца рыхлого грунта нарушается его внутренняя структура, кроме того, внутри образца появляются

воздушные пузырьки. Даже если образец не имел контакта с воздухом, пузырьки все равно могут появиться вследствие снижения гидростатического давления при подъеме образца на поверхность и выделения растворенного воздуха. Ничтожные количества свободного воздуха могут заметно изменить свойства водных растворов и водонасыщенных грунтов. Причина этого заключается в огромной разнице упругостей воды и воздуха.

При нормальном атмосферном давлении отношение их упругостей составляет $1,4 \cdot 10^4$. В этих условиях, как показывает расчет, присутствия воздушных пузырьков в количестве 0,01% объема воды уже достаточно, чтобы уменьшить ее упругость в 2 раза и соответственно снизить скорость распространения звука на 40%.

Источником газовых пузырьков в воде и донных отложениях могут служить разлагающиеся органические вещества. Там, где они есть, иногда наблюдаются аномально низкие скорости распространения звука. В еще большей степени, чем на скорость распространения звука, аэрация водных растворов и водонасыщенных грунтов влияет на затухание.

Затухание звука. Затухание в отличие от скорости распространения существенно зависит от частоты. В твердых телах, в том числе монолитных горных породах, коэффициент затухания пропорционален первой степени частоты

$$\alpha = \alpha' f. \quad (18)$$

Для каждого материала α' величина постоянная в очень широком диапазоне частот — от десятков герц до мегагерц [34].

В жидкостях и газах затухание пропорционально второй степени частоты

$$\alpha = \alpha'' f^2, \quad (19)$$

но, коэффициент α'' может менять свое значение в различных диапазонах частот.

Зависимость, показанная на графиках (рис. 7), типична для большинства жидкостей и газов. От самых низких частот до некоторой нижней критической частоты f_{II} постоянство α'' соблюдается. От f_{II} до верхней кри-

тической частоты f_n происходит резкое уменьшение его, а далее коэффициент α'' вновь постоянен. Интервал частот между f_n и f_B называется релаксационной областью, так как изменение затухания является следствием молекулярной релаксации. На низких частотах потери энергии обусловлены

суммой внутримолекулярного и межмолекулярного трения. На высоких частотах атомы внутри молекул не успевают колебаться в такт с изменением звукового давления, поэтому внутримолекулярные потери отсутствуют. У воды, как видно из рис. 7, интервал релаксации лежит в пределах 30—600 кГц. В этой области нельзя считать затухание пропорциональным второй степени частоты, тем не менее рост затухания выражен достаточно ярко. Например, при частоте 30 кГц в пресной воде $\alpha \approx 10^{-3}$ дБ/м. Следовательно, диссипативное ослабление на 20 дБ, т. е. уменьшение звукового давления в 10 раз, будет иметь место на расстоянии 20 км от источника звука. Естественно, что такое малое затуха-

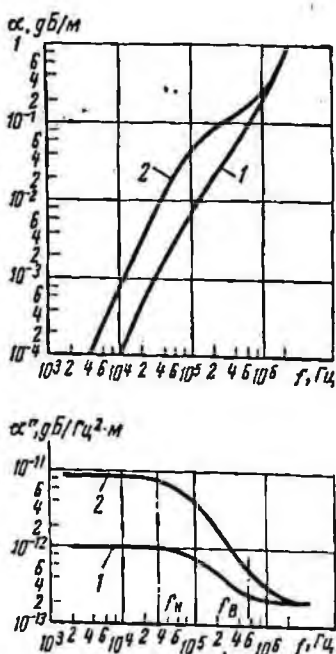


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициентов затухания α и α'' при $t=20^\circ\text{C}$:

1 — для пресной воды; 2 — для морской воды

ние не играет практически никакой роли. При частоте 100 кГц ($\alpha \approx 7 \cdot 10^{-3}$ дБ/м) те же 20 дБ будут получены уже на расстоянии 2,8 км, а при 1 МГц — всего лишь на расстоянии 100 м. Этот пример достаточно наглядно показывает важность правильного выбора рабочей частоты для обеспечения необходимой дальности действия звуколокатора.

Помимо частоты на величину коэффициента затухания существенно влияет состояние среды: температура, давление, содержание взвешенных частиц и т. д. Температурная зависимость α'' для воды при частоте выше f_0 показана на рис. 8. Аналогичная картина имеет место и на всех других частотах. При температурах от 0 до 20°С, наиболее часто встречающихся на практике, коэффициент затухания меняется более чем вдвое [6, 24].

Взвешенные в воде частицы вносят дополнительное затухание, причем зависимость этого дополнительного затухания от частоты не такая, как для основного. Экспериментальные данные показывают, что она приближенно соответствует первой степени частоты: $\alpha_d = \alpha'_d f$.

Результирующее затухание во взмученной технической воде и глинистых растворах определяется суммой основного и дополнительного коэффициента затухания

$$\alpha_p = \alpha + \alpha_d = \alpha'' f^2 + \alpha'_d f.$$

В буровых растворах дополнительное затухание может быть значительно больше основного. Например, при $s = 200\%$ (глинистый раствор плотностью 1,17 г/см³), $\alpha'_d = 6 \cdot 10^{-5}$ дБ/Гц·м и на частоте 100 кГц соответственно $\alpha_d = 6$ дБ/м. Из-за высокого затухания колебания ультразвуковых частот не могут передаваться в глинистых буровых растворах на большие расстояния. Дальность действия звуколокаторов ограничивается несколькими метрами [4]. Из рис. 8 видно, что график зависимости коэффициента затухания от концентрации

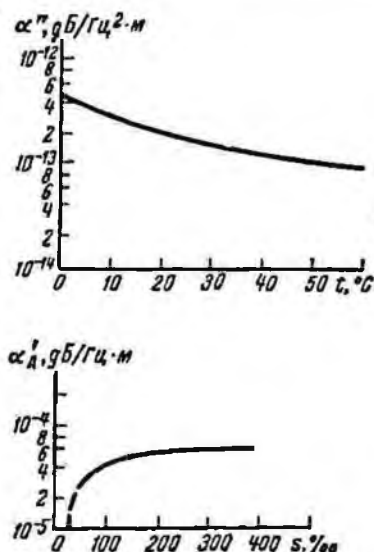


Рис. 8. Графики зависимости затухания в воде от температуры t и концентрации взвешенных частиц s (глинистый раствор)

глинистых растворов имеет подобно скорости звука (см. рис. 6) явно выраженный перегиб в области $s \approx 60\%$. Такое совпадение не случайно, оно связано со структурообразованием в растворах. Возникновение структуры, а следовательно, и контактов между взвешенными частицами повышает упругость среды и уменьшает внутреннее трение.

В водных растворах солей одновалентные ионы почти не вносят дополнительного затухания, поэтому в растворе поваренной соли затухание такое же, как в чистой воде. Двухвалентные ионы вносят заметное дополнительное затухание на частотах ниже их собственной релаксационной частоты. Повышенное затухание в морской воде обусловлено в основном присутствием там солей магния (в частности, $MgSO_4$), которые дают в растворе двухвалентные ионы [46].

Гидростатическое давление само по себе не оказывает существенного влияния на затухание звука. Косвенно действие гидростатического давления проявляется через содержание воздуха в воде и растворах. Наличие воздушных пузырьков во много раз увеличивает затухание. Например, в буровых растворах всегда содержится некоторое количество воздуха, попадающего туда в процессе их приготовления. Поэтому вблизи поверхности раствора ультразвуковые сигналы полностью затухают на расстоянии нескольких сантиметров. По мере увеличения гидростатического давления с глубиной повышается растворимость воздуха и пузырьки исчезают. На глубине свыше 15—20 м раствор практически полностью обезгаживается и затухание снижается до нормальной величины. Подобная картина наблюдается также в рассолах, поскольку растворимость воздуха там низкая. В пресной воде аэрация выражена не так сильно, но тоже может иметь место.

Из сказанного следует, что по возможности нужно работать в жидких средах вне зон аэрации или устранять ее принудительно. При лабораторных измерениях водные растворы можно обезгаживать сильным нагревом с последующим охлаждением. Если по условиям производства необходимо работать в зоне аэрации (например, при измерении глубины черпания вблизи черпаковой цепи работающей драги), то допустимая степень ее должна определяться экспериментально.

Аэрация является одной из основных причин повышенного затухания звука в водонасыщенных донных грунтах. Очень часто грунты одинакового литологического состава в сходных условиях залегания обладают настолько различным поглощением, что на одном участке глубина проникновения звука составляет несколько десятков метров, а на соседнем не достигает и одного метра. Правда, разброс значений затухания в донных грунтах достаточно велик и без аэрации. На затухание влияют гранулометрический состав, пористость, структура грунта и т. д. Частотная зависимость затухания в водонасыщенных грунтах пока еще не исследована в достаточной мере.

В сухом воздухе, не содержащем паров воды, соблюдается квадратичная зависимость затухания от частоты при постоянном значении коэффициента α'' . Однако воздух всегда содержит влагу, которая увеличивает затухание в области частот до 100 кГц (рис. 9). Значение α'' и $\alpha = \alpha'' f^2$ определяется в этой области относительной влажностью. Зависимость затухания от влажности, показанная на рис. 10, имеет явно выраженный максимум. Если ориентироваться на максимальную величину коэффициента затухания, то снижение уровня сигнала на 20 дБ за счет поглощения в воздухе будет иметь место на расстоянии 56 м при частоте 10 кГц и 5 м — при частоте 50 кГц. В шахтной атмосфере, где влажность обычно высокая, затухание меньше максимального в 2—3 раза. Но и в этом случае оно настолько велико, что ультразвуковые частоты свыше 100 кГц, используемые в воде, применить для локации в воздухе невозможно. Звуколокационные измерения осуществляются в воздухе на частотах вблизи границы звукового диапазона.

Воздух в горных выработках может быть запыленным, что дает еще дополнительное затухание, которое так же, как в воде, пропорционально первой степени частоты. Пример зависимости его от концентрации взвешенных в воздухе частиц приведен на рис. 10. График $\alpha'(s)$, полученный при экспериментах с цементной пылью [40], является приближенным и не может быть использован во всех условиях, так как затухание помимо весовой концентрации зависит от гранулометрического состава пыли. Однако можно утверждать, что дополнительное затухание от запыленности мало влияет на вели-

чину результирующего коэффициента затухания в воздухе.

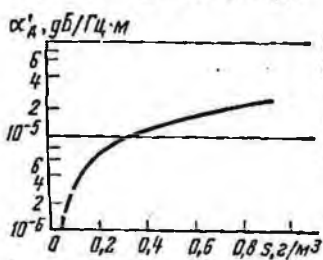
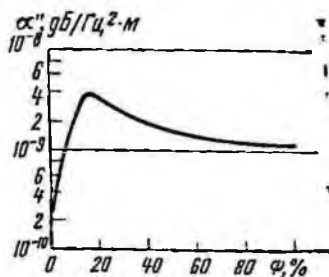
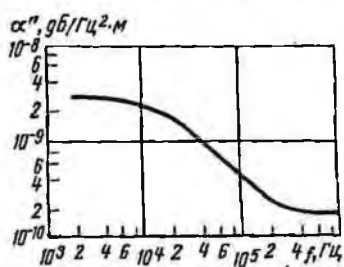
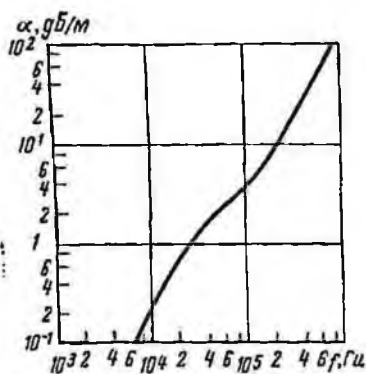


Рис. 9. Частотная зависимость затухания в воздухе при температуре 26°С и относительной влажности 37%

Рис. 10. Влияние влажности ϕ и запыленности s на затухание в воздухе

Отражение звука. Долю энергии, отраженной рассеивающей поверхностью, можно приближенно найти по коэффициенту отражения при нормальном падении звука на гладкую поверхность. Значения акустических сопротивлений тех сред, с которыми чаще всего приходится встречаться во время звуколокационной съемки горных выработок, и соответствующих коэффициентов отражения на границе их раздела приведены в табл. 1.

Данные эти ориентировочные, потому что в горных породах скорость звука и акустическое сопротивление сильно варьируют. Однако нетрудно видеть, что в гор-

ных выработках, заполненных воздухом, интенсивность отраженного сигнала не зависит от состава пород в окружающем массиве. Мало колеблется интенсивность отражения в заполненных водой выработках, стенки которых сложены твердыми породами.

На границе раздела воды и водонасыщенных рыхлых отложений коэффициент отражения в значительной степени зависит от состава последних. Еще большая нестабильность имеет место для границ раздела между различными рыхлыми отложениями.

Как видно из табл. 1, акустические сопротивления разных грунтов могут совпадать в отдельных случаях и тогда отражения не будет. Наоборот, прослойки однотипных грунтов, имея разное акустическое сопротивление вследствие небольших различий состава или пористости, могут давать заметное отражение на границе раздела.

Интенсивность сигнала, приходящего к приемнику, зависит помимо коэффициента отражения от характера рассеяния звука. Очевидно, что от идеально гладкой поверхности, например поверхности спокойной воды, отраженный сигнал не возвратится к излучате-

Таблица 1

Среда	Акустическое сопротивление, кгс/см ²	Коэффициент отражения $K_{\text{у}}$ при нормальном падении для различных сред					
		1	2	3	4	5	6
1. Воздух	43п	—	1	1	1	1	1
2. Вода	1,5 · 10 ⁶	1	—	0,008	0,06—0,16	0,1—0,2	0,2—0,5
3. Жидкий пл	1,8 · 10 ⁶	1	0,008	—	0,03—0,1	0,06—0,15	0,15—0,4
4. Водонасыщенный песок	(2,5+3,5) 10 ⁶	1	0,06—0,16	0,03—0,1	—	0—0,05	0,03—0,3
5. Глина	(3+4) 10 ⁶	1	0,1—0,2	0,06—0,15	0—0,05	—	0,01—0,2
6. Твердые породы	(5+8) 10 ⁶	1	0,2—0,5	0,15—0,4	0,03—0,3	0,01—0,2	—

лю, если падает не по нормали. Величина коэффициента отражения в этом случае уже не играет роли. Можно сказать поэтому, что звуколокационная съемка горных выработок возможна лишь благодаря рассеянию отраженного звука, которое является одним из важнейших условий съемки. На рис. 11 приведены результаты экспериментов по определению индикатрисс рассеяния от различных поверхностей. Для удобства сравнения инди-

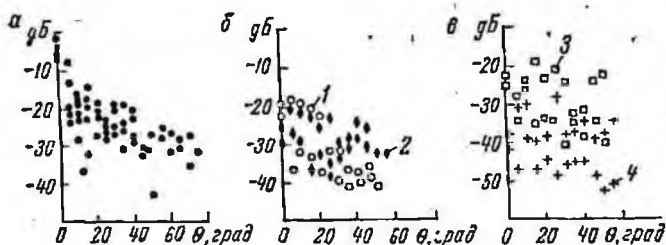


Рис. 11. Результаты измерений уровня отраженных сигналов при различных углах падения θ :

а — для бетонной стенки в воде (частота 350 кГц); б и в — в воздухе (частота 10–20 кГц); 1 — песок; 2 — шлак; 3 — сланец (куски до 10 см); 4 — асбестовое волокно

катриссы представлены в виде графиков зависимости уровня отраженного сигнала от угла падения в прямоугольных координатах и логарифмическом масштабе. На всех графиках за нулевой принят уровень сигнала по нормали от гладкой поверхности с коэффициентом отражения около 1.

Из рис. 11 видно, что четкой зависимости уровня от угла падения не существует. Некоторая корреляция между интенсивностью отражения и углом падения наблюдается только для относительно ровных поверхностей песка и бетона. В остальных случаях никакой корреляции не обнаружено. Вследствие этого целесообразно считать, что распределение интенсивности отраженного сигнала по различным направлениям в горных выработках является чисто случайным и может быть задано двумя значениями: средним уровнем $J_{\text{ср}}$ и амплитудой флуктуаций $N_s^2 = \sqrt{J_{\text{max}}/J_{\text{min}}}$ относительно этого уровня. В логарифмической форме амплитуда флуктуаций $n_s = 20 \lg N_s$ легко находится из индикатриссы как

полуразность между максимальным и минимальным значениями интенсивности. Например, амплитуда флуктуаций для бетона, песка, шлака, сланца и асбеста составляет соответственно 21, 11, 9, 11 и 12 дБ (см. рис. 11).

При импульсной локации кроме флуктуационных явлений следует учитывать еще трансформацию отражен-

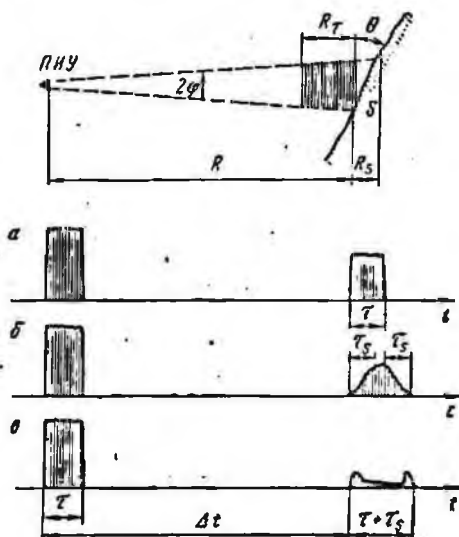


Рис. 12. Трансформация импульсов при отражении

ного сигнала, которая выражается в изменении формы огибающей импульса. Огибающей называется линия, показывающая зависимость амплитуды колебаний в импульсе от времени. Рассмотрим как происходит и к чему приводит трансформация. Предположим, что приемно-лучающее устройство (ПИУ) лоатора (рис. 12) посылает в среду импульс с прямоугольной огибающей длительностью τ . Этой длительности соответствует протяженность R_T звукового импульса в пространстве, определяемая скоростью распространения звука $R_T = ct$.

Пусть направленность действия приемно-лучающего устройства в плоскости чертежа характеризуется некоторым углом 2φ . Для упрощения будем считать,

что внутри этого угла интенсивность звука примерно одинакова, а за пределами его равна нулю (в действительности такой резкой границы, конечно, не бывает).

Если облучаемый участок ее ориентирован по нормали к оси излучения, т. е. угол падения $\theta=0$, то передний фронт импульса достигает поверхности почти одновременно во всех точках. Отражение звука начнется сразу со всей площади пятна облучения. Также одновременно отражение прекратится, когда поверхности достигнет задний фронт импульса. Этому случаю соответствует диаграмма на рис. 12, а. В начале шкалы времени изображена прямоугольная огибающая излученного импульса. По истечении времени $\Delta t=2R/c$, необходимого для распространения звука до лоцируемой поверхности и обратно, на приемник поступает отраженный импульс почти прямоугольной формы, как и посланный, только уровень его будет ниже из-за ослабления при распространении и отражении.

Если угол θ не равен нулю, то фронт излученного импульса достигает различных участков пятна облучения S в разное время и отражение, естественно, происходит не одновременно. В момент, изображенный на рис. 12, звуковой импульс достиг лоцируемой поверхности лишь на очень малом участке. Поэтому интенсивность отраженного сигнала будет составлять только малую часть той величины, которая соответствует установившемуся режиму, когда отражение происходит по всему фронту волны. По мере дальнейшего распространения импульса будет увеличиваться площадь отражения и возрастать уровень сигнала на приеме. Промежуток времени от момента соприкосновения фронта волны с ближайшим участком поверхности до полного перекрытия площади облучения S определится разностью хода R_s звуковых лучей. Учитывая удвоение времени за счет обратного распространения отраженного сигнала, получим, что на приемнике интервал между первым вступлением и установившимся значением сигнала

$$\tau_s = 2R_s/c,$$

а так как

$$R_s = 2R \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \theta \approx 2R\varphi \operatorname{tg} \theta, \quad (20)$$

то

$$\tau_s \approx 4R\varphi \operatorname{tg} \theta/c.$$

Очевидно, что при длительности излученного импульса $\tau < \tau_s$ отраженный сигнал начнет уменьшаться, не успев достигнуть установившегося значения. Для получения установившегося значения должно выполняться условие $\tau \geq \tau_s$. Если вместо продолжительности во времени воспользоваться длиной импульса $R_\tau = c\tau$, тогда это условие запишется в виде $R_\tau \geq 2R_s$.

Все сказанное о трансформации переднего фронта импульса относится и к заднему фронту, где происходит постепенный спад от установившегося значения к нулю. Трансформация импульсов является результатом интерференции отражений от разных участков облучаемой поверхности, поэтому, когда поверхность в достаточной мере равномерно рассеивает звук, интенсивность на приеме растет пропорционально изменению площади и фронт сигнала имеет вид, показанный на диаграмме б (см. рис. 12). Это типичный пример нормальной трансформации.

Крупные элементы рельефа рассеивающей поверхности по мере перекрытия их фронтом волны могут дать резко выраженные скачки интенсивности, но и в таком случае трансформация относится к нормальному типу, так как максимальный уровень отражения достигается по истечении τ_s .

На слабо рассеивающих ровных поверхностях может наблюдаться аномальная трансформация (см. рис. 12, в). В установившемся режиме уровень отраженного сигнала мал потому, что гладкая поверхность дает почти зеркальное отражение, но при формировании фронта зеркальность отражения нарушается. Пока участок отражения мал, гладкая поверхность вследствие дифракции дает ненаправленное отражение¹. Поэтому в начале фронта интенсивность возрастает. Затем дифракционное рассеяние уменьшается и сигнал падает. В результате вместо трапециoidalного импульса длительностью $\tau + \tau_s$ получаются два слабых и коротких пика на переднем и заднем фронтах. Их длительность составляет единицы периодов, так как дифракционные эффекты заметно проявляются лишь на расстоянии в несколько длин

¹ Поскольку отражающая поверхность является источником звука, то направленность отражения от нее определяется так же, как для излучателя аналогичной формы, и, следовательно, зависит от размеров.

волн. Таким образом, при аномальной трансформации и короткие и длинные импульсы дают одинаково низкий уровень отраженного сигнала.

На рис. 11 несколько наиболее низких точек индикатриссы рассеяния бетона как раз и относятся к установившемуся значению сигнала при аномальном рассеянии на гладких площадках. Пики на фронтах этих сигналов имели уровень на 10—12 дБ выше.

Интенсивность отраженного сигнала на приеме. Кроме флуктуаций при отражении могут наблюдаться флуктуации при распространении звука. Если излучатель и приемник находятся в закрытом помещении, где воздух неподвижен, то уровень сигнала на приеме не будет меняться пока не изменяется их взаимное расположение относительно друг друга или объекта локации. Флуктуации в этом случае отсутствуют. В свободной атмосфере воздух почти никогда не бывает совершенно неподвижным. Периодические изменения температуры создают неоднородность плотности воздушной среды. На малых по размерам неоднородностях, соизмеримых с длиной звуковых волн, звук рассеивается, частично отражаясь от этих неоднородностей как от препятствий, на больших — появляется рефракция звука. Эти факторы изменяют интенсивность принимаемого сигнала. Поскольку распределение неоднородностей в объеме движущейся среды является хаотическим и все время меняется, то сигнал флуктуирует, давая случайные отклонения от своего среднего уровня. Амплитуда флуктуаций растет с увеличением расстояния и повышением частоты, на ультразвуковых частотах флуктуация выражена особенно сильно.

В шахтных условиях тоже наблюдаются флуктуации, хотя и меньшие, чем в свободной атмосфере. Причиной их является конвекция воздуха в горных выработках.

В жидких средах флуктуации при распространении звука могут возникать по той же самой причине, что и в воздухе. Однако вследствие малой сжимаемости жидкостей неоднородности их плотности не столь велики. При тех расстояниях, с которыми имеет дело звуколокация в горном деле, флуктуации звука на пути его распространения в жидких средах не имеют существенного значения.

Определение амплитуды флуктуаций расчетным путем представляет большие трудности, а практически измерить их весьма несложно. Для этого достаточно установить на объекте неподвижно излучатель и приемник звука и наблюдать за уровнем принимаемого сигнала. Опыт работы со звуколокационной аппаратурой показывает, что в диапазоне частот 25—30 кГц при дальности локации до 50 м амплитуда флуктуаций в воздухе в шахтных условиях достигает 6—8 дБ. В свободной атмосфере, например на карьерах, флуктуация определяется метеорологическими условиями. При сильном ветре она становится настолько большой, что может помешать измерению на ультразвуковых частотах.

Когда имеют место оба вида флуктуаций, они, как величины случайные, складываются квадратически

$$N_{\Phi} = \sqrt{N_S^2 + N_R^2}, \quad (21)$$

где N_{Φ} — результирующая величина; N_S и N_R — флуктуации сигнала, возникающие соответственно при отражении и распространении звука.

Работоспособность измерительной аппаратуры следует определять по минимальному уровню в интервале флуктуаций. С учетом этого можно получить общее выражение для определения мощности сигнала, приходящего к приемнику от первой лоцируемой поверхности — стенки камеры, дна водоема и т. д. За границу интервала флуктуаций может быть принято их амплитудное (максимальное) или предельно допустимое значение.

Интенсивность звуковой волны, падающей на лоцируемую поверхность от источника с акустической мощностью P_a и коэффициентом концентрации γ , определяется по формуле (8)

$$J = \frac{\gamma P_a}{4\pi R^2 e^{2\alpha R}} = \frac{\gamma J_0 S_0}{4\pi R^2 e^{2\alpha R}},$$

где J_0 — интенсивность звука непосредственно у источника; S_0 — площадь излучающей поверхности.

Для приемника источником звука является облучаемый участок, от которого происходит отражение. Интенсивность сигнала около отражающей поверхности определится коэффициентом отражения $J' = JK_J$, мощность получается умножением J' на площадь фронта волны

$P' = JS_{\gamma}$. Из определения коэффициента концентрации следует

$$S_{\gamma} = 4\pi R^2/\gamma,$$

отсюда

$$P' = JK_J 4\pi R^2/\gamma.$$

Зависимость интенсивности от направления выше условились учитывать величиной флуктуаций, поэтому следует считать, что источник P' равномерно излучает во все полупространство, где производится прием.

При этом коэффициент его концентрации $\gamma=2$. Подставляя в формулу (8) полученные значения, с учетом флуктуаций для минимальной интенсивности на приеме будем иметь

$$J'_0 = \frac{J_0 S_0 K_J}{2\pi R^2 N_{\Phi}^2 e^{4\alpha R}}. \quad (22)$$

Если приемник аналогичен излучателю и площади их одинаковы, то отношение мощностей приема и излучения будет равно отношению интенсивностей

$$\frac{P'_a}{P_a} = \frac{J'_0}{J_0} = \frac{S_0 K_J}{2\pi R^2 N_{\Phi}^2 e^{4\alpha R}}. \quad (23)$$

Формулы (22) и (23) позволяют дать оценку дальности действия аппаратуры при звуколокационной съемке горных выработок. По ним, зная порог чувствительности приемника, можно найти мощность излучения, необходимую для обеспечения заданной дальности или, наоборот, дальность локации при заданной мощности.

Формула (22) не совпадает с аналогичными формулами в гидро- и радиолокации, которые иногда ошибочно используются применительно к звуколокационной съемке горных выработок. Разница состоит в том, что в условиях горных выработок, в которых площадь отражения равна площади фронта падающей волны, интенсивность сигнала на приеме, как видно из формулы (22), не зависит от коэффициента концентрации излучателя. Гидро- и радиолокация имеют дело с объектами меньшими, чем площади волнового фронта, при этом уровень отраженного сигнала становится зависимым от коэффициента концентрации излучателя [46].

§ 3. ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Направленность излучения и приема — одно из основных условий звуколокационной съемки — обеспечивается тем лучше, чем меньше длина звуковой волны по сравнению с размерами приемноизлучающего устройства. Поэтому для локации применяются возможно более высокие звуковые и ультразвуковые частоты. В диапазоне этих частот преобразование электрической энергии в аку-

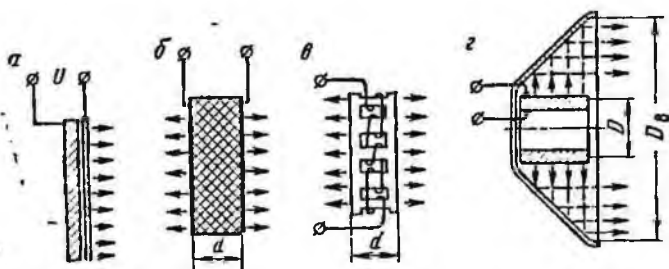


Рис. 13. Основные типы приемноизлучателей:

а — электростатический; б — пьезоэлектрический плоский; в — магнитострикционный плоский; г — пьезоэлектрический цилиндр с рефлекторами

стическую и обратно осуществляется с помощью известных физических эффектов электростатического притяжения, электро- и магнитострикции. Соответственно преобразователи, служащие для излучения и приема, носят название электростатических, пьезоэлектрических и магнитострикционных (иногда два последних называют электрострикционными и пьезомагнитными, но первый вариант более употребителен).

Кроме перечисленных обратимых преобразователей, для излучения звука в жидких средах иногда используется электрогидравлический эффект искрового разряда. Излучатели этого типа здесь не рассматриваются, поскольку они используются главным образом при геофизических исследованиях.

Основные типы наиболее часто применяемых в звуколокации приемноизлучателей схематически показаны на рис. 13. Электростатический преобразователь (рис. 13, а) состоит из двух электродов: массивного не-

подвижного и тонкого подвижного. На одном из них имеется обычно изолирующий слой. Напряжение возбуждения U , приложенное к электродам, вызывает появление электрических зарядов на них и, как следствие этого, взаимное притяжение электродов. Сила притяжения заряженных тел пропорциональна квадрату напряжения, поэтому при чисто гармоническом U колебания подвижного электрода и создаваемое им звуковое давление имеют ярко выраженный нелинейный характер. Основная часть энергии колебаний выделяется при этом на удвоенной по отношению к U частоте. Для уменьшения нелинейных искажений на электростатический преобразователь помимо переменного подают постоянное поляризующее напряжение, величина которого должна быть больше амплитуды переменного. Тогда колебания подвижного электрода происходят с частотой возбуждающего сигнала.

Движущая сила, действующая на подвижный электрод, в процессе колебаний уравнивается реакцией среды (т. е. звуковым давлением), инерционным сопротивлением подвижного электрода, упругим и вязким сопротивлениями слоя воздуха между электродами. Из перечисленных составляющих только первая является полезной, поэтому в большинстве случаев преобразователи используют на частоте их собственного резонанса, где упругая и инерционная составляющие внутреннего сопротивления взаимно уничтожаются. Наглядно представить резонанс в механической системе можно на примере груза, подвешенного на пружине. Если груз отклонить от положения равновесия, он будет качаться с частотой, определяемой его массой и жесткостью пружины. При этом для поддержания амплитуды колебаний требуется приложить в такт им очень небольшие усилия, затрачиваемые лишь на преодоление трения в колеблющейся системе.

В реальных конструкциях электростатических преобразователей зазоры между электродами не превышают нескольких десятков микрон. Такой тонкий слой воздуха обладает большой упругостью и резонансная частота получается высокой — до 100 кГц. С целью снижения ее применяют перфорацию неподвижных электродов и другие конструктивные меры, уменьшающие упругость междуэлектродного слоя воздуха. Электростатический излу-

чатель в силу огромной разницы масс электродов сам по себе является односторонним и не требует экранировки задней стороны. Работать он может только в газовых средах, потому что развиваемое им усилие недостаточно для преодоления сопротивления жидкостей.

Электростатический преобразователь может служить и приемником. Звуковое давление падающей волны заставляет подвижный электрод колебаться. Зазор между электродами, а, следовательно, электрическая емкость меняются в такт изменению давления. Если источник поляризующего напряжения обладает достаточным внутренним сопротивлением, заряды на электродах преобразователя не могут измениться в течение периода колебаний. Тогда напряжение U между ними колеблется соответственно изменению емкости, так как $U = q/C$, где q — заряд, C — емкость. Таким образом, электростатический преобразователь осуществляет и излучение, и прием звуковых колебаний.

Работа пьезоэлектрических преобразователей основана на свойстве ряда кристаллов и поликристаллических материалов изменять свои размеры под действием электрического поля и, наоборот, индуцировать электрическое поле при деформации. Пьезоэффект наблюдается у кварца, турмалина, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония и многих других. Из поликристаллических материалов наиболее известны пьезокерамики титана бария и титанат-цирконата свинца. Для звуколокации применяются керамические пьезопреобразователи, более дешевые и удобные. Особенно широко используются титанат-цирконаты свинца, свойства которых стабильны в широком интервале температур. На рис. 13,б схематически показана пьезокерамическая пластина. Толстыми линиями обозначены электроды на двух ее противоположных гранях. Поляризацию пьезокерамика приобретает в процессе изготовления и на электроды требуется подавать только переменное возбуждающее напряжение. Пьезокерамические пластины обладают большим упругим и инерционным сопротивлением, поэтому они, за редким исключением, используются на частоте собственного резонанса. Резонанс колебаний по толщине пластины имеет место при условии $d = \lambda/2$, откуда рабочая частота $f_p = c/\lambda = c/2d$, где c — скорость звука в материале пластины. У пьезокерамики $c = (4 \div 5) 10^3$ м/с, следова-

тельно, в диапазоне частот звуколокации 10^4 — 10^6 Гц толщина пластин лежит в пределах 250—2,5 мм.

Изменения толщины пластины под действием возбуждающего напряжения вызывают симметричное смещение противоположащих граней, и пластина дает излучение одновременно в двух направлениях. Для локации необходимо только одно направление, поэтому излучение второй стороны пластины экранируют слоями материалов хорошо отражающих или поглощающих звук.

При большой толщине пластин (вблизи нижней границы частотного диапазона) вес их настолько значителен, что создает трудности для использования аппаратуры. В таких случаях удобнее применять цилиндрические преобразователи. У пьезоэлектрического цилиндра с электродами, нанесенными на внутренней и наружной поверхностях (рис. 13, г), можно возбудить радиальные колебания. Резонансная частота при этом определяется средним диаметром цилиндра $f_p = c/\pi D$. Для формирования направленности излучения и приема преобразователь помещают в конический рефлектор, а излучение внутри цилиндра заглушается поглощающими или отражающими прокладками. Вес рефлекторного приемоизлучателя значительно меньше, чем плоского, при той же частоте и направленности, которая определяется размером D , выходного сечения рефлектора.

В магнитострикционных преобразователях используется эффект изменения размеров некоторых ферромагнитных материалов под действием намагничивания. Эффект магнитострикции обратим: при деформации этих материалов в них индуцируется магнитное поле. На практике применяются магнитострикторы из металлических материалов — никеля, кобальта, железа и их сплавов — и оксидных материалов (ферритов) на основе перечисленных металлов. Ферриты имеют малые внутренние электрические потери, поэтому могут применяться на частотах до 300 кГц, в то время как металлические магнитострикторы эффективны лишь на частотах до 50—60 кГц. Недостаток ферритов — низкая механическая прочность.

Схема плоского магнитострикционного преобразователя приведена на рис. 13, в. Окна в теле магнитостриктора служат для размещения обмотки, по которой протекает в режиме излучения ток от источника возбуж-

дения. С этой же обмотки можно снимать напряжение сигнала в режиме приема, когда под воздействием звуковой волны в преобразователе возникает переменная составляющая магнитного поля. Собственная поляризация у магнитострикторов, как правило, очень небольшая. Она достаточна для работы в режиме приема, а в режиме излучения требуется внешняя поляризация с помощью постоянного тока, пропускаемого по основной или дополнительной обмоткам.

Размеры и вес, способы экранировки излучения задней стороны у магнитострикционных преобразователей такие же, как у пьезокерамических. Конструкция рефлекторного излучателя с магнитострикционным цилиндром аналогична конструкции, показанной на рис. 13,2, с той лишь разницей, что магнитостриктор вместо электродов будет иметь обмотку возбуждения.

Целесообразность применения тех или иных из рассмотренных типов приемоизлучателей определяется многими факторами в зависимости от условий и задач звукокадационной съемки, поэтому нельзя считать какой-либо тип наилучшим. Кроме того, параметры, характеризующие работу преобразователей, сильно варьируют в различных конструкциях. Можно, однако, дать обобщенную характеристику с помощью энергетических параметров, основным из которых является электроакустическая отдача Θ . Она показывает, какая часть полной электрической мощности P_a , поступающей от источника возбуждения на излучатель, преобразуется им в акустическую,

$$\Theta = \frac{P_a}{P_3}, \quad (24)$$

где P_a — мощность излучаемой звуковой волны.

На приеме отдача будет выражаться, наоборот, отношением электрической мощности, развиваемой приемником, к полной акустической. Численное значение отдачи на приеме вследствие обратимости преобразователей будет точно такой же, как в режиме излучения. Выразить же ее удобнее не через полную акустическую мощность, куда входит и мощность колебаний самого приемника, а через мощность звуковой волны. При этом имеет место соотношение

$$\Theta = \frac{P'_3}{4P'_a}, \quad (25)$$

где P_a' — мощность падающей волны; P_a' — электрическая мощность на выходе приемника.

Из формул (24) и (25) следует, что отношение электрических мощностей приема и излучения

$$\frac{P_a'}{P_a} = 4\Theta^2 \frac{P_a'}{P_a} \quad (26)$$

Вместе с формулой (23) формула (26) полностью определяет процесс локации с энергетической стороны. Необходимые числовые данные об отдаче получают при расчете преобразователей. Для ориентировочной оценки в табл. 2 указаны пределы изменения Θ в воздухе и воде.

Т а б л и ц а 2

Тип излучателя	Пределы изменения Θ	
	в воде	в воздухе
Электростатический	—	$(0,3 \div 5) 10^{-3}$
Пьезоэлектрический:		
плоский	0,4—0,92	$(1 \div 3) 10^{-3}$
рефлекторный	0,6—0,95	$(2 \div 18) 10^{-3}$
Магнитострикционный:		
плоский	0,25—0,8	$(0,3 \div 1) 10^{-3}$
рефлекторный	0,4—0,9	$(0,6 \div 2) 10^{-3}$

У магнитострикторов данные указаны только для металлических модификаций, так как применение ферритовых преобразователей в звуколокационной аппаратуре осложнено технологическими трудностями их изготовления.

Как видно из таблицы, эффективность всех преобразователей в воздухе очень низкая.

Направленность излучения и приема от физической природы преобразователей не зависит. Она зависит лишь от геометрии волнового фронта и распределения интенсивности в нем, т. е. от размеров и формы приемноизлучающей поверхности, соотношения интенсивностей и фаз колебаний различных ее участков. Большей частью мы имеем дело с однородными преобразователями, у которых амплитуды и фазы колебаний одинаковы во всех точках излучающей поверхности. Поэтому харак-

теристика направленности рассмотрим на примере однородного плоского излучателя произвольной формы (рис. 14). Предположим, что излучатель помещен в акустически жесткий экран. Это условие позволяет считать, что звуковое поле формируется только передней стороной колеблющейся системы и влияние задней стороны

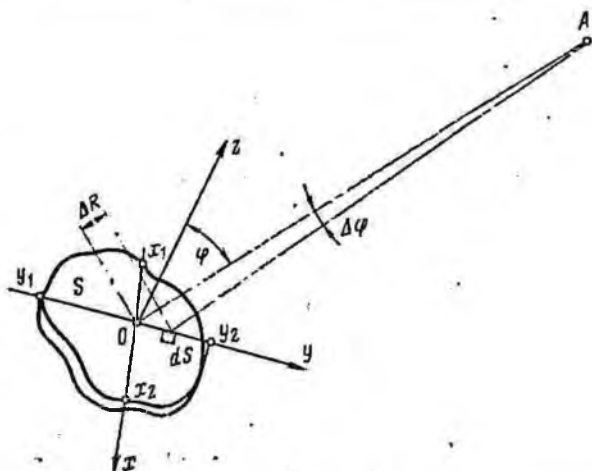


Рис. 14. К выводу общей формулы характеристики направленности однородного плоского излучателя

можно не учитывать. На практике указанное условие выполняется, так как приемонизлучатели всегда монтируются в какой-то конструктивной оправе, служащей экраном.

Произвольную точку O на излучающей поверхности S примем за начало системы координат, у которой оси x и y лежат в плоскости S , а ось z направлена по нормали к ней. Характеристика направленности выражается зависимостью звукового давления от угла φ между осью z и направлением на точку наблюдения. Для определения характеристики в плоскости zOy точку наблюдения A следует перемещать в этой же плоскости. Будем рассматривать характеристику в дальней зоне, т. е. при таком удалении от излучателя, при котором разностью $\Delta\varphi$ углов наблюдения в пределах всей поверхности можно пренебречь. Излучающую поверхность ра-

зобьем на элементарно малые участки $dS = dx dy$. Каждый такой участок по известному принципу Гюйгенса можно принять за независимый ненаправленный излучатель. Результирующее звуковое давление в точке A получим после суммирования давлений, создаваемых этими элементарными излучателями. Перемещая точку A в плоскости zOy так, чтобы удаление ее от излучателя оставалось неизменным, а изменялся бы только угол φ , получим характеристику направленности $\Phi(\varphi)$ в этой плоскости, которая выразится отношением звукового давления $p(\varphi)$ по направлению φ к звуковому давлению по оси z — $p(0)$. Значения $p(\varphi)$ и $p(0)$ определяются в результате интегрирования по всей поверхности S элементарных давлений, создаваемых участками dS ,

$$\Phi(\varphi) = \frac{p(\varphi)}{p(0)} = \frac{\iint_S dp(\varphi)}{\iint_S dp(0)}, \quad (27)$$

где dp — давление в точке A от элементарного излучателя площадью dS .

Поставленное выше условие достаточной удаленности точки A от излучателя позволяет считать, что ослабление сигнала одинаково для всех элементарных излучателей и, следовательно, величины будут различаться только фазой. Разность фаз определяется разностью хода звуковых волн ΔR . При этом общее выражение элементарного сигнала можно записать в виде:

$$dp = \beta p_0 e^{ik\Delta R} dS,$$

где β — коэффициент пропорциональности; p_0 — звуковое давление на излучающей поверхности; k — волновое число ($k = 2\pi/\lambda$).

Разность хода, как видно из рис. 14, с учетом условия $\Delta\varphi \rightarrow 0$

$$\Delta R = -y \sin \varphi.$$

Подставив в выражение (27) значения dp и ΔR и разделив переменные, получим

$$\Phi_y(\varphi) = \frac{1}{S} \int_{y_1}^{y_2} b(y) e^{-ik y \sin \varphi} dy, \quad (28)$$

где $b(y)$ — зависимость поперечного размера излучающей поверхности от y ;

$$b(y) = x_2(y) - x_1(y).$$

Индекс в обозначении характеристики направленности $\Phi_\nu(\varphi)$ указывает, к какой из координатных плоскостей она относится.

Формула (28), называемая дифракционным интегралом, позволяет вычислить характеристику направленности в любой нормальной плоскости. Для этого достаточно подставить в нее соответствующую форме преобразователя зависимость $b(y)$ и пределы интегрирования, определяемые продольным по отношению к рассматриваемой плоскости размером $a = y_2 - y_1$. Число конкретных решений неограниченно велико, поэтому целесообразно выявить общие закономерности. Исследование формулы (28) показывает, что при любой однозначной и непрерывной функции $b(y)$ характеристика направленности выражается периодической функцией от безразмерного аргумента χ

$$\chi = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi. \quad (29)$$

Общий вид функции $\Phi(\chi)$ показан на рис. 15, а. Значения аргумента на оси абсцисс можно выразить непосредственно в угловых координатах, пользуясь зависимостью

$$\varphi = \arcsin \frac{\chi \lambda}{\pi a}. \quad (30)$$

Откладывая значения $\Phi(\varphi)$ по соответствующим направлениям, можно построить характеристику направленности в естественных полярных координатах (см. рис. 15, б). Полярная диаграмма более наглядна, но для практического использования удобнее характеристики в прямоугольных координатах.

Рассмотренный выше плоский преобразователь может быть и приемником. Зависимость его чувствительности приема от направления падающей волны будет выражаться той же самой диаграммой, как в режиме излучения. Таким образом, в отношении направленности действия соблюдается принцип обратимости преобразователей.

Из рис. 15 видны характерные особенности диаграммы направленности однородных плоских преобразователей: направление наибольшей чувствительности излучения и приема совпадает с нормалью к излучающей поверхности; кроме главного максимума (главного лепестка диаграммы), имеются добавочные (боковые) лепестки. Добавочные максимумы в сумме с главным перекрываются.

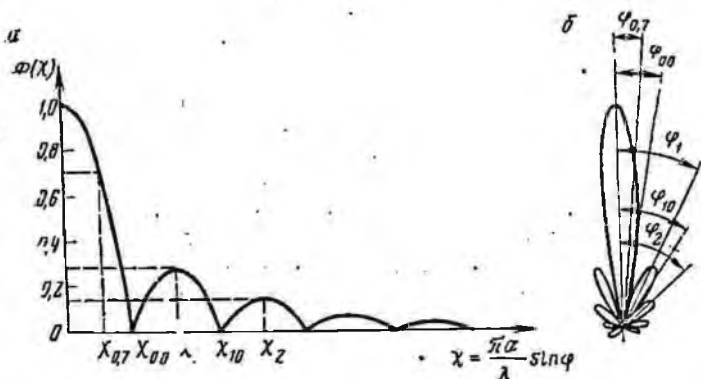


Рис. 15. Характеристика направленности в прямоугольных и естественных полярных координатах

вают все возможные значения углов φ в пределах $\pm 90^\circ$, поэтому излучение происходит во всех направлениях, только с меньшей интенсивностью, чем по нормали.

Количественная оценка направленности действия приемопередатчиков производится по параметрам диаграммы направленности. Поскольку амплитуда добавочных максимумов быстро убывает, практическое значение имеют параметры, относящиеся к главному максимуму и одному-двум добавочным: $\varphi_{0.0}$ — угловая ширина главного лепестка; $\varphi_{0.7}$ — угол, соответствующий уровню $\Phi(\varphi) = 0,707$, в пределах которого сосредоточена преобладающая часть общей мощности излучения; φ_1 и φ_2 — угловые координаты добавочных максимумов; ε_1 и ε_2 — относительные уровни этих максимумов.

Аргументы χ , соответствующие указанным угловым параметрам, и величины ε определяются видом функции $b(y)$, т. е. формой излучающей поверхности. Их значе-

ния для наиболее часто встречающихся типов приемопередатчиков [17] приведены в табл. 3.

Данные этой таблицы показывают, что чем резче уменьшается ширина излучающей поверхности от центра к краям, тем шире главный максимум диаграммы, но зато ниже уровень боковых максимумов. Например, у прямоугольника, диаграмма которого рассматривается

Таблица 3

Форма поверхности	$\chi_{0.7}$	$\chi_{0.5}$	χ_1	χ_2	ε_1	ε_2
Кольцо круглое или эллиптическое	1,17	2,4	3,85	7,0	0,4	0,3
Сплошной круг или эллипс	1,56	3,8	5,1	8,4	0,13	0,067
Прямоугольник (диаграмма вдоль стороны)	1,4	3,1	4,5	7,6	0,22	0,13
Прямоугольник (диаграмма по диагонали)	2	6,2	9,0	15,2	0,048	0,017

в нормальной плоскости, параллельной одной из сторон, ширина поверхности одинакова по всей длине, при этом уровень первого бокового лепестка составляет 22% главного. В плоскости же, параллельной диагонали прямоугольника, для которой ширина излучающей поверхности к углам ее уменьшается до нуля, уровень первого лепестка составляет менее 5%.

На основе данных табл. 3, пользуясь формулой (30), можно найти угловые параметры диаграмм направленности при любых размерах преобразователей. Если интересующие нас углы диаграммы не превышают 15—20°, то $\sin \varphi \approx \varphi$ и можно применять упрощенное выражение

$$\varphi \approx \frac{\chi \lambda}{\pi a} \quad (31)$$

Из этой формулы видна прямая зависимость угловой ширины диаграммы от соотношения размера излучающей поверхности с длиной звуковой волны λ : чем больше размер приемопередатчика, тем острее его диаграмма. Поскольку один и тот же преобразователь по различным направлениям может иметь разные размеры,

направленность действия его в разных плоскостях будет неодинакова.

Коэффициент концентрации излучателя, показывающий, во сколько раз интенсивность излучения на оси главного максимума выше, чем у ненаправленного источника, можно вычислить по диаграммам направленности. Однако практически сделать это довольно сложно. Для однородных плоских излучателей имеется простая формула коэффициента концентрации

$$\gamma = \frac{4\pi S}{\lambda}. \quad (32)$$

Приведенные выше формулы для плоских приемоизлучателей могут быть применены к некоторым другим. Например, цилиндрические преобразователи в конических рефлекторах (с углом при вершине 90°) обеспечивают постоянство фазы по плоскости выходного сечения конуса. Поэтому выходное сечение конуса можно принять как плоский излучатель. Некоторая неоднородность в распределении амплитуды звукового давления по сечению незначительно влияет на диаграмму направленности. Таким образом, направленность рефлекторного приемоизлучателя приближенно соответствует направленности плоского преобразователя круглой формы, имеющего размер выходного сечения рефлектора.

Все сказанное о направленности действия приемоизлучателей относилось к дальней зоне. Вблизи излучающей поверхности разность фаз сигналов, приходящих от ее элементов в точку наблюдения, будет зависеть также от положения этих элементов относительно выбранного начала координат. Вследствие этого результат суммирования элементарных сигналов будет иным. Расчет диаграмм направленности в ближней зоне показывает, что на малых расстояниях от излучающей поверхности расширения фронта звуковой волны почти не происходит. Звук распространяется подобно пучку света от прожектора в четко очерченных границах, затем начинается постепенный переход к диаграмме дальней зоны. Длина прожекторной зоны

$$R_{(1)} = \frac{a^2}{4\lambda}.$$

Очевидно, что длина прожекторной зоны, подобно углу диаграммы в дальней зоне, у одного и того же излучателя может быть неодинаковой в различных плоскостях. В качестве примера на рис. 16 приведен общий вид звукового пучка прямоугольного излучателя, включая ближнюю и дальнюю зоны. Границы фронта звуковой волны в обеих зонах для наглядности изображены резкими (в действительности этого, конечно, не наблюдается). В приведенном примере размер излучающей поверхности по оси y меньше, чем по оси x , поэтому рас-

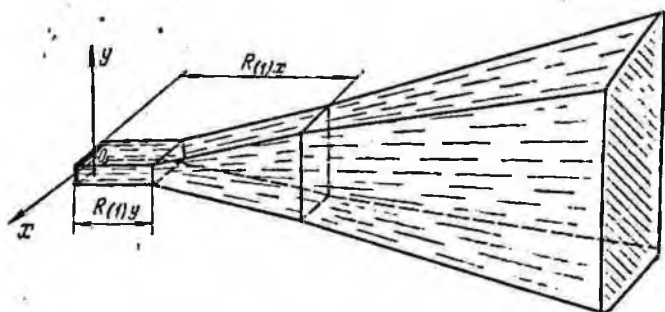


Рис. 16. Геометрическое представление главного лепестка излучения прямоугольного преобразователя

хождение звукового пучка в плоскости yOz имеет больший угол и начинается на расстоянии $R_{(1)y}$, значительно меньшем, чем $R_{(1)x}$ в плоскости xOz . Размер сечения пучка в дальней зоне получается наибольшим в той плоскости, где размер излучающей поверхности наименьший.

В пределах прожекторной зоны, где отсутствует геометрическое расхождение, интенсивность звуковой волны в целом по фронту равна интенсивности на излучающей поверхности и не зависит от расстояния до нее (в отдельных точках волнового фронта звуковое давление может колебаться от 0 до $2p_0$). Кроме прожекторной зоны, имеется переходная, где геометрическое расхождение уже имеет место, но формула (8) изменения интенсивности и давления в дальней зоне еще неприменима. Граница ее применимости определяется требуемой точностью. В практических расчетах за начало дальней зоны можно принять расстояние $R_{(2)} = 4 R_{(1)}$.

§ 4. РЕГИСТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Регистрирующие приборы звуколокаторов могут быть автоматическими или полуавтоматическими. Но главное отличие заключается не в автоматизации, а в методе получения показаний. По этому признаку системы регистрации следует разделить на две группы: с прямой индикацией и с аналоговым преобразованием измеряемых величин.

В основе систем прямой индикации лежит сопоставление перемещения звукового сигнала в реальной среде с движением какого-либо отметчика по шкале регистрирующего прибора. Движение отметчика от нуля шкалы начинается в момент послышки звукового импульса. В момент приема отраженного сигнала фиксируется положение отметчика на шкале и таким образом измеряется время распространения сигнала. Масштаб регистрации M определяется отношением скорости движения отметчика v_0 и скорости распространения звука c . Поскольку звук проходит измеряемое расстояние дважды (к объекту локации и обратно), кажущаяся скорость распространения сигнала вдвое меньше скорости распространения звука. Следовательно,

$$M = \frac{l}{R} = \frac{2v_0}{c}, \quad (33)$$

где l — расстояние, пройденное отметчиком к моменту приема отраженного сигнала; R — измеряемое расстояние в натуре.

В качестве регистраторов с прямой индикацией в звуколокационной аппаратуре применяются электронно-лучевые осциллографы и механические самописцы барабанного типа и с бесконечной лентой. Электронно-лучевой осциллограф является наиболее универсальным регистрирующим прибором, широко используемым во всех областях техники. Отметчиком служит светящееся пятно электронного луча на экране электронно-лучевой трубки. Прямолинейное равномерное движение светового пятна по экрану, называемое разверткой, осуществляется блоком развертки осциллографа, который подает линейно изменяющееся напряжение на пластины горизонтального отклонения луча в трубке. По окончании каждого

цикла развертки луч возвращается в исходное положение. Линейная скорость электронно-лучевой развертки может изменяться в очень широких пределах — от нескольких миллиметров до сотен метров в секунду. Поэтому масштаб регистрации ограничивается лишь размерами экрана.

Для совмещения момента начала развертки с посылкой звукового импульса блок развертки электрически связывают с модулятором звуколокатора. Отметка момента приема отраженного сигнала может осуществляться непосредственной его индикацией при подаче напряжения сигнала через усилитель на пластины вертикального отклонения луча либо с помощью яркостной модуляции светового пятна приходящим сигналом. Первый вариант более удобен при визуальном отсчете показаний, второй — при фотографической регистрации.

Развертка луча отображает лишь одну координату объекта — измеряемую дальность. Для автоматической регистрации результатов съемки в виде масштабного изображения необходимо получить аналог перемещения локатора относительно объекта. При съемке в полярных координатах это может осуществляться вращением направления развертки на экране со скоростью, равной скорости вращения звукового луча локатора в пространстве, либо вращением фотоприставки, фиксирующей результаты измерений. При съемке в прямоугольных координатах — линейном перемещении звуколокатора вдоль объекта — необходимо перемещать фотопленку синхронно с этим движением.

Автоматическая фиксация показаний электронно-лучевого осциллографа осуществима только с помощью фотографирования экрана. Поэтому требуется последующее проявление материалов записи, а оперативный контроль за качеством съемки в процессе ее выполнения затруднен, что является существенным недостатком осциллографической регистрации. Вторым недостатком — низкая точность, которая обусловлена в основном малыми размерами экрана и неравномерностью развертки.

Принцип действия механического самописца барабанного типа пояснен на рис. 17. Цилиндрический барабан со спиральным гребнем на его поверхности вращается электромотором с заданной угловой скоростью ω . Над барабаном параллельно его оси помещается металличе-

ская линейка. Между линейкой и барабаном находится рекордерная лента, на которой производится запись. В результате вращения барабана точка контакта спирального гребня и линейки перемещается вдоль последней, осуществляя развертку со скоростью

$$v_0 = v h,$$

где h — шаг спирали.

Масштаб записи измеряемого расстояния, согласно формуле (33),

$$M = 2vh/c. \quad (34)$$

Синхронизация момента посылки сигнала с началом развертки может выполняться электрическим контактом, механически связанным с валом барабана, который включает

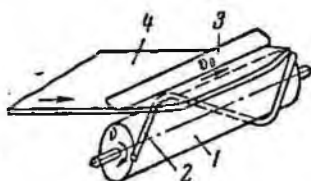


Рис. 17. Самописец барабанного типа:

1 — барабан; 2 — спиральный гребень; 3 — линейка; 4 — рекордерная лента.

модулятор звуколокатора во время прохождения контактной точки на рекордерной ленте через начало шкалы. Рекордерная лента представляет собой электропроводную бумагу с сульфидным покрытием. Отраженный сигнал, принятый звуколокатором, после усиления его электронным блоком подается в виде электрического импульса на линейку самописца и вызывает

почернение сульфидного покрытия в том месте, где в момент приема был контакт линейки с бумагой.

Вторую координату записи получают в результате продольного движения рекордерной ленты. Соотношением скоростей протяжки ленты и перемещения звуколокатора на объекте определяется продольный масштаб съемки. Он может не совпадать с поперечным масштабом измеряемых расстояний.

Самописцы барабанного типа и с бесконечной лентой обеспечивают получение документальной записи непосредственно в процессе съемки с достаточной точностью (до 1%). Основным недостатком их является ограниченный диапазон масштабов. На механическом самописце трудно получить скорость развертки более

8 м/с. Поэтому максимальный масштаб M при измерениях в водной среде (где $c \approx 1500$ м/с) не превышает $1/100$, в то время как для калибровочных измерений и записи малых расстояний желательно иметь $1/10—1/20$. Кроме того, механический самописец не производит записи в полярных координатах.

Высокую точность регистрации (до 0,5%) и практически неограниченный диапазон масштабов записи в прямоугольных и полярных координатах позволяют получить системы аналогового преобразования с перьевыми самописцами. Перьевые самописцы различных типов, предназначенные для автоматического контроля технологических процессов в промышленности, выпускаются серийно. По принципу действия они представляют собой компенсационные электронизмерительные приборы с чернильной записью на обычной диаграммной бумаге. Измерительный механизм обеспечивает перемещение пера по бумаге пропорционально величине электрического напряжения, подаваемого на вход самописца. Поскольку звуколокация основана на измерении интервалов времени между посылкой и приемом сигнала, для регистрации перьевым самописцем необходимо преобразование этих интервалов в пропорциональное электрическое напряжение. Преобразование выполняется электронными блоками демодулятора звуколокационной аппаратуры. Следует заметить, что первая запись представляет собой непрерывный процесс, а звуколокатор производит измерения дискретно — отдельно в каждом цикле посылки и приема сигналов. Демодулятор должен сохранять показания предыдущего цикла до получения результатов последующего. Для этого демодуляторы звуколокационной аппаратуры имеют электронные запоминающие блоки, обеспечивающие преобразование дискретных данных в непрерывные.

Таким образом, измерительный механизм перьевого самописца совместно с демодулятором фиксирует измеряемое расстояние пропорциональным отклонением пера. Масштаб определяется параметрами электрических цепей блоков преобразования демодулятора, поэтому его нетрудно регулировать плавно или ступенями в любых необходимых пределах.

Вторую координату записи при съемке в прямоугольных координатах дает перемещение диаграммной ленты,

а в полярных — вращение диаграммного бланка на планшайбе самописца. Промышленные образцы полярных перьевых самописцев имеют криволинейную сетку координат. Поэтому для применения в звуколокационной аппаратуре, где запись ведется в натуральной системе полярных координат, их следует модернизировать, помещая перо на прямолинейные направляющие.

Регистраторы с перьевыми самописцами, несмотря на перечисленные преимущества, не всегда пригодны. Они могут фиксировать одновременно лишь один сигнал и следовательно одну из поверхностей объекта. Для одновременной фиксации двух и более поверхностей, например поверхности дна и границ раздела слоев донных отложений при съемке дрижных полигонов, применяются регистраторы с прямой индикацией, у которых число сигналов, фиксируемых в каждом цикле измерений ограничено только разрешающей способностью.

§ 5. ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ ТРАКТ ЛОКАТОРА

Приемопередающий тракт объединяет блоки приемопередателя, модулятора и демодулятора.

Модулятор звуколокационной аппаратуры выполняет следующие функции: задает частоту повторения излучаемых сигналов (частоту следования импульсов), их

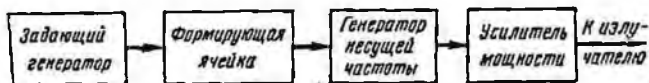


Рис. 18. Основные функциональные узлы модулятора

длительность, несущую частоту (частоту колебаний в импульсе) и мощность. Структурная схема модулятора приведена на рис. 18. У импульсных локаторов, применяемых для маркшейдерских измерений, возможны две принципиально различные модификации модуляторов: с ударным и импульсным режимами возбуждения преобразователей.

Сущность работы ударного модулятора заключается в том, что к излучающему преобразователю на момент излучения подключается элемент электрической цепи с

заранее накопленной энергии, например заряженный конденсатор. В результате разряда конденсатора в цепи преобразователя возникают мощные электрические колебания. Необходимая частота этих колебаний устанавливается выбором параметров колебательного контура, состоящего из накопительного конденсатора, преобразователя и корректирующих реактивных элементов. Амплитуда возникших колебаний затухает по мере расхо-

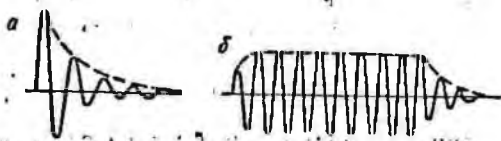


Рис. 19. Форма импульсов возбуждения:

а — с ударным модулятором; б — с импульсным;
 — — — — — огибающие импульсов

дования начальной энергии электрического удара на потери в контуре и излучение. Характерный вид импульса затухающих колебаний показан на рис. 19, а. Ударное возбуждение дает возможность получать без усилительных устройств весьма большие пиковые значения мощности, но не позволяет варьировать длительность импульса. Кроме того, к. п. д. преобразователей в ударном режиме очень низкий. Модуляторы ударного действия целесообразно применять, когда требуются короткие импульсы и максимальная простота аппаратуры. Роль формирующей ячейки и генератора несущей частоты выполняет при этом колебательный контур, усилителя мощности не требуется, а функцию задающего генератора может выполнять регистрирующий прибор. Так, например, у самописцев барабанного типа для замыкания цепи накопительного конденсатора служит электрический контакт на валу барабана. Однако простота модулятора ударного возбуждения не скупает его недостатков.

Импульсные модуляторы с разделением в их блоках функций формирования длительности и заполнения импульса несущей частотой позволяют регулировать длительность в любых необходимых пределах и эффективно использовать приемонизлучающие преобразователи, но получать большие мощности в импульсных модуляторах технически сложно.

При излучении и приеме одним преобразователем для переключения его с одного режима на другой необходим коммутатор. На общей функциональной схеме (см. рис. 5) подразумевается, что коммутатор входит в состав блока приемоизлучателя. В звуколокационной аппаратуре применяются релейные, электронно-ламповые или транзисторные, трансформаторные, а также диодно-резистивные коммутаторы. Требования, предъявляемые к ним: наименьшие потери мощности и минимальное время коммутации. Первому условию лучше всего удовлетворяют релейные коммутаторы, а второму — ламповые и диодно-резистивные, которые, как наиболее простые, применяются чаще всего.

К приемоизлучающим преобразователям в первую очередь предъявляются требования хорошей направленности действия: минимальные угол раствора главного лепестка и уровень добавочных. Эти требования противоречивы. Сужение главного лепестка (при заданной частоте и размерах преобразователя) вызывает рост уровней добавочных, поэтому в каждом конкретном случае необходимо определять их допустимую величину. Определяющим условием является однозначность измерений. Поскольку излучение и прием фактически осуществляются во все стороны, только с разной интенсивностью, то и сигналы от лоцируемой поверхности приходят из разных направлений. Однозначность измерения расстояний подразумевает выделение среди всех прочих сигнала, полученного с направления главной оси приемоизлучения. Сигналы различаются дальностью (временем поступления) и амплитудой. Так как дальность величина неизвестная, единственным критерием выбора становится амплитуда, т. е. уровень сигнала по направлению главного лепестка должен превышать все остальные. Уровни сигналов на приеме помимо чувствительности преобразователя по разным направлениям зависят от дальности по этим направлениям и от флуктуаций при распространении и отражении звука.

Пользуясь приведенными формулами, отношение сигналов можно записать в виде:

$$\frac{p_0}{p_k} = \frac{R_k e^{2\alpha R_k}}{(e_k)_H (e_k)_H N_{\Phi} R_0 e^{2\alpha R_0}}$$

где p_0 и p_k — амплитуды сигналов, принятых с направлений соответственно главного и k -того максимумов; R_0 и R_k — дальности по этим направлениям; $(\epsilon_k)_И$ и $(\epsilon_k)_П$ — параметры диаграммы направленности излучателя и приемника, при идентичных характеристиках направленности излучения и приема $(\epsilon_k)_И = (\epsilon_k)_П = \epsilon_k$; N_Φ — результирующий коэффициент флуктуаций распространения и отражения звука.

Самое неблагоприятное соотношение сигналов будет иметь место для первых добавочных максимумов, поскольку они наибольшие, и условие выделения основного сигнала примет вид:

$$\frac{p_0}{p_1} = \frac{R_1 e^{2\alpha R_1}}{\epsilon_1^2 N_\Phi R_0 e^{2\alpha R_0}} > 1. \quad (35)$$

На объектах сложной формы различие между R_0 и R_1 может быть весьма большим. Если главный лепесток диаграммы окажется направленным на удаленную часть объекта, а добавочный — на ближнюю, то ослабленный расстоянием основной сигнал будет меньше паразитного сигнала добавочного максимума и условие (35) не будет выполнено. Отсюда вытекает требование — компенсировать в приемном тракте локатора зависимость уровней сигналов от дальности. Это возможно сделать в блоках усиления демодулятора. Будем считать такое требование выполненным, тогда в качестве условия однозначности измерений из формулы (35) получим

$$\epsilon_1^2 < 1/N_\Phi. \quad (36)$$

Эта формула выражает основное требование, предъявляемое к направленности действия приемонизлучателя. Невыполнение его влечет появление ложных результатов измерений. Поскольку флуктуация имеет случайный характер, численная вероятность появления ложных сигналов определяется соотношением ϵ_1^2 со среднеквадратичным значением коэффициента флуктуации N_Φ .

Функции демодулятора заключаются в том, чтобы поступающие с приемника сигналы привести к виду, пригодному для фиксации их регистрирующим прибором. В общем случае демодулятор состоит из трех основных функциональных узлов: селекции, усиления и преобразования сигналов. Блок селекции обеспечивает выделение

полезного сигнала среди помех. Большей частью селекция выполняется частотно-избирательными цепями, входящими в состав усилителя.

Отдельный блок преобразования необходим только для регистрирующих систем с перьевыми самописцами. В системах прямой индикации, где аналоговое преобразование выполняется самим регистрирующим прибором, демодулятор вырождается в приемный усилитель.

Приемный усилитель, независимо от наличия или отсутствия других узлов демодулятора, должен обеспечивать выполнение поставленного выше требования независимости уровня поступающих на регистратор сигналов от дальности. Максимальное усиление необходимо только для приема наиболее слабых дальних сигналов, а для ближних сигналов требуется меньший коэффициент усиления, который в соответствии с функциональной зависимостью уровня звуковых сигналов от расстояния должен составлять

$$K(R) = K(R_{\max}) \frac{R}{R_{\max}} e^{2\alpha(R-R_{\max})}, \quad (37)$$

где $K(R)$ — текущее значение коэффициента усиления; $K(R_{\max})$ — его значение при максимальной дальности; R — текущая координата дальности; $R_{\max}$ — максимальная дальность.

Дальность однозначно связана со временем приема сигнала, поэтому с учетом формулы (13) из формулы (37) получим зависимость коэффициента усиления от времени между посылкой и приемом

$$K(\Delta t) = K(\Delta t_{\max}) \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}} e^{\alpha c(\Delta t - \Delta t_{\max})}, \quad (38)$$

где $\Delta t_{\max}$ — максимальное значение интервала времени между посылкой и приемом, соответствующее максимальной дальности.

Уравнение (38) определяет ту динамическую характеристику, которую должен иметь приемный усилитель лоатора для однозначного измерения дальности на объектах сложной формы.

Блок преобразования демодулятора должен обеспечивать соответствие непрерывных данных на его выходе дискретно поступающим входным данным. В гидро- и радиолокации, где измеряемое расстояние до цели ме-

няется всегда постепенно, находят применение способы преобразования, основанные на непрерывном интегрировании входных величин. При звуколокационной съемке горных выработок измеряемое расстояние может меняться как угодно быстро. Поэтому к демодуляторам маркшейдерской звуколокационной аппаратуры предъявляется требование максимального быстродействия с тем, чтобы результат измерения в каждом цикле посылки и приема сигналов не зависел от предыдущих. Системы непрерывного интегрирования при этом непригодны. Необходимое быстродействие дают регенеративные системы преобразования, в которых каждый отдельный результат измерения после передачи его на запоминающее устройство аннулируется и потому не влияет на последующие циклы измерений. Только такие системы могут быть применены в звуколокационной аппаратуре для съемки горных выработок.

§ 6. ИСТОЧНИКИ ОШИБОК ЗВУКОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Эффективность применения звуколокации при решении маркшейдерских задач зависит от точности измерений. Для оценки достоверности съемки и выбора методики работ необходимо иметь четкое представление об источниках, величине и способах учета ошибок.

Все ошибки звуколокационной съемки можно разделить на три основные группы:

1) ошибки привязки и обобщения результатов измерений;

2) технические ошибки, обусловленные несовершенством звуколокационной аппаратуры и непостоянством физических свойств окружающей среды, — ошибки измерения времени и скорости распространения акустических импульсов; к этой же группе относятся ошибки рефракции [1, 13];

3) ошибки звуколокационной аналогии, которые проявляются независимо от технической точности [3].

Ошибки привязки не специфичны для звуколокации. Это обычные ошибки маркшейдерской привязки пунктов съемки, ошибки обобщения при построении разрезов и сечений по данным измерений и т. п. Кроме них, имеются два источника ошибок, характерных для звуколокации:

неточность ориентации акустической системы (и следовательно, снимаемых профилей или сечений) относительно стран света и нестабильность положения акустической системы при ее движении во время съемки. Эти виды погрешностей проявляются при съемке недоступных горных выработок, когда нельзя осуществить непосредственный визуальный или инструментальный контроль за положением акустической системы. Для ориентации

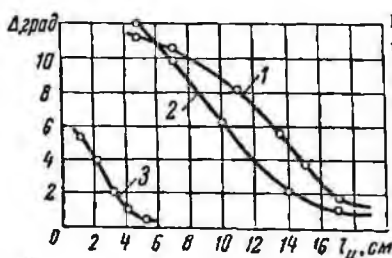


Рис. 20. График зависимости девиации Δ от расстояния $l_{\text{м}}$ до магнитных элементов звуколокационной аппаратуры:

1 — для сердечника силового трансформатора; 2 — для синхронного датчика СД-2; 3 — для электронной лампы палочковой серии

по странам света могут применяться в этих случаях автоматические устройства с гироскопическими или магнитными датчиками. В практике звуколокационной съемки пока применяются только последние из-за простоты их конструкции.

Собственно, датчик и исполнительные механизмы ориентирного устройства несложно выполнить так, чтобы их ошибки не превышали $\pm 1^\circ$. Угловая ширина звукового луча всегда больше, поэтому

инструментальные ошибки ориентирных устройств не имеют существенного значения. Основное значение для точности ориентации имеет девиация магнитных датчиков, вызываемая влиянием магнитных масс на объектах съемки и в самой аппаратуре. На рис. 20 приведены графики девиации, обусловленной элементами аппаратуры. Очевидно, что ошибок девиации этого рода можно избежать при соответствующем удалении магнитных масс от датчика ориентирного устройства.

Другим источником девиации являются стальные конструкции и коммуникации на объектах съемки: железнодорожные пути, буровые вышки, трубопроводы и т. п. Для исключения ошибок ориентации, вызванных ими, необходимо проводить измерения девиации на объектах съемки. Так, например, экспериментально установлено, что при съемке подземных камер через буровые скважины с обсадными трубами диаметром до

12" девиация не превышает 2°, если ориентирное устройство находится далее 3 м от торца обсадной колонны.

Наибольшее значение среди ошибок первой группы имеет нестабильность положения акустической системы, обусловленная колебаниями подвесов при спуске измерительной аппаратуры в недоступные горные выработки. Подвес во время движения может вращаться и совершать маятниковые колебания. Там, где измеряемые при съемке расстояния составляют десятки и сотни метров (например, в камерах), маятниковые колебания не вызывают заметной погрешности, так как их амплитуда не превышает нескольких сантиметров, но для малых расстояний при съемке шахтных стволов и технических скважин это уже существенная величина. Способы исключения или уменьшения погрешности маятниковых колебаний определяются конкретными условиями съемки. При отсутствии сильных внешних источников возмущения, например вентиляционных струй в стволах или потоков промывочной жидкости в скважинах, можно экспериментально подобрать те режимы спуска и подъема аппаратуры, при которых размах колебаний не превышает допуска. При наличии возмущающих потоков изменение режимов движения не дает эффекта. Поэтому для учета смещений подвеса необходимо одновременно измерять расстояние до лоцируемой поверхности выработки и до контрольных отвесов, специально устанавливаемых между ней и приемопередаточной системой локатора.

Вращение подвеса в отличие от маятниковых колебаний проявляется только в движении. При остановке вращательные колебания затухают. Поэтому для съемки сечений какого-либо горизонта с одной точки стояния требуется лишь выждать время успокоения после остановки. Таблицы времени успокоения рассчитаны для каждого прибора и даются в инструкциях по эксплуатации. Съемка вертикальных профилей требует непрерывного движения. На кабельном подвесе, который вращается в течение всего спуска и подъема, съемка в движении может осуществляться только с применением гироскопических или магнитных стабилизирующих устройств, способных удерживать акустическую систему в заданном направлении, независимо от положения подвеса.

Следует заметить, что у ленточных подвесов вращательные колебания очень незначительны. С их помощью можно проводить съемку в движении без каких-либо специальных средств стабилизации. Однако ленточные подвесы имеют ограниченное применение. Для съемки через буровые скважины они непригодны.

Технические ошибки. В основе звуколокационного метода, как уже указывалось, лежит определение расстояния через время и скорость распространения звука по формуле (13). Для анализа ошибок эту формулу следует развернуть. При этом надо учитывать, что излучатель и приемник звуколокатора могут быть отдельными, находясь на некотором расстоянии друг от друга. Тогда пути прямого и отраженного звуковых сигналов различаются между собой и лишь приближенно совпадают с линией измерения расстояния

$$R \approx \frac{R_{\Pi} + R_{\Pi}}{2} = \frac{t_{\Pi} - t_{\Pi}}{2} = \frac{1}{2} \Delta t c, \quad (39)$$

где R_{Π} и R_{Π} — фактическая длина пути соответственно прямого и отраженного сигналов; t_{Π} и t_{Π} — моменты излучения и приема.

Погрешность приближенной левой части равенства (39) определяется взаимным расположением излучателя и приемника, а также рефракцией. Ошибки рефракции будут рассмотрены ниже. Ошибки взаимного расположения в каждом конкретном случае съемки учитываются поправками, поэтому они не влияют на конечную точность измерений.

Рассмотрим теперь величины, входящие в третий член равенства (39). В силу инерционности аппаратуры моменты излучения и приема импульсов фиксируются всегда с запаздыванием. Сигнал синхронизации, отмечающий момент излучения, не зависит от внешних факторов и может быть сделан достаточно стабильным. При этом запаздывание его имеет постоянную величину, а следовательно, ошибка синхронизации является систематической и должна учитываться поправкой.

Момент фиксации отраженного сигнала колеблется в пределах длительности переднего фронта импульса. Для сигналов большой интенсивности, у которых уровень быстро нарастает до порога срабатывания аппаратуры, запаздывание будет минимальным. Слабые сигнала

лы достигают уровня срабатывания лишь на середине или в конце переднего фронта импульса, поэтому их запаздывание получается значительно большим. Таким образом, запаздывание меняется в зависимости от флуктуаций уровня принимаемого сигнала. Если представить запаздывание в виде суммы некоторой средней величины и флуктуационных отклонений от нее, то первая составляющая, как систематическая ошибка, исключается введением поправки, а вторая дает погрешность, называемую ошибкой фиксации. Зная диапазон флуктуаций сигналов, по характеристикам приемного тракта локатора можно найти величину случайной составляющей δt_{ϕ} времени запаздывания и соответствующую ей ошибку фиксации

$$\delta R_{\phi} = \frac{1}{2} \delta t_{\phi} c. \quad (40)$$

Говоря об ошибке фиксации, полагаем, что трансформация сигнала при отражении отсутствует и крутизна его переднего фронта целиком определяется параметрами аппаратуры. Это справедливо тогда, когда измеряются очень малые расстояния или, например, при измерениях скорости звука, когда отражателем служит гладкая нормально ориентированная поверхность. Во всех иных условиях трансформация при отражении влияет на длительность переднего фронта импульса значительно сильнее, чем инерционность аппаратуры. Тогда ошибка фиксации, не превышающая нескольких сантиметров, существенной роли не играет, но она становится главной при измерениях малых длин.

Следует еще заметить, что эта ошибка характеризует погрешность определения интервалов времени независимо от точности регистрирующего прибора и блоков преобразования в демодуляторе. Дальнейшее накопление ошибок происходит уже в процессе регистрации величин Δt и c .

Из формулы (33) следует, что в системах прямой индикации нестабильность масштаба, вызванная случайными изменениями скорости развертки, дает ошибку, пропорциональную измеряемому расстоянию,

$$\delta R'_M = m'_M R,$$

где m_M — относительное изменение масштаба регистратора.

Последнее выражение справедливо и для перьевых самописцев, хотя природа нестабильности масштаба там иная, чем в системах прямой индикации.

Аналогичным образом ошибки нестабильности масштаба возникают и в блоках преобразования

$$\delta R_M = m_M R.$$

Результирующая ошибка нестабильности масштаба в общем случае

$$\delta R_M = m_M R. \quad (41)$$

В системах с прямой индикацией, где блоки преобразования отсутствуют,

$$m_M = m'_M,$$

а в системах с аналоговым преобразованием обе составляющие суммируются как случайные величины

$$m_M = \sqrt{(m'_M)^2 + (m''_M)^2}.$$

Кроме нестабильности масштаба, у регистрирующих приборов и блоков преобразования имеются ошибки считывания показаний. Ошибка считывания на регистраторе складывается из ошибок в определении положения линий записи (или указывающих индексов на визуальном индикаторе), в том числе положения нуля шкалы, и ошибки измерения расстояния между ними. Каждый регистратор можно характеризовать определенной величиной ошибки считывания $\delta l'_0$ в масштабе его шкалы отсчета. При этом в масштабе измеряемого расстояния погрешность

$$\delta R_0 = \delta l'_0 / M,$$

где M — масштаб шкалы регистратора.

Ошибка считывания в блоках преобразования складывается из смещения (дрейфа) нуля и погрешности передачи результата измерений на регистрирующий прибор. Обозначив величину ее в масштабе шкалы $\delta l''_0$, получим

$$\delta R_0 = \delta l''_0 / M.$$

Результирующая ошибка считывания вследствие взаимной независимости $\delta l'_0$ и $\delta l''_0$.

$$\delta R_0 = \delta l'_0 / M, \quad (42)$$

где

$$\delta l_0 = \sqrt{(\delta l'_0)^2 + (\delta l''_0)^2}.$$

Помимо ошибок считывания и нестабильности масштаба, на регистраторе и блоках преобразования может наблюдаться нелинейность (неравномерность) масштаба в пределах шкалы. Однако, ошибки нелинейности как систематические должны исключаться из конечных результатов измерений.

Таким образом, измерение и регистрация временного интервала в звуколокационной аппаратуре характеризуются тремя различно выраженными обобщенными ошибками. Ошибка фиксации выражается в абсолютной форме, ошибка нестабильности масштаба, поскольку она пропорциональна измеряемому расстоянию, — в относительной, а ошибка считывания является квазиабсолютной, так как непосредственно от измеряемого расстояния она не зависит, но зависит от масштаба регистрации. Такая разнородность создает трудности числового выражения результирующей ошибки для всего диапазона измерений одного и того же прибора.

Суммируя ошибки измерения времени в относительной форме, из формул (40) — (42), получим

$$m_t = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta t_{\phi c}}{2R}\right)^2 + m_M + \left(\frac{\delta l_0}{RM}\right)^2}. \quad (43)$$

Для скорости звука, входящей в формулу (39), погрешность складывается из ошибок измерений m_c и ошибок интерполяции или экстраполяции m_c данных измерений на все пространство съемки. Скорость звука, как правило, измеряется тем же звуколокатором, что и съемка. При этом локатор регистрирует время распространения сигнала на базовом отрезке между приемо-излучающей системой и специально установленным отражателем. Базовое расстояние R_0 должно быть заранее точно известно, тогда

$$c = \frac{2R_0}{\Delta t_0}.$$

Из этого выражения видно, что погрешность измерения скорости, если пренебречь ошибкой базы, полностью определяется погрешностью измерения времени t , следовательно,

$$m'_c = -m_t|_{R=R_0} = \mp \sqrt{\left(\frac{\delta t_{\text{фс}}}{2R_0}\right)^2 + m_M^2 + \frac{\delta t_0 M}{R_0}}. \quad (44)$$

Вторую составляющую (m'_c) можно найти только с учетом конкретных условий на объекте и принятой методики работ: однородности среды, заполняющей выработку, частоты контрольных замеров скорости и т. п. Обычно эта составляющая значительно меньше ошибки измерения и можно полагать, что $m_c \approx m'_c$.

При суммировании ошибок измерения времени и скорости нельзя считать их полностью независимыми, поскольку они определяются одинаковыми параметрами одного и того же прибора. Если методика предусматривает измерение скорости звука непосредственно во время съемки сечений, то все медленные вариации масштаба и смещения нуля компенсируются благодаря противоположным знакам величин m_t и m'_c . Как случайные суммируются лишь флуктуационные составляющие ошибок. Только при разновременных измерениях, когда взаимосвязь между m_t и m'_c отсутствует, результирующая инструментальная ошибка выражается их квадратичной суммой

$$m_n = \pm \sqrt{m_t^2 + m_c^2} \approx \pm \sqrt{m_t^2 + (m'_c)^2}.$$

Ошибки рефракции. Трудно найти такой объект, где скорость распространения звука была бы строго одинакова на всех его участках. В действительности всегда имеется какой-то градиент скорости и, следовательно, рефракционные искажения результатов съемки. Наиболее значительные градиенты скорости звука наблюдаются в рудоспусках, подземных камерах выщелачивания соли и открытых непроточных или слабо проточных водоемах (подтопы дражных полигонов). В камерах выщелачивания основной причиной вариаций скорости звука является изменение концентрации рассолов с глубиной, а в рудоспусках и на водоемах — изменение тем-

пературы. Характерно, что во всех указанных случаях градиент скорости направлен по вертикали. Ввиду этого при звуколокационных измерениях по вертикали, например глубины подтопа, не будет искривления звуковых лучей. Следует только учитывать ошибку m_c^* при изменении скорости звука на пути его распространения.

Собственно рефракционные искажения возникают при горизонтальном направлении звукового луча. Схема их образования показана на рис. 21. В результате рефракции появятся ошибки из-за высотного смещения точек съемки ΔH , изменения длины траектории ($m_r = R'/R - 1$), изменения скорости распространения звука по траектории ($m_c^* = 1 - c_{cp}/c_0$). Принципиально возможно при любом распределении градиента построить, пользуясь формулой (4), траекторию луча по участкам и найти поправки. Однако практическое решение такой задачи является трудоемким и нерентабельным.

Ограничимся рассмотрением тех случаев, когда градиент можно считать постоянным в пределах высотного интервала ΔH . Задачу оценки ошибок рефракции сформулируем следующим образом: найдем те допустимые значения градиента и измеряемых расстояний, при которых нет необходимости усложнять камеральную обработку вычислением поправок за разность длин траекторий и скоростей распространения звука, а требуется только поправка за высотное смещение. Критерием оценки будет, очевидно, малая величина изменения результирующей технической погрешности под влиянием m_r и m_c^* . Они как систематические ошибки однозначно связаны между собой и потому суммируются. Обозначив через m_p допустимую сумму, в качестве критерия получим

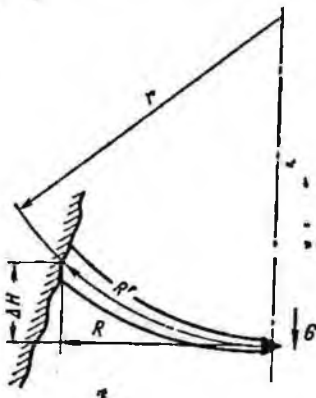


Рис. 21. Схема образования ошибок рефракции

$$m_r + m_c^* = \frac{R' - R}{R} + \frac{c_0 - c_{cp}}{c_0} \leq m_p, \quad (45)$$

где R — измеряемая дальность; R' — длина траектории звукового луча; c_0 — скорость звука в точке расположения локатора; $c_{\text{ср}}$ — средневзвешенное значение скорости на траектории.

Из условия постоянства градиента следует, что траектория звукового луча представляет собой дугу окружности, радиус которой в соответствии с формулой (4) $r = c_0/G$. Определив длину дуги R' и средневзвешенную скорость $c_{\text{ср}}$, из формулы (4) получим

$$\frac{R^2}{3r^2} \leq m_p,$$

откуда

$$R \leq \frac{c_0}{G} \sqrt{3m_p}. \quad (46)$$

В пределах расстояний, удовлетворяющих условию (46), учитывается только поправка на высотное смещение, которое находится из уравнения окружности

$$\Delta H \approx \frac{R^2}{2r} = \frac{R^2 G}{2c_0}. \quad (47)$$

Пользуясь формулами (47) и (46), можно составить таблицы поправок и зон их применимости.

Оценим теперь первоначальное условие малого изменения результирующей погрешности. Например, приняв допустимым повышение результирующей технической погрешности на 10% по сравнению с инструментальной, будем иметь

$$m_{\Sigma} = \sqrt{m_n^2 + m_p^2} = 1,1m_n,$$

откуда

$$m_p \approx 0,5m_n.$$

У современных звуколокаторов инструментальная погрешность колеблется в пределах 1,5—2,5%. Поэтому в среднем можно полагать $m_p \approx 0,01$ и соответственно

$$R \leq 0,17 \frac{c_0}{G}.$$

Ошибки звукокационной аналогии. Физическая сущность их состоит в том, что звуколокатор получает отраженный сигнал от некоторой площади облучаемой поверхности, а результат измерения мы вынуждены приписывать одной ее точке, относя к направлению, сов-

падающему с осью излучения и приема. При нормальном падении ($\theta=0$) разность хода лучей $R_s \rightarrow 0$ и результат измерения практически одинаков для всех точек облучаемой площади — передний фронт сигнала в приемном тракте почти вертикален (см. рис. 12, а). Это означает, что участки поверхности, ориентированные по нормали к направлению локации, фиксируются без ошибок звуколокационной аналогии. Наоборот, при $\theta \neq 0$ возникает заметная разность хода звуковых лучей, передний фронт сигнала в приемном тракте локатора растягивается. При нормальной трансформации импульса (см. рис. 12, б) дальности по оси излучения соответствует некоторая точка на верхнем участке переднего фронта, при аномальной трансформации (см. рис. 12, в) — точка в зоне провала. Фактически же регистратор локатора зафиксирует сигнал в тот момент, когда уровень его достигнет порога срабатывания аппаратуры. Полученному результату будет соответствовать некоторая точка облучаемой площади в пределах угла 2φ . Измеренное расстояние может быть меньше или больше осевого и лишь случайно совпасть с ним.

Уровень отраженного сигнала флуктуирует и соответственно флуктуирует ошибка каждого единичного измерения дальности. Ее конкретное значение, как у всякой случайной величины, найти нельзя. Однако для измерений, из которых складывается контур снимаемой поверхности, можно найти математическое ожидание процесса, например, графическим методом: отложив на диаграмме направленности приемноизлучающего устройства интервал флуктуаций отраженного сигнала, найти угол отклонения от оси φ_0 , соответствующий середине интервала.

Опуская детальное обоснование методики определения φ_0 , отметим лишь два непреложных результата: как бы ни флуктуировал сигнал, математическое ожидание процесса не совпадает с осевым направлением ($\varphi_0 \neq 0$), направление наиболее вероятной фиксации дальности смещено от оси на угол φ_0 в сторону ближних к локатору точек облучаемой поверхности.

Такое статистическое представление ошибок звуколокационной аналогии подсказывает способ введения поправок в результаты съемки: каждую точку зафиксированного звуколокатором контура поверхности следует

сместить на угол φ_0 наружу от контура. При этом уменьшается не ошибка положения данной точки, а совокупность ошибок по контуру. На практике подобная перестройка контуров выполняется с помощью прозрачных палеток. Углы их раствора определяют для

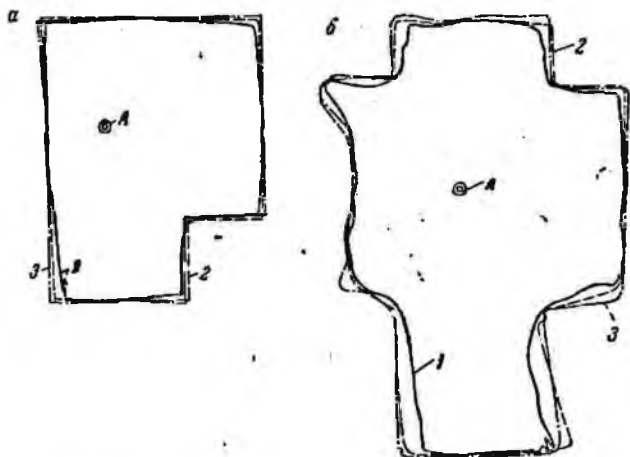


Рис. 22. Результаты экспериментальной проверки точности звуколокационной съемки:

А — место расположения приемноизлучающей системы локатора на объекте; 1 — контур, непосредственно зафиксированный самописцем; 2 — контур после введения поправок за ошибки звуколокационной аналогии; 3 — фактический контур по данным рудеточных замеров

каждого типа локатора с учетом условий на объектах съемки.

Наглядное представление о влиянии ошибок звуколокационной аналогии на точность съемки и об эффективности введения поправок указанным методом дает рис. 22, где показаны результаты съемки заполненного водой бетонного бассейна и заполненного рассолом зумпфа в соляном массиве. Разумеется, значения ошибок звуколокационной аналогии колеблются в зависимости от остроты направленности приемноизлучающей системы, но даже в самых благополучных с этой точки зрения образцах приборов в настоящее время ошибки звуколокационной аналогии являются одним из главных источников погрешности измерений.

Глава II

ЗВУКОЛОКАЦИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

§ 7. СЪЕМКА ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РУДОСПУСКОВ

Условия съемок и характеристика объектов. В современных системах разработки месторождений полезных ископаемых довольно широко используются вертикальные рудоспуски для перепуска руды на нижележащий откаточный горизонт. Рудоспуски проходят без крепления на глубину от 70 до 600 м. При эксплуатации рудоспусков происходит их разрушение, вызванное различными геологическими и горнотехническими причинами. Оно, в свою очередь, приводит к подработке открытых и подземных горных выработок и к большому технико-экономическому ущербу. Общую картину различных условий эксплуатации вертикальных рудоспусков можно представить на примере разработки Алтын-Топканского полиметаллического и Тырнаузского вольфрамо-молибденового месторождений и разработки месторождений комбината «Апатит».

Алтын-Топканское месторождение в геологическом отношении является сложным скарным полиметаллическим месторождением. Рудные тела крутого падения пересечены большим числом тектонических нарушений. Вмещающие породы были подвержены метаморфизму, а затем сильным складчатым движениям. Система отработки месторождения комбинированная. С поверхности рудные тела отрабатываются карьерами, а нижележащие горизонты — подземными горными работами. Нижняя часть месторождения вскрыта капитальной штольной, из которой пройдены слепой ствол и рудоспуски. Отрабатывают месторождение сверху вниз, причем капитальные рудоспуски, пройденные с

поверхности на всю глубину месторождения (около 400 м), служат для перепуска руды как с открытых, так и с подземных горных работ на горизонт капитальной штольни. Имеются также слепые рудоспуски, обслуживающие только подземные горные работы. Пройденные в породах со сложным геологическим строением рудоспуски интенсивно разрушаются под влиянием падающей руды и горного давления, особенно в зоне обнаженных трещиноватых пород. Такое положение создает угрозу безопасности ведения горных работ как на карьерах, так и на подземном руднике. Кроме того, обрушение породы со стенок рудоспусков приводит к значительному разубоживанию добытой руды и, следовательно, к большим материальным убыткам.

Тырныаузское месторождение отрабатывается в основном только подземными горными работами, общая глубина которых превышает 1000 м. Месторождение вскрыто системой штолен, вертикальных шахтных стволов и рудоспусков. Вертикальные капитальные рудоспуски № 1 и 2 пройдены на глубину 600 м параллельно основному шахтному стволу. Расстояние между центрами ствола и рудоспусков составляло 25 м. Несмотря на то, что рудоспуски были пройдены в монолитных крепких породах, со временем было отмечено общее увеличение их сечения вследствие истирания стенок падающей рудой. Это очевидно, если учесть, что объем пропускаемой через эти рудоспуски руды достигал 10 тыс. т/сут. Естественно, при прогрессирующем разрушении и близком расположении рудоспусков по отношению к шахтному стволу потребовалось определять фактические сечения для предотвращения возможных аварий и определения закономерности процесса истирания.

На Центральном карьере комбината «Апатит» руду добывают в суровых климатических условиях, где в течение большей части года температура наружного воздуха ниже нуля. По принятой системе разработки отбитая на карьере мерзлая руда сбрасывается в 550-метровые рудоспуски на основной откаточный горизонт подземного рудника, где температура значительно выше, чем на поверхности. Во время перепуска мерзлой руды происходит обмерзание стенок рудоспусков, что приводит к образованию «пробок». Таким образом, процесс

обмерзания происходит более интенсивно, чем разрушение рудоспусков. Разработка технических мероприятий по предотвращению обмерзания возможна на основе материалов периодической съемки рудоспусков.

Приведенные примеры показывают объективную необходимость маркшейдерской съемки этих горных выработок. Причем полная недоступность рудоспусков для непосредственного обзора требует применения автоматической дистанционной съемки. Однако до 1961 г. в практике маркшейдерских работ не существовало требуемых методов съемки. Применялся единственный способ контроля с помощью бурения разведочных скважин, который не позволял получать объективную и полную картину состояния рудоспусков и был связан с большими материальными затратами.

В 1960 г. к разработке звуколокационного метода съемки недоступных горных выработок в воздушной среде приступила кафедра маркшейдерского дела ЛГП и в 1961 г. выполнила первую опытную звуколокационную съемку рудоспусков Алтын-Топканского рудоуправления, положившую начало внедрению этого метода в производство.

Звуколокационный метод измерений автоматизирует съемку и потому должен обеспечить как измерение расстояния, так и координатную привязку каждой точки замера с требуемой точностью. При съемке рудоспусков и других недоступных горных выработок необходимо знать пространственные координаты x , y , z центра акустической системы в любой момент измерений и дирекционный угол α направления звукового луча. При профилировании вертикальных горных выработок координаты x , y и α должны быть постоянны при изменении координаты z . Для выполнения этого условия необходимо обеспечить спуск акустической системы без колебаний и вращения относительно оси спуска. Схема спуска также должна допускать съемку выработок по любому заданному направлению, т. е. при различных значениях α . Выполнение этих требований зависит от выбора типа гибкого органа спуска (трос, лента, проволока и пр.), системы его навивки, схемы спуска и конструкции приводного устройства. Анализ различных систем спуска показывает, что наибольшую устойчивость имеет схема спуска аппаратуры на бесконечной петле из тонкой

металлической ленты при условии равенства скоростей движения обеих ветвей петли. Это достигается совместной навязкой сложенных вместе ветвей на барабан подъемного устройства. Конструкция подъемной установки и соответствующее взаимное расположение направляющих блоков, по которым движется лента, не допускают возникновения внутренних сил, могущих вызвать маятниковые или крутильные колебания спускаемой аппаратуры.

Из внешних факторов, влияющих на устойчивость рассматриваемой системы, основную опасность представляют вентиляционные потоки воздуха, движущегося по вертикальным и горизонтальным выработкам. Известно, что в подземных выработках движение воздуха носит турбулентный характер, в связи с чем воздействие такого потока на протяженную поверхность ветвей ленты характеризуется возникновением множества импульсов сил, хаотически распределенных по величине и направлению. В результате суммарное влияние воздушного потока на ленту и акустические системы уравнивается, т. е. система по мере ее спуска сохраняет устойчивость относительно исходного положения. Экспериментальные исследования рассматриваемой системы подтвердили сделанные выводы, и были положены в основу разработки конструкций для ориентированного спуска акустической аппаратуры. Исследования проводили на вентиляционном стволе шахты им. В. И. Ленина комбината Ростовуголь, глубина спуска аппаратуры составляла 305 м при средней скорости вентиляционного потока воздуха до 4 м/с.

Как уже указывалось, разработке звуколокационной аппаратуры должно предшествовать исследование фактических акустических свойств объектов, для которых эта аппаратура предназначена. Исследования условий звуколокации в рудоспусках Алтын-Топканского рудоправления показали, что при изменении частоты заполнения акустических импульсов от 10 до 20 кГц результирующий коэффициент затухания изменяется от 0,2 до 0,4 дБ/м. Было установлено, что отражение сигналов от стенок рудоспуска носит ярко выраженный диффузный характер, а коэффициент флуктуаций отраженных сигналов изменяется от 14 до 30 дБ в указанном диапазоне частот.

Звуколокационный профилограф рудоспусков ЗПР-2. Итогом проведенных исследований явилось создание и внедрение в производство в 1964 г. звуколокационного профилографа рудоспусков ЗПР-2. Прибор предназначен для съемки глубоких вертикальных рудоспусков по вертикальным профилям как с горизонта открытых горных работ, так и из подземных горных выработок. Звуколокатор выполнен в переносном исполнении. Комплект его состоит из электроакустического блока (генера-

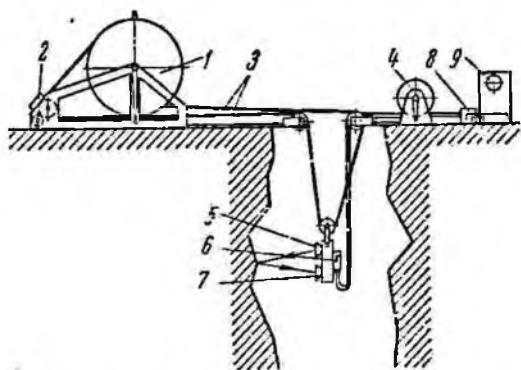


Рис. 23. Схема звуколокационной съемки вертикальных рудоспусков:

1 — подъемная лебедка; 2 — указатель глубины; 3 — ветви лент; 4 — кабельная лебедка; 5 — излучатель; 6 — импульсный генератор; 7 — приемник; 8 — усилитель; 9 — осциллограф

тор и акустическая система), подъемного устройства с механизмом подвески и регистрирующей аппаратуры (рис. 23).

Отличительными особенностями звуколокатора являются размещение генератора непосредственно на акустическом блоке и применение в наземной аппаратуре высокочувствительного резонансного усилителя с динамическим диапазоном ~ 120 дБ. Это позволило впервые в технике звуколокационных измерений обеспечить дальность действия стандартных магнитострикционных вибраторов в воздухе до 27 м при передаче сигналов по 350-метровым кабелям.

Способ выполнения съемки заключается в следующем. Регистрирующая аппаратура и подъемное устрой-

ство устанавливаются непосредственно в устье рудоспуска. На решетке разгрузочной камеры закрепляются направляющие блоки и в створе с ними устанавливается однобарабанная подъемная лебедка, на которую одновременно навиты две ветви металлической пружинной ленты поперечным размером $0,25 \times 25$ мм. На петлю, образованную лентой, с помощью блока подвешивается акустическая система с генератором. Причем одна из ветвей ленты проходит через счетное устройство лебедки, предназначенное для определения глубины спуска. Механизм подвески позволяет производить вручную разворот акустической системы относительно створа лент на любой угол, величина которого фиксируется по градусному лимбу. Вертикальная плоскость, проходящая через ось вращения системы, и диаметр лимба, равный $0-180^\circ$, совпадают с исходной и неизменной вертикальной плоскостью лент. Регистрирующая аппаратура связана с акустической системой двумя кабелями РК-1. Азимут створа лент определяется обычной маркшейдерской привязкой, а глубина спуска контролируется по счетчику глубины.

В процессе съемки электроакустический блок, периодически посылая импульсы, осуществляет измерение расстояний от электроакустических преобразователей до стенки рудоспуска.

Измеряемое расстояние отсчитывается по горизонтальной шкале от начала развертки до переднего фронта первого отраженного импульса (рис. 24). Масштаб шкалы по горизонтали устанавливают ступенчатым переключателем и плавной регулировкой скорости развертки и оставляют неизменным в течение всей съемки. Непосредственное наблюдение за отраженными сигналами позволяет проконтролировать изменения дальности при непрерывном спуске акустической системы и зафиксировать локальные нарушения стенок рудоспуска по направлению локации. Кроме того, визуальная индикация осциллограмм дает возможность оперативно регулировать чувствительность локатора во время съемки и тем самым устанавливать оптимальный уровень амплитуды отраженных сигналов. Закончив профилировку рудоспусков по первому направлению, аппаратуру поднимают, разворачивают на требуемый угол и повторяют весь цикл измерений.

Часть рудоспусков Алтын-Топканского месторождения имеет непосредственный выход на поверхность. Поперечные размеры их устьев достигают 40 м, что потребовало применения специальных устройств для вывода акустической системы в проектное сечение. Первоначально эту задачу решали с помощью консоли, смонтированной на автокране. В дальнейшем стали применять специальную каретку для перемещения акустической системы над устьем по натянутому тросу.

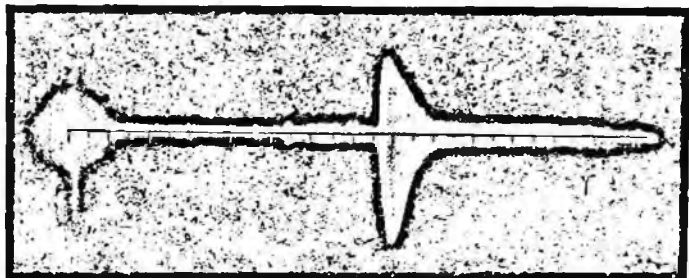


Рис. 24. Осциллограмма отраженного импульса (масштаб 1:100, измеренное расстояние 7,7 м)

Перед звуколокационной съемкой проводят подготовительные работы. По совмещенному плану горных работ составляют проект съемки, в котором намечают сечения рудоспусков, подлежащие профилированию, определяют дирекционные углы этих сечений и координаты вертикальной оси спуска. Выбор направления профилирования согласуют со съемкой самых опасных или неясных по своему состоянию участков рудоспусков, особенно находящихся вблизи действующих горных выработок (рис. 25). Устанавливают частоту замеров по глубине, а в случае необходимости отмечают участки одного профиля, подлежащие особо тщательному рассмотрению.

На основании полученных данных в натуре закрепляют маркшейдерскими точками створ спуска, последний должен проходить через плоскость вращения барабана лебедки и направляющих блоков. По этим точкам монтируют установку, после чего проводят окончатель-

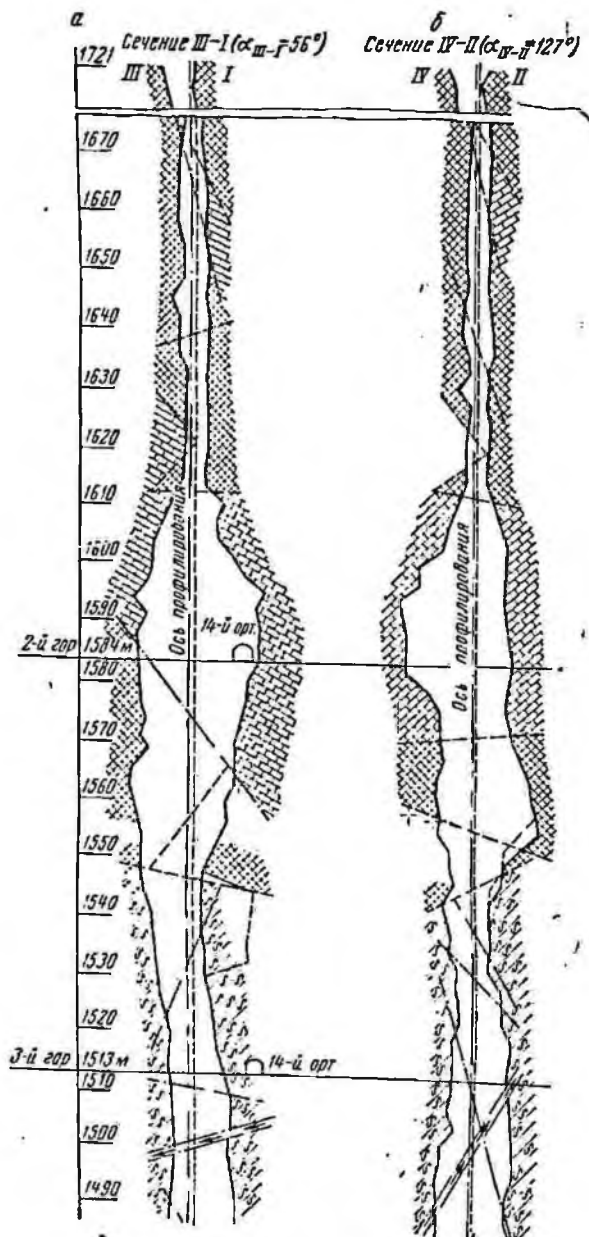


Рис. 25. Профили рудопуска № 1

ную маркшейдерскую привязку центра и створа спуска. Определив фактические координаты оси профилирования и дирекционный угол створа, вносят соответствующие поправки в проект съемки. Основываясь на уточненном проекте съемки, вычисляют углы поворота акустической системы относительно створа спуска (лент). Одновременно с горизонтальной привязкой передают координату z на плоскость верхней ленты (см. рис. 23) и затем рулеткой или рейкой замеряют вертикальное расстояние между лентой и центром акустической системы с точностью до 1—2 см. Таким образом определяют все исходные данные положения аппаратуры.

Звуколокационная аппаратура перед каждой съемкой тарируется и калибруется.

Тарировка производится в наземных условиях. Ее целью является градуировка шкалы осциллографа по всей ее длине на всех рабочих масштабах. Для этого акустическую систему располагают напротив плоского отражателя (листа фанеры, металла и т. п.) на максимальном расстоянии локации, после чего, регулируя скорость развертки, совмещают отраженный сигнал с последним делением горизонтальной шкалы осциллографа. Затем перемещают отражатель по направлению к акустической системе, устанавливая его последовательно через равные отрезки, и фиксируют показания осциллографа. Полученные данные оформляют в виде таблиц или графиков, которые в дальнейшем используют при камеральной обработке для определения поправок к результатам съемки за нелинейность развертки осциллографа.

Калибровку звуколокатора производят непосредственно на месте съемки до выведения акустической системы на проектную ось спуска. Необходимость калибровки вызвана изменением скорости распространения звука с изменением физических свойств окружающей среды: температуры, атмосферного давления. Порядок калибровки следующий. Акустическую систему устанавливают непосредственно в устье рудоспуска в 2—4 м от ровной и нормально ориентированной к звуковому лучу поверхности. Расстояние между системами и поверхностью устанавливают равным целому числу метров и тщательно замеряют рулеткой. В зависимости от величины ожидаемых расстояний при съемках намечают

масштаб горизонтальной десятисантиметровой шкалы экрана осциллографа, например 1:100, 1:200 и т. д. Для установления этого масштаба, что и является задачей калибровки, изменяют скорость развертки сигнала на экране осциллографа таким образом, чтобы расстояние между началом развертки и отраженным сигналом соответствовало расстоянию между акустической системой и объектом в масштабе 1:100 или 1:200. Например, если измеряемое расстояние равно 7,7 м, а масштаб устанавливается равным 1:100, то отрезок шкалы между нулем и сигналом должен быть равен 7,7 см (см. рис. 24).

При профилировании наблюдаемый сигнал может уйти за пределы шкалы экрана, т. е. измеряемое расстояние будет больше того значения, которое возможно определить по шкале при данном масштабе. В этом случае изменяют масштаб шкалы следующим образом. Из ближайших замеров выбирают значение, кратное целому числу метров, возвращают акустическую систему в эту точку замера, проверяют заново расстояние и, изменяя скорость развертки, уменьшают расстояние между нулем и отраженным сигналом ровно в два раза. Таким образом, масштаб шкалы уменьшается в два раза.

После окончания съемок установку демонтируют, производят контрольную калибровку аппаратуры и замеряют температуру воздуха. Во время профилирования рудоспуска замеряли температуру на нижележащих горизонтах в непосредственной близости от него, что необходимо для определения поправок за изменение скорости звука.

Камеральная обработка результатов заключается во введении в данные измерений поправок на нелинейность развертки осциллографа, определяемых по тарифировочным кривым, и поправок за изменение скорости звука от температуры. По уточненным данным строят профили рудоспуска с указанием проектного сечения и оси спуска. Затем наносят геологический разрез и производят анализ фактического состояния и причин разрушения рудоспуска.

Погрешность съемки рудоспусков обусловлена в основном техническими ошибками звуколокационных измерений. Привязка пунктов наблюдений по координатам

там x и y выполняется обычными маркшейдерскими способами, а координата z (глубина спуска акустической системы) — по счетчику глубины с ошибкой, не превышающей 0,1 м. Ошибки из-за колебаний акустической системы исключаются принятой методикой спуска.

Рефракционные искажения практически отсутствуют. Наибольшее изменение температуры, наблюдавшееся за время съемок, составляло 5°C . При высоте профилирования 250 м градиент скорости звука ничтожно мал, а суммарное приращение скорости звука во всем интервале съемки составляет 3,5 м/с, т. е. 1%. Во время камеральной обработки результатов съемки изменения скорости за счет температуры учитываются поправками. Остаточная погрешность m'_c зависит от ошибок измерения температуры воздуха. Принимая их равными $\pm 1^{\circ}\text{C}$, получим

$$m'_c = \frac{\delta_c}{c} \approx \frac{\pm 0,54}{331} = \pm 1,6 \cdot 10^{-3} = \pm 0,16\%,$$

где c — скорость звука в воздухе; δ_c — приращение скорости при изменении температуры на 1°C .

Из приведенного примера видно, что погрешность определения скорости звука не играет существенной роли при съемке рудоспусков. Наибольшее значение имеют аппаратные ошибки, связанные с отсчетом измеряемых расстояний на шкале осциллографического регистратора: ошибка фиксации, ошибка считывания, смещение нуля, нестабильность и нелинейность развертки. Для оценки точности съемок ЗПР-2 были проведены анализ и экспериментальное определение значений этих ошибок.

Установлено, что в данном приборе случайная составляющая ошибки фиксации $\delta R_{\phi} = \pm 20$ мм. Ошибки считывания и смещения нуля фактически обобщаются в одну ошибку, поскольку положение нуля на шкале осциллографа контролируется визуально в момент отсчета. Обобщенная ошибка считывания в масштабе шкалы составляет $\delta l_0 = \pm 1$ мм, а в масштабе измеряемого расстояния,

$$\delta R_0 = \frac{\delta l_0}{M} = \frac{1}{M},$$

где M — масштаб шкалы осциллографа.

Нестабильность развертки m_M по данным проведенных лабораторных наблюдений достигает $\pm 1\%$. Обусловленная ею масштабная ошибка составит $\delta R_M = m_M R = \pm 0,01 R$ (где R — измеряемое расстояние). Ошибки из-за нелинейности развертки определяют в процессе тарировки перед каждой съемкой и затем при камеральной обработке учитывают введением поправок. В состав результирующей погрешности измерений, кроме отмеченных трех ошибок, войдет еще погрешность тарировки, которая при выбранной методике тарировки целиком определяется ошибкой считывания. Таким образом, для результирующей погрешности измерений, в которую ошибка считывания войдет дважды, получим

$$\delta R_{\text{и}} = \pm \sqrt{\delta R_{\phi}^2 + 2\delta R_0^2 + \delta R_M^2} = \\ = \pm \sqrt{20^2 + 2\left(\frac{1}{M}\right)^2 + (0,01R)^2}, \text{ мм.} \quad (48)$$

Погрешности, вычисленные по этой формуле для наиболее употребляемых масштабов регистрации, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Масштаб	Погрешности (мм) при расстоянии, м							
	0,5	1	2	3	5	10	15	20
1:20	36	38	40	—	—	—	—	—
1:50	—	70	73	78	87	—	—	—
1:100	—	—	142	145	150	174	—	—
1:200	—	—	—	284	287	300	320	346

Из таблицы видно, что погрешность во всем диапазоне измеряемых расстояний нельзя охарактеризовать одной цифрой ни в абсолютном, ни в относительном выражении. Однако, если иметь в виду приведенную погрешность (приведение к концу шкалы), то она при всех масштабах примерно одинакова и составляет 1,74—2%.

Данные лабораторного анализа ошибок были проконтролированы во время съемок методом многократных измерений. При общем числе сделанных измерений,

равном 294 (с регистрацией в масштабе 1:100), полученное значение ошибки составило 184 мм при средне-взвешенной величине измеряемого расстояния 6,85 м, что достаточно хорошо согласуется с расчетными данными.

С 1964 г. звуколокационный профилограф ЗПР-2 внедрен в практику маркшейдерских работ в Алтын-Топканском рудоуправлении.

Результаты звуколокационных съемок рудоспусков Алтын-Топканского рудоуправления. На основании звуколокационных съемок, выполненных в Алтын-Топканском рудоуправлении, были получены фактические сечения рудоспусков, которые показали значительное их разрушение. Эти данные позволили проанализировать состояние открытых и подземных горных выработок с точки зрения безопасности их эксплуатации. Орт 14-й 2-го горизонта (см. рис. 25), временно закрытый для вентиляции, оказался обрушенным в рудоспуск № 1, орт 14-й 3-го горизонта в районе этого же рудоспуска находится в опасной зоне подработки. По восточно-полевому штреку 3-го горизонта проходило 70% всей добычи руды подземного рудника. Съемки показали опасное положение этого штрека: фактический целик между юго-восточной стенкой рудоспуска и этим штреком в момент съемки составлял 70 см, а на глубине 16 м (от почвы штрека) он оказался полностью подработанным. Поэтому штрек был немедленно закрыт, а взамен пройдена обходная выработка. Данные звуколокационной съемки в этом районе полностью подтвердились материалами разведочного бурения.

Значение фактических сечений рудоспусков позволило произвести анализ их разрушения. Характер разрушения рудоспусков рассмотрен в зависимости от следующих факторов: геологического строения месторождения, физико-механических свойств горных пород, технологической схемы разработки месторождения. Особенность геологического строения месторождения заключается в интенсивной трещиноватости метаморфизованных горных пород и наличии разнообразных тектонических нарушений — от крутопадающих разломов до пологих трещин. Тектонические трещины большого протяжения, падающие в сторону обнажения горных пород, создают плоскости скольжения, а наличие большого

числа трещин незначительного протяжения придает массиву свойства, близкие свойствам сыпучих сред.

Для установления взаимосвязи между геологическим строением и системой разработки месторождения, с одной стороны, и характером разрушения рудоспусков, с другой, проанализированы фактические сечения рудоспусков № 1, 2, 3 и 4. Эти рудоспуски эксплуатировались без крепи. Опытные работы по креплению отдельных участков рудоспусков (армирование шахтными рельсами) привели к отрицательным результатам: крепь разрушалась в первые месяцы эксплуатации вместе со стенками рудоспусков, что приводило к образованию трудно ликвидируемых «пробок».

На профилях рудоспусков (см. рис. 25) ясно видна зависимость величины разрушения от типа горных пород и наличия геологических нарушений. Резкое увеличение сечения рудоспуска № 1 наблюдается, например, при переходе от скарнов к известнякам. Несмотря на отсутствие тектонических нарушений на этом участке, максимальный размер рудоспуска в поперечнике достигает 23 м вместо 3 м по проекту. Расположенный ниже участок рудоспуска нарушен контактами горных пород и крутопадающим нарушением, сечение этого участка также значительно превышает проектное.

Среднее сечение участков определяется как среднее арифметическое из ряда сечений, взятых через равные интервалы по глубине рудоспуска (1—3 м). Сечение всего рудоспуска может быть определено как средневзвешенное по формуле

$$S_{\text{ср}} = \frac{S_1 \Delta H_1 + S_2 \Delta H_2 + \dots + S_n \Delta H_n}{\Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n}, \text{ м}^2, \quad (49)$$

где S_n — площадь среднего сечения отдельного участка; ΔH_n — глубина этого участка.

Объем пустой породы, обрушившейся при разрушении стенок рудоспуска, вычисляется по формуле

$$V = (S_{\text{ср}} - S_{\text{пр}}) H, \text{ м}^3, \quad (50)$$

где $S_{\text{пр}}$ — проектное сечение рудоспуска, м^2 ; H — общая глубина рудоспуска, м.

Анализ величины разрушения по типам горных пород с учетом горно-геологических условий показывает, что величина разрушения находится в прямой зависимо-

сти от физико-механических свойств пород, наличия тектонических нарушений и наклонных рудоспускных восстающих, значительно ослабляющих устойчивость пород.

Если рассмотреть участки, на разрушение которых два последних фактора не влияют, то породы по интенсивности разрушения можно расположить в следующем порядке: известняки, метаморфические сланцы и кварцевые порфиры, гранодиориты, скарны. Общая картина разрушения рудоспусков характеризуется данными табл. 5.

За пять лет эксплуатации только четырех упомянутых рудоспусков общий объем обрушенной породы составил 97 100 м³, или 270 тыс. т. Следовательно, вместе с рудой было перевезено и переработано на обогатительной фабрике 270 тыс. т пустой породы, что не могло не отразиться на экономике комбината. Фактически с учетом других рудоспусков этот объем является значительно большим.

Убытки предприятия складываются из затрат на перевозку породы по внутришахтному транспорту, подвешенной канатной дороге, железнодорожной ветке комбината, на переработку этих объемов на обогатительной фабрике плюс убытки в результате потерь металла при обогащении разубоженной руды. Если пустые породы инертны для данного флотационного процесса, то потерь металла не должно быть, если порода флотируется, то потери неизбежны. Фактически на Алтын-Топканском месторождении флотируется около 20% пустых пород, в их числе наиболее активными являются метаморфические сланцы и известняки, которые по объему составляют основной процент разрушенных пород.

Общие годовые убытки комбината составили около 340 тыс. руб. Значительная величина убытков и правила техники безопасности потребовали детального изучения причин разрушения рудоспусков и выработки рекомендаций по уменьшению обрушения пород. В результате анализа для уменьшения разрушения действующих рудоспусков были выработаны следующие рекомендации:

разгрузку руды в устье рудоспуска на карьере производить со стороны более крепких, ненарушенных пород;

Таблица 5

Ма- доспус- ка	Порода по участкам	Глубина участка от устья, м	Сечение на участке, м ²	Коэффици- ент разру- шения участка	Средне- издающиеся сечения по рудоспус- ку, м ²	Коэффици- ент разру- шения по рудоспуску	Объем раз- рушенных пустых по- род, м ³
1	Скарны	0—108	14,0	2	78,4	11	28 540
	Известняки	108—147	192,2	27			
	Скарны	147—173	168,0	24			
	Метаморфические сланцы	173—242	81,1	11,5			
2	Кварцевые порфиты	0—44	281,1	40	103,8	15	39 040
	То же	52—96	71,0	10			
	Скарны	96—141	62,3	9			
	Эндозиты	141—153	14,7	2			
	Гранодиориты	153—171	21,8	3			
	Кварцевые порфиты	171—252	79,8	11,5			
3	Гранодиориты	0—9	17,9	2,5	101,2	14,4	20 050
	Метаморфические сланцы	12—105	148,3	21			
	Гранодиориты	108—162	59,5	8,5			
	Метаморфические сланцы	162—192	55,0	8			
4	Гранодиориты	0—36	29,1	4	73,9	10,5	9420
	Метаморфические сланцы	36—68	124,2	17,5			

Примечание. Коэффициент разрушения—отношение фактического сечения рудоспуска к проектному.

если руда не склонна к слеживанию и приток воды невелик, эксплуатацию рудоспусков следует вести в за-полненном состоянии, систематически поддерживая уровень руды в них и регулируя ее движение бесперебойной работой поверхностного и шахтного транспорта;

снижать кусковатость руды и не допускать попадания негабаритных кусков руды в рудоспуски;

не крепить глубокие рудоспуски, рассчитанные на длительный срок эксплуатации и перепуск большого количества неизмельченной в дробилках руды, так как крепь в таких рудоспусках разрушается вместе с породой и создает «пробки», ликвидация которых с помощью буровзрывных работ ведет к дополнительному разрушению рудоспусков;

производить съемку глубоких рудоспусков звуко-локационным методом не реже двух раз в год и на основе полученной документации принимать меры для снижения интенсивности разрушения стенок рудоспусков для безопасности горнотранспортных работ в карьере и в примыкающих к рудоспускам подземных горных выработках.

Так как рекомендации по эксплуатации действующих рудоспусков только частично улучшают их состояние, то необходимо рассмотреть вопрос о выборе места заложения проектируемых рудоспусков с точки зрения их наименьшего разрушения и, следовательно, снижения материального ущерба предприятия.

При выборе мест заложения рудоспусков и увязке их расположения с действующим комплексом открытых и подземных горных работ необходимо учитывать указанные выше факторы и вопросы экономики. Чтобы материальный ущерб, связанный с разрушением стенок глубоких рудоспусков, был наименьшим, необходимо при их проектировании производить технико-экономическое сравнение нескольких вариантов. Для этого в соответствии с вычисленными коэффициентами обрушения пород нужно определить ожидаемое разрушение по рудоспуску в целом и подсчитать связанный с этим экономический ущерб. Сравнивая варианты, можно прийти к выводу, что разрушение будет уменьшено при расположении рудоспусков в других местах, но при этом потребуются дополнительные затраты на транспорт или проведение новых горных выработок. В этом случае выбор рацио-

нального места заложения глубоких рудоспусков должен быть подчинен экономическому фактору.

Экономический эффект от внедрения звуколокационной съемки на Алтын-Топканском месторождении составил 68 тыс. руб. в год.

Одновибраторный звуколокационный профилограф рудоспусков ЗПР-О. Дальнейшее развитие звуколокационного метода съемки привело к созданию более совершенного одновибраторного звуколокационного профилографа ЗПР-О [39], разработанного для контроля за износом вертикальных капитальных рудоспусков рудника «Молибден» Тырныаузского горно-металлургического комбината. По этим рудоспускам скарно-роговиковая руда, значительно более крепкая, чем породы стенок рудоспусков, перепускалась на основной откаточный горизонт. В течение всего периода эксплуатации рудоспуски, за исключением самой нижней бункерной части, как правило, не были заполнены. В результате перепуска в таких условиях руды в значительном количестве и на большую глубину произошло быстрое разрушение стенок рудоспусков, увеличение их сечения и нарушение охранного целика ствола.

В 1964—1966 гг. были проведены их звуколокационные съемки прибором ЗПР-2, которые позволили получить представление о степени разрушения рудоспусков. Однако выполнение этих съемок было сопряжено со значительными трудностями, связанными как с особенностями конструкции ЗПР-2, так и с условиями на руднике «Молибден». Основные задачи, которые требовалось решить при разработке нового прибора, заключались в повышении безопасности и производительности съемочных работ при увеличении глубины спуска почти в 1,5 раза.

На основании проведенных исследовательских и опытно-конструкторских работ в новом профилографе ЗПР-О были уменьшены размеры и вес акустического блока, разработана система автоматического дистанционного управления ее поворотом в горизонтальной плоскости, модернизирована конструкция подъемной лебедки и подвески акустического блока.

Система дистанционного управления поворотом содержит два идентичных редуктора, приводимых во вращение синхронными двигателями ДС-1. Один из редук-

Техническая характеристика приборов

	ЗПР-2 25	ЗПР-О 25
Дальность действия, м		
Точность измерений:		
расстояний, %	± 2	± 2
глубины, м	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
Мертвая зона прибора, м	0,2	1,2
Максимальная глубина спуска, м	350	500
Максимальный угол поворота акустических систем в градусах	± 360	± 360
Точность определения угла поворота, мин	± 30	± 30
Способ поворота акустической системы	Вручную	Автоматический
Акустическая система из цилиндрических магнитострикционных преобразователей с коническими рефлекторами	Двухвибра- торная	Одновибра- торная
Рабочая частота, кГц	15,6	15
Угол диаграммы направленности при $\Phi_{0,7}$ в градусах	3,5	3,5
Время съемки одного профиля на максимальную глубину с отсчетом показаний через 5 м, мин	60	15
Масса, кг:		
акустической системы	30	15
наземной аппаратуры	30	30
подъемной лебедки	120	130
соединительных кабелей с лебедкой	35	50
подвесной каретки с направляющими блоками	20	20
Потребляемая мощность от сети 50 Гц, 220 В:		
аппаратурой, Вт	300	300
лебедкой, Вт	600	600
Число блоков при транспортировке	6	7

торов устанавливается на блоке подвески и приводит во вращение акустическую систему ЗПР-О, второй — находится в наземном усилителе и кинематически связан с указателем угла поворота градусного лимба (рис. 26 и 27). С помощью переключателя вида работы осуществляются включение и реверс вращения редукторов (левый — правый ход). Угловая скорость вращения акустической системы и лимба индикатора постоянна и равна $\frac{1}{6}$ об/мин, или $1^\circ/\text{с}$. Угол поворота акустической системы в одну сторону не должен превышать 450° , так как в противном случае возникает опасность закрутки

кабелей, соединяющих акустическую систему с наземной аппаратурой.

Подъемная лебедка ЗПР-О имеет фрикционную муфту сцепления, обеспечивающую плавный пуск и остановку, и коробку скоростей, позволяющую производить спуск (подъем) акустической системы в интервале скоростей 0,25—0,64 м/с. Конструкция лебедки обеспечивает быстрое снятие (установку) диска с лентой и приводного электродвигателя, что существенно облегчает ее транспортирование в шахтных условиях.

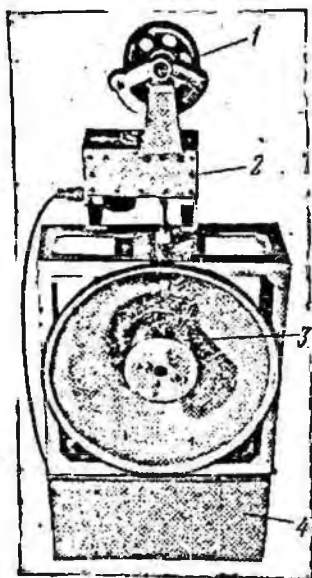


Рис. 26. Акустическая система ЗПР-О:

1 — блок подвески; 2 — редуктор горизонтального обзора; 3 — магнитострикционный преобразователь; 4 — электропный отсек

Акустический блок ЗПР-О выполнен по одновибраторной схеме, в которой излучение и прием акустических сигналов производится одним и тем же преобразователем [38, 39]. Такое совмещение функций излучателя и приемника в одном преобразователе позволяет устранить недостатки, присущие двухвибраторным системам и влияющие на точность измерений, стоимость и размеры звуколокатора. К недостаткам двухвибраторной системы можно отнести: непараллельность осей излучателя и приемника, несогласованность их резонансно-частотных характеристик и диаграмм направленности, большие вес и размеры двухвибраторной системы.

В то же время применение одновибраторных систем в звуколокаторах вызывает принципиальные трудности, связанные, во-первых, с необходимостью автоматической коммутации преобразователя с излучения на прием и обратно, во-вторых, с необходимостью сокращения мертвой зоны локатора, т. е. интервала времени, начиная с момента излучения, в течение которого он оказывается неспособным регистрировать отраженные сигналы. Осо-

бое значение эти обстоятельства приобретают при использовании в акустических системах магнестрикторов из никеля. Они хотя и обладают низкой эффективностью в воздухе, но имеют высокую механическую прочность по сравнению с другими типами преобразователей и практически нечувствительны к внешним воздействиям,

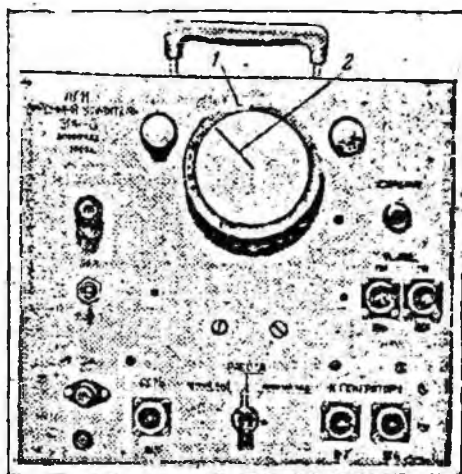


Рис. 27. Усилитель ЗПР-О с градусным лимбом 1 и указателем 2

которым может подвергаться акустическая система в рудоспуске (интенсивный капеж, удары мелких кусков осыпающейся руды и т. п.).

Для переключения режима работы вибратора с излучения на прием в приборе ЗПР-О применяется диодно-резистивный коммутатор, функциональная схема которого приведена на рис. 28 [38]. Его особенностью является то, что диодная цепь выполнена в виде встречно последовательно соединенных диодов, средняя точка которых через резистор подключена к генератору, а крайние соединены соответственно с вибратором и входом усилителя. Работа одновибраторного звуколокатора с таким коммутатором происходит следующим образом. При посылке зондирующего импульса генератор возбуждает

обмотку вибратора B и одновременно обесточивает цепь резистора $R2$ и диодов $D1$ и $D2$. Сопротивление диодной цепи при этом существенно возрастает и тем самым осуществляется развязка входа усилителя от воздействия прямого импульса в момент излучения. После окончания зондирующего импульса через резистор $R2$ и диоды $D1$ и $D2$ начинает протекать постоянный ток, отпираю-

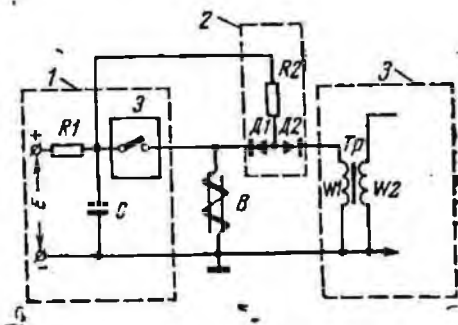


Рис. 28. Принципиальная схема коммутации преобразователя в одновибраторном звуколокаторе:

1 — генератор; 2 — коммутатор; 3 — усилитель;
 E — источник заряда напряжения; $R1$ — балластный резистор; C — накопительный конденсатор; $W1$ и $W2$ — обмотки входного трансформатора Tr

щий диодную цепь. В таком состоянии происходит прием отраженных сигналов. Малое дифференциальное сопротивление открытых диодов $D1$ и $D2$ не вносит заметных потерь в цепь передачи отраженных сигналов от вибратора B к усилителю. Принимаемый сигнал практически не шунтируется генератором, так как сопротивление резистора $R2$ на несколько порядков больше входного сопротивления усилителя, а ключ 3 в генераторе в этот промежуток времени разомкнут. Такое выполнение устройства позволило автоматизировать процесс коммутации работы магнитострикционного вибратора в режиме излучения — приема.

Мертвая зона любого одновибраторного звуколокатора соответствует сумме времен излучения зондирующего импульса и затухания колебаний вибратора после окончания действия возбуждающего электрического сиг-

нала. В течение этого интервала звуколокатор не способен реагировать на отраженные сигналы, величина которых, как правило, весьма мала даже при небольших расстояниях локации.

Поскольку в приборе ЗПР-О применяется ударное возбуждение, величина мертвой зоны при постоянной чувствительности приемного усилителя будет целиком определяться декрементом затухания преобразователя. Вследствие малой акустической нагрузки в воздухе декремент затухания зависит только от внутренних потерь на трение в колеблющемся преобразователе.

Серийные магнитоэлектрические вибраторы, содержащие сердечник в виде набора тонких никелевых пластин, не обеспечивают высокого декремента затухания, а следовательно, малой величины мертвой зоны. Поэтому для одновибраторного профилографа была разработана специальная конструкция (рис. 29), обеспечивающая получение необходимых значений декремента затухания. Магнитопровод, также состоящий из никелевых пластин, выполнен в виде соединенных в общий пакет секций, имеющих различные собственные частоты механического резонанса, вследствие чего в режиме излучения между секциями возникает дополнительное трение, увеличивающее декремент затухания. Регулировку декремента можно осуществить, изменяя усилие затяжки пакета. Для устранения реверберационных явлений на излучающей поверхности магнитоэлектрика наружный диаметр секций D имеет один и тот же размер, а внутренняя часть цилиндра заполняется звукопоглощающим материалом (акустической резиной, поролоном и т. п.).

На рис. 30 показана экспериментально снятая зависимость декремента затухания α_1 от высоты секций h

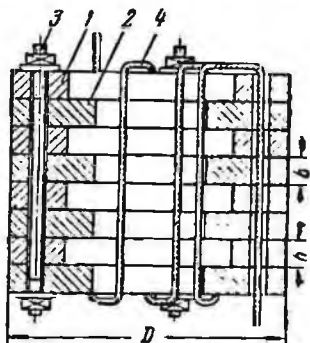


Рис. 29. Магнитопровод демпфированного магнитоэлектрического вибратора:

1 и 2 — высокочастотная и низкочастотная секции; 3 — шпилька; 4 — обмотка возбуждения

при постоянном усилии затяжки пакета. Зависимость мертвой зоны звуколокатора $R_{м.з}$ от величины декремента затухания преобразователя показана на рис. 31. Поскольку при съемке рудоспусков мертвая зона не должна превышать 1—1,5 м, в приборе ЗПР-О был использован преобразователь с секцией высотой $h=6$ мм и декрементом $\alpha_1 \approx 0,175$. Для сравнения укажем, что если применить обычный несекционированный магнито-стриктор ($\alpha_1 \leq 0,06$), то, как это следует из рис. 31, его мертвая зона превысит 4 м.

Увеличение декремента затухания в магнито-стрикционном вибраторе связано со снижением его чувстви-

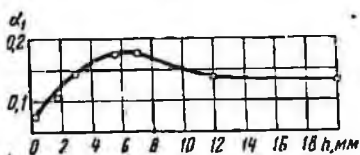


Рис. 30. Зависимость декремента затухания α_1 секционированного преобразователя от высоты секций h при осевой нагрузке $F=30$ кгс

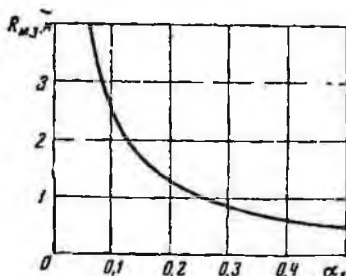


Рис. 31. Зависимость мертвой зоны $R_{м.з}$ звуколокатора ЗПР-О от декремента затухания преобразователя α_1 при постоянном коэффициенте усиления приемного усилителя

тельности. Чтобы компенсировать потерю чувствительности, в акустической системе ЗПР-О применяется резонансное согласование преобразователя с рабочей средой (воздухом) с помощью тонкослойного резонатора. Конструктивное выполнение этого способа согласования весьма просто и заключается в следующем. На некотором расстоянии от рабочей поверхности преобразователя располагается параллельно ей тонкая накладка из материала массой m . Эта масса совместно с упругостью воздуха в зазоре между накладкой и поверхностью преобразователя образует механическую колебательную систему с резонансной частотой

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{m}}, \quad (51)$$

где σ — упругость воздуха в зазоре, однозначно определяемая величиной этого зазора.

Изменяя зазор или массу накладки, можно настроить данную систему на основную резонансную частоту магнитострикционного преобразователя. В этом случае акустико-механический к. п. д. преобразователя существенно возрастает, чем достигается повышение чувствительности магнитостриктора, обеспечивающее требуемую дальность локации.

Практический эффект резонансного согласования магнитостриктора с воздухом можно проиллюстрировать на следующем примере. При локации прибором ЗПР-О поверхности, расположенной на расстоянии 27 м, оказалось, что уровень полезного сигнала за счет резонатора возрастает в 20 раз. В качестве резонатора был использован слой бумаги толщиной 0,1 мм, обернутой вокруг цилиндрической поверхности магнитостриктора с зазором около 0,4 мм.

Методика профилировки рудоспуска с помощью звуколокатора ЗПР-О состоит в следующем. Аппаратуру устанавливают в подходной выработке, через рудоспуск перебрасывают и закрепляют несущий трос, на который подвешивается каретка с направляющими блоками. Подъемную лебедку устанавливают в створе с блоками и тросом (рис. 32).

Акустическую систему подвешивают на каретку в безопасном месте. С помощью растяжек каретку с аппаратурой перемещают по тросу и выводят в проектное сечение рудоспуска. Зная дирекционный угол несущего троса и исходные геометрические размеры, определяют координаты x , y оси спуска, а также высотную отметку центра акустической системы. В этом положении отсчет по градусному лимбу указателя (см. рис. 27) и отсчет по счетчику глубин лебедки равны нулю. Исходное направление звукового луча совпадает со створом лент или перпендикулярно ему. Методика съемки одного профиля не отличается от профилирования с помощью ЗПР-2. Однако после съемки первого профиля аппаратуру не поднимают для разворота. Поворот акустических систем на требуемый угол производят с помощью редуктора горизонтального вращения, а величину этого угла фиксируют по градусному лимбу. Съемку второго профиля выполняют при подъеме аппаратуры, а следующего — при

спуске и т. д. Таким образом съемка производится непрерывно. В местах, где запланирован горизонтальный обзор рудоспуска или возникает такая необходимость, подъем прекращают, по лимбу фиксируют отсчет и осу-

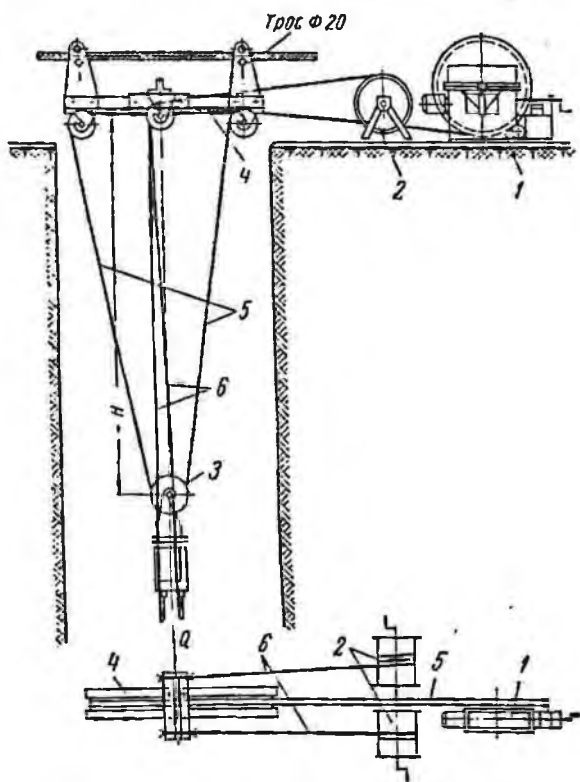


Рис. 32. Схема спуска аппаратуры в рудоспуск с помощью каретки:

1 — подъемная лебедка; 2 — кабельная лебедка; 3 — блок подвески; 4 — каретка; 5 — металлическая лента; 6 — кабель

ществляют горизонтальный осмотр при повороте акустической системы на 360° .

С помощью прибора ЗПР-О, начиная с 1967 г., был произведен ряд съемок глубоких рудоспусков рудника «Молибден». Звуколокационная съемка рудоспусков

показала, что за два года эксплуатации их среднее сечение увеличилось до 88,6 м² по сравнению 7,1 м² по проекту), а в районе максимального разрушения достигло 141 м². При повторных съемках через некоторое время было установлено дальнейшее интенсивное разрушение рудоспусков. Результаты съемок были использованы для выявления закономерностей разрушения и выбора конструкции новых рудоспусков. Во избежание подрботки капитального шахтного ствола было принято решение заполнить оба рудоспуска пустыми породами, а взамен их пройти наклонные рудоспуски.

С помощью прибора ЗПР-О в сложных условиях Заполярья были также проведены профилировки капитальных 550-метровых рудоспусков комбината «Апатит». В отличие от условий эксплуатации ранее рассмотренных рудоспусков, в Апатитах имеет место обмерзание стенок рудоспусков и образование «пробок». Естественно, впервые полученные данные о фактическом состоянии этих горных выработок позволили подойти к решению задачи безаварийной их эксплуатации.

§ 8. ЗВУКОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА ОЧИСТНЫХ КАМЕР

Условия съемок и характеристика объектов. При подземной разработке рудных месторождений контроль за ходом производственных процессов и состоянием горных выработок, анализ существующих технологических схем добычи, снижение потерь и разубоживание руд, обеспечение безопасности ведения горных работ возможны только на базе материалов маркшейдерской съемки очистных камер.

Методика маркшейдерской съемки очистных камер в основном зависит от системы подходов к ним, т. е. от расположения тех выработок, из которых или через которые можно производить маркшейдерскую съемку подземных пустот. В доступных камерах наблюдатель может расположиться с прибором непосредственно в очистном пространстве (камерно-столбовые системы разработки). Съемку недоступных очистных камер можно производить через восстающий в потолочине, из выработок горизонта подсечки и горизонта потолочины, или из горизонтальных выработок, расположенных по высоте ка-

Системы разработки	Угол падения рудного тела в градусах	Мощность рудного тела, м	Размер камеры, м			Подходы к камерам
			ширина	высота	длина	
Системы с открытым очистным пространством						
Камерно-столбовая	0—20	5—12	15—20	5—12	40—60	Можно непосредственно находиться в пространстве Выработки, расположенные по высоте камеры с двух сторон То же, но с одной стороны
Подэтажных штреков	60—90	5—30	5—30	30—40	50—80	
Подэтажных ортов	60—90	15—30	15—30	30—40	50—80	
Этажно-камерная с отбойкой руды	60—90	20—30	20—30	40—50	40—50	То же Выработки горизонта потолочины с одной стороны
глубокими скважинами: горизонтальными вертикальными	60—90	50—100	20—30	40—50	50—100	
Системы с магазинированием руды						
С отбойкой руды на подготовительных выработках: с минной отбойкой	60—90	10—70	20—30	40—50	50—70	Выработки, расположенные по высоте камеры с двух сторон Восстающий в потолочине
с отбойкой глубокими скважинами	60—90	10—70	20—25	40—50	50—100	

Продолжение табл. 6

Системы разработки	Угол падения рудного тела в градусах	Мощность рудного тела, м	Размер камеры, м			Подходы к камерам
			ширина	высота	длина	
Системы с обрушением						
Подэтажного обрушения: «закрытый веер»	90	От 5 и более	4	10—12	8—12	Выработки горизонта подсечки с одной стороны
с отбойкой глубокими скважинами	60—90	От 5 и более	10—20	20	25	Выработки, расположенные по высоте камеры с одной стороны
«закрытые камеры»	90	От 5 и более	6—9	10—12	7—12	Выработки горизонта подсечки и потолочины с одной стороны
Этажного принудительного обрушения с отбойкой руды глубокими скважинами:						
вертикальными	60—90	30—100	12—15	40—50	30—50	Выработки горизонта потолочины с двух сторон
горизонтальными	60—90	30—100	30—40	40—50	30—60	Выработки, расположенные по высоте камеры с четырех сторон
Камерная с последующей бетонной закладкой	60—90	30—100	10—30	30—35	20—50	Выработки горизонта потолочины с одной стороны или восстающий в потолочине

меры и имеющих выход в очистное пространство. В табл. 6 дана характеристика систем разработки и подходов к камерам, а в табл. 7 очистные камеры сгруппированы в зависимости от системы подходов к ним.

Таблица 7

Подход к камере	Угол наклона камеры в градусах	Размер камеры, м			Максимальное расстояние съемки, м
		ширина	высота	длина	
Камеры доступные . . .	0—20	15—20	5—12	40—60	—
Камеры недоступные:					
выработки горизонта					
подсечки	90	4—9	10—12	8—12	12—17
выработки горизонта					
потолочины	60—90	10—20	30—50	20—100	35—135
горизонтальные выработки, расположенные по высоте камеры и имеющие непосредственный выход в очистное пространство	60—90	5—40	30—50	30—80	55—110
восстающий в потолочине	60—90	10—30	30—50	20—100	До 100

Если съемку производить непосредственно из подходной выработки, например, с помощью проекционно-визуального дальномера, то прибор и наблюдатель должны находиться в безопасном месте и не ближе 1—2 м от края камеры. Если инструмент установлен на расстоянии 1 м от края, то при высоте выработки 2 м и высоте инструмента 1,3 м пределы измерения вертикальных углов будут колебаться от -50 до $+35^\circ$. Естественно, ограниченность визирования в вертикальной плоскости отрицательно сказывается на возможности обзора камеры. На рис. 33 показана зависимость максимальной высоты визирования от длины камер при съемке из выработок горизонта подсечки, а на рис. 34 — зависимость наибольшей глубины визирования от длины камеры при съемке из выработок горизонта потолочины. На рис. 35 приведена зависимость величины мертвой зоны от ширины камеры и размеров подходной выработки. Из

графиков видно, что при наличии подходов из горизонтальных выработок только с одной стороны можно снять лишь часть камеры. Другую часть камеры можно заснять с противоположной стороны.

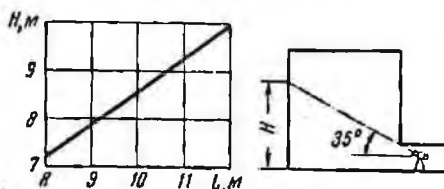


Рис. 33. График зависимости максимальной высоты визирования H от длины камеры L

Рис. 34. График зависимости максимальной глубины визирования H от длины камеры L

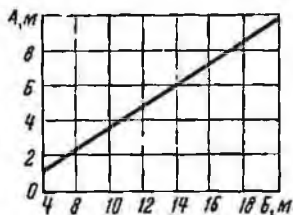
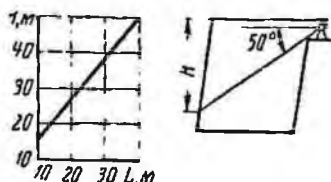


Рис. 35. Зависимость величины мертвой зоны A от ширины камеры B

Особого внимания заслуживает вопрос о влиянии шахтной атмосферы на возможность применения различных методов съемки. Известно, что рудничный воздух содержит большое количество разнообразных по составу, удельному весу и форме взвешенных пылевых частиц. Кроме того, состояние атмосферы зависит от влажности, температуры и скорости движения воздуха. По разме-

рам частицы пыли можно разделить на макроскопические (диаметр более 10 мкм), микроскопические (диаметр от 0,25 до 10 мкм) и ультрамикроскопические (диаметр менее 0,25 мкм), которые по своему поведению в воздухе приближаются к газовым молекулам.

В спокойной атмосфере происходит оседание частиц первой и второй групп. Более мелкие частицы находятся постоянно во взвешенном состоянии. О содержании в рудничной атмосфере после взрывных работ пылинок различных размеров можно судить по следующим данным:

Размер пылинок, мкм . .	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	
Количество частиц, % .	24,3	33,4	19,7	11,8	5,7	2,7	1,1	
Размер пылинок, мкм . .	4	4,5	5	6	7	8	9	10
Количество частиц, % . .	0,3	0,16	0,23	0,2	0,13	0,08	0,02	0,02

Из приведенных данных видно, что основной состав взвешенных частиц имеет размеры до 3 мкм. Средний диаметр пылинок после взрывных работ составляет 0,73 мкм. Наряду с запыленностью даже в чистом воздухе имеются частицы воды и других соединений размером около 0,1 мкм, а во влажном воздухе содержится до 50% частиц размером от 5 до 20 мкм. При капееже размеры капель достигают 200—2000 мкм. Динамика запыленности рудничной атмосферы зависит от скорости оседания частиц, которая пропорциональна плотности частицы и квадрату ее радиуса. По формуле Стокса произведен расчет скорости оседания различных по размеру и составу пылевых частиц (табл. 8).

Таблица 8

Минерал	Скорость оседания частиц (см/ч), имеющих размер, мкм						
	0,25	0,4	0,7	1	5	10	20
Галенит	4,8	12,9	40,0	79,9	2000	7990	31 970
Арсенопирит	4,0	10,3	31,6	64,6	1620	6440	24 760
Пирит	3,3	8,7	26,8	54,7	1370	5470	21 880
Сфалерит	2,6	7,0	21,5	43,9	1100	4390	17 560
Лимонит	2,4	6,5	20,0	40,6	1010	4060	16 240
Апатит	2,1	5,5	16,8	34,3	856	3430	13 720
Доломит	1,8	4,8	14,7	30,0	756	3000	12 000
Кварц	1,7	4,6	14,0	28,5	713	2850	11 400

Таблица наглядно показывает, насколько мала скорость оседания частиц, особенно с уменьшением их размера. Например, для оседания на глубину 50 м частице кварца размером 20 мкм необходимо примерно 0,5 ч, а для частицы размером 0,7 мкм — около 360 ч. При наличии даже слабого движения воздуха время оседания существенно увеличивается.

Наличие большого количества пылинок в атмосфере приводит к ослаблению светового потока и резко снижает точность и дальность измерений с помощью оптических приборов. Ослабление светового потока происходит вследствие поглощения и рассеяния. Общее ослабление зависит в основном от соотношения размеров частиц d и длины волны λ светового луча. Наряду с этим количество поглощенной и рассеянной энергии зависит от формы и строения частиц. При $\lambda > d$ поглощение, если оно имеет место, значительно больше, чем рассеяние. При этом поглощение происходит главным образом в результате преломления света внутри частиц. Основное влияние на ослабление энергии при $\lambda < d$ оказывает рассеяние, величина которого пропорциональна площади поперечного сечения частиц. Общее рассеяние пропорционально числу частиц [40]. Таким образом, если длина волны соизмерима с размерами взвешенных частиц, имеет место значительное ослабление энергии светового или звукового луча.

При съемке камер оптическими приборами используется видимый спектр света, длина волны которого находится в пределах 0,4—0,7 мкм. При таких значениях λ , очевидно, имеет место большое ослабление света, что значительно ограничивает возможность применения оптических приборов для съемки камер [40, 44]. В то же время при оценке возможности применения звуколокации в подобных условиях можно сделать вывод, что взвешенные частицы на ослабление звука практически не влияют, так как длина волны звуковых колебаний в используемом диапазоне частот обычно превышает 5—10 мм.

В табл. 9 приведены основные характеристики отечественных оптических приборов для съемки очистных камер и подземных пустот. Практика показывает, что их общим недостатком является зависимость основных характеристик — дальности действия и точности измере-

Принцип измерения расстояний	Прибор	Назначение прибора и способ его установки во время съемки	Пределы измеряемых расстояний, м
Проекционно-визуальный дальномер	УДС	Измерение расстояний до недоступных точек в пределах прямой видимости; приборы устанавливаются на штативе	3—40
	ТПБ Д-1м		4—60 2—60
Фотограмметрический (ВНИМИ)	Стереосектограф СС	Дистанционная съемка по горизонтальным сечениям; прибор опускается через скважину на штанговой колонне труб	3—100
	Однокамерный сектограф ОС	То же	3—100
	Однокамерный сектограф вертикальных сечений ОСВ	Дистанционная съемка вертикальных профилей из подходных выработок; прибор устанавливается на выдвижной консоли	2,5—75

ний — от состояния рудничной атмосферы. Кроме того, при дистанционной съемке фотограмметрическими приборами отсутствует возможность оперативного контроля за процессом измерения, что может привести к частичной, а иногда и к полной потере информации.

Основное достоинство звуколокационных приборов заключается в том, что их работоспособность практически не зависит от таких факторов, как запыленность, загазованность, повышенная влажность окружающей среды. Камеральная обработка результатов, получаемых звуколокационным методом съемки, как правило, минимальна. Во время съемки может быть осуществлен непрерывный визуальный контроль за ее ходом, оперативное управление процессом съемки возможно на любой его стадии.

Основные требования к звуколокационной аппаратуре, предназначенной для съемки очистных камер, за-

Таблица 9

Точность измерения расстояний	Пределы углового перемещения и точность ориентировки		Вид регистрации результатов	Способ ориентирования в пространстве	Подходы для съемки
	в горизонтальной плоскости	в вертикальной плоскости			
1:100	$360^\circ \pm 10'$	$-60^\circ + 80^\circ \pm 10'$	Визуальный отсчет по прибору	С помощью маркшейдерской привязки	Горизонтальные подходы к выработкам
1:150	$360^\circ \pm 6'$	$360^\circ \pm 6'$			
1:100	$360^\circ \pm 6'$	$\pm 70^\circ \pm 6'$			
1:50	$360^\circ \pm 30'$	—	Фиксация развернутых горизонтальных или вертикальных сечений на фотопленке с последующей камеральной их обработкой	Посредством ориентирования штанговой колонны	Вертикальные буровые скважины
1:50	$360^\circ \pm 30'$	—			
1:50	—	$180^\circ \pm 30'$			
			Относительно жесткого положения консоли		Горизонтальные подходы к выработкам

ключаются в следующем. Аппаратура должна обеспечивать безопасную и полную съемку камер при локализации различных поверхностей горных пород и закладки с наименьшими затратами времени. При этом требуется измерять расстояния в основном до 50 м в условиях значительной запыленности и загазованности. Точность измерения расстояний, как показали исследования, должна быть не ниже 1:50.

С учетом этих требований, в ЛГИ с 1964 г. началась разработка звуколокационной аппаратуры и методики съемки недоступных очистных камер Текелийского рудника. При отработке Текелийского месторождения применяют систему разработки камерами с бетонной и твердеющей закладкой выработанного пространства. Рудное тело по простиранию делят на блоки длиной 72 м и шириной, равной выемочной мощности рудного тела. Блок разделяют на камеры шириной 9 м, которые на-

резают вкрест простирання рудного тела и отработку которых ведут в определенной последовательности. Вначале отрабатывают две камеры, между которыми оставляют рудный целик. После их отработки и закладки бетоном отрабатывают и закладывают камеры второй очереди. В последнюю очередь отрабатывают междукamerные целики, расположенные между камерами, ранее заложенными бетоном.

Так как руда и вмещающие породы неустойчивы, при выпуске руды происходит обрушение стенок камеры и пород висячего и лежащего боков, что приводит к разубоживанию руды. Все пустоты после отработки камер заполняют бетоном. При последующей отработке соседних камер он частично попадает в руду, что также ее разубоживает и отрицательно влияет на извлечение металлов из руды на обогатительной фабрике. В этих условиях съемка камер необходима для определения рациональных параметров камер и буровзрывных работ, правильного расположения выработок и буровых скважин в камерах, учета потерь и разубоживания руды, определения объема камеры при планировании закладочных работ [10].

После полной отбойки и выпуска руды из камер единственным местом сообщения с пустой камерой может служить закладочный восстающий, пройденный в потолочине камеры. В этих условиях возможна только автоматическая съемка с дистанционным управлением и передачей результатов измерений на регистрирующий прибор. Для решения этих задач в ЛГИ был разработан звуколокационный планограф камер ЗПК-1.

Звуколокационный планограф камер ЗПК-1 представляет собой одновибраторный импульсный звуколокатор, предназначенный для съемки недоступных очистных камер по горизонтальным замкнутым сечениям с автоматической их записью на круговых диаграммах. Съемка камеры, за исключением потолочины и днища, возможна при условии свободного вертикального спуска электроакустического преобразователя на всю глубину камеры через восстающий в потолочине или из подходов выработок на горизонте потолочины (рис. 36).

В комплект ЗПК-1 входят генератор с коммутатором одновибраторной схемы приема — излучения, электростатический преобразователь, демодулятор с усилителем,

перьевой автоматический регистратор, редуктор для вращения вибратора, ручная подъемная лебедка со счетчиком глубины. Расчетная дальность действия прибора составляет 40 м, однако опыт его эксплуатации показал, что во многих случаях он обеспечивает измерение расстояний до 45—50 м.

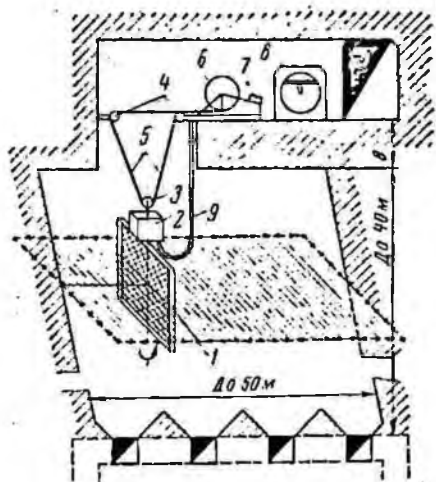


Рис. 36. Схема звуколокационной съемки очистной камеры через восстающий:

1—преобразователь; 2—редуктор горизонтального обзора; 3—блок подвески; 4—направляющие блоки; 5—металлическая лента; 6—подъемная лебедка; 7—указатель глубины; 8—регистратор; 9—кабель

Существенное увеличение дальности действия ЗПК-1 по сравнению с прибором ЗПР-2 было достигнуто в результате разработки высокоэффективного преобразователя электростатического типа [45]. Его устройство показано на рис. 37. На изоляционном основании 1 размещен плоский перфорированный электрод 2, над поверхностью которого с помощью кольца 3 натянута металлизированная лавсановая пленка — мембрана 4. Основание с электродом и натянутой мембраной вставлено в корпус 5 и прижато через прокладку 6 прижимной гайкой 7. Внутренний выступ корпуса 5 входит в зазор между электродом и основанием и, вдавливая туда мембра-

ну по всему периметру преобразователя, дополнительно ее натягивает. С рабочей стороны преобразователя на мембрану жестко установлен плоский перфорированный резонатор 8, зафиксированный кольцом 9. Мембрана 4 обращена к электроду 2 своей неметаллизированной поверхностью.

Элементы конструкции преобразователя — толщина резонатора, диаметр и число отверстий на единицу площади резонатора и электрода, а также зазор между резонатором и мембраной — выбираются таким образом, чтобы при возбуждении преобразователя на рабочей частоте обеспечить акустический резонанс объемов воздуха в отверстиях резонатора и электрода. Это приводит к повышению чувствительности, а следовательно, и эффективности всей акустической системы в целом.

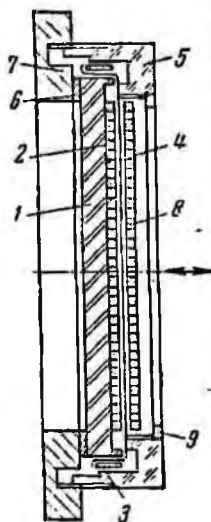


Рис. 37. Электро-статический преобразователь

На рис. 38 приведен вибратор звукоколокационного планографа камер ЗПК-1, устройство и принцип действия которого соответствуют рассмотренному выше электростатическому преобразователю (см. рис. 37). Следует отметить, что простота конструкции подобных преобразователей позволяет сравнительно легко осуществлять подстройку их рабочей (резонансной) частоты изменением зазора между резонатором и мембраной.

Также просто может быть осуществлен переход от одной рабочей частоты к другой сменой резонатора. Так, в приборе ЗПК-1 основная рабочая частота принята равной 18 кГц (угол раствора диаграммы направленности $\varphi_{0,7} \approx 1,3^\circ$) и предусмотрена возможность работы на частоте 22 кГц ($\varphi_{0,7} \approx 1^\circ$). Это позволяет повысить разрешающую способность звуколокатора благодаря уменьшению угла раствора. Но, как уже говорилось, повышение рабочей частоты связано с ростом затухания, поэтому на частоте 22 кГц дальность действия ЗПК-1 снижается до 27—33 м. Иногда этого предела бывает вполне достаточно для решения кон-

кретных производственных задач, требующих более детальной съемки.

Методика съемки очистной камеры прибором ЗПК-1 зависит от доступа в камеру. Если доступ в камеру возможен только через восстающий в потолочине, его устье перекрывается небольшим полком и вибратор с редуктором опускаются в камеру на двух ветвях стальной лен-

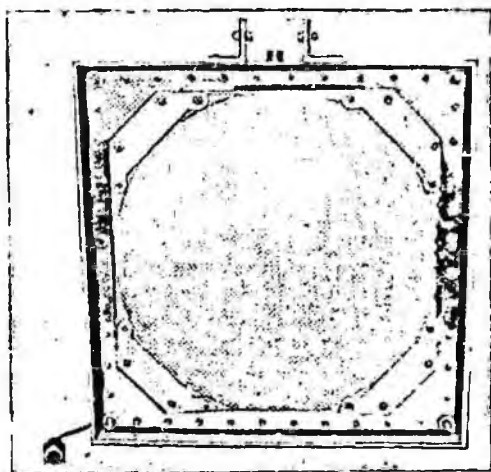


Рис. 38. Вибратор ЗПК-1

ты (см. рис. 36). Если же системой разработки не предусмотрена проходка восстающего, но имеются подэтажные штреки, пройденные, например, в междукamerных целиках или со стороны лежащего и висячего боков на горизонте потолочины, применима другая схема (см. рис. 44).

Через очистное пространство камеры перебрасывают металлический трос и закрепляют его в кровле подэтажных штреков. В одном из штреков устанавливают аппаратуру и подъемную лебедку, на трос навешивают каретку с направляющими блоками, а на них с помощью лент — вибратор с редуктором. Затем каретку на растяжках выводят по тросу в центр камеры и закрепляют, после чего опускают акустическую систему на горизонт

измерений. Иногда вибратор спускают с помощью подвижной консоли. Однако установка консоли сопряжена со значительными трудностями, ухудшает безопасность и усложняет съемочные работы.

Маркшейдерскую привязку и определение координат центра вибратора и оси излучения производят методами, изложенными выше при описании звуколокационной съемки рудоспуска.

В соответствии с проектом съемки, акустическую систему опускают до отметки первого горизонтального сечения. В этом исходном положении направление звукового луча совпадает со створом лент. После включения команды «Рабочий ход» начинается одновременное и синхронное вращение вибратора и кассеты регистратора с диаграммным бланком. Вибратор излучает зондирующие импульсы и принимает отраженные сигналы, интервалы времени между которыми пропорциональны измеряемому расстоянию. Электронная схема преобразовывает эти интервалы в пропорциональное им постоянное напряжение, которое фиксируется измерительной схемой регистратора, вызывая соответствующее перемещение пера от центра бланка.

Частота посылок зондирующих импульсов согласована со скоростью вращения вибратора и наибольшей дальностью локации. При угловой скорости вращения $1^\circ/\text{с}$ и дальности 40 м эта частота составляет примерно 3 Гц, т. е. при повороте вибратора на каждый градус будут осуществляться три измерения. На максимальном расстоянии локации (40—50 м) это составляет отрезок между соседними точками измерений в камере, равный 25 см, что соответствует на диаграммном бланке примерно 0,5 мм. Эта величина соизмерима с толщиной линии записи. Следовательно, точечный характер замеров, определяемый импульсным способом локации, практически отображается непрерывной линией записи контура замкнутого горизонтального сечения камеры на эхограмме.

После поворота вибратора на 360° или с некоторым перекрытием включается команда «Обратный ход», вращение диаграммного бланка прекращается, а вибратор возвращается в исходное положение, в котором происходит его автоматическая остановка. В это время производят смену диаграммного бланка и спуск или подъем

акустической системы на следующую высотную отметку. После чего повторяют весь цикл записи следующего сечения.

Ориентацию записываемых сечений производят во время нахождения вибратора в исходном положении. Для этого на демодуляторе включают команду «Нулевая

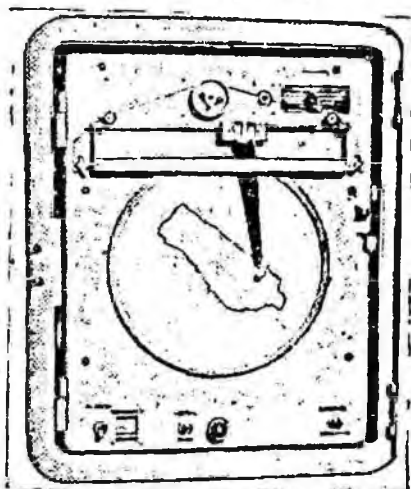


Рис. 39. Регистратор ЗПК-1

линия». В этот момент на регистратор поступает сигнал, вызывающий отклонение пера на всю длину радиуса диаграммного бланка. Поскольку исходное положение вибратора всегда постоянно по отношению к створу лент, прямая линия, зафиксированная на бланке, всегда будет указывать азимут исходного направления звукового луча. Эта линия называется нулевой, так как именно от нее каждый раз начинается запись горизонтального сечения.

На рис. 39 показан регистратор ЗПК-1, на диаграммном бланке которого отчетливо видна эхограмма контура горизонтального сечения очистной камеры. Длинная прямая линия, выходящая из центра бланка, является нулевой, короткая, идущая от контура к центру, обозначает возврат пера в исходное положение после

выключения рабочего хода. При этом контур сечения в данном случае записан с перекрытием примерно на 90° (угол между нулевой и линией возврата), т. е. за время рабочего хода вибратор совершил поворот на 450° относительно исходного положения. Запись сечения с перекрытием может быть использована для контроля за результатами измерений и оценки их точности (по совпадению линий первичной и вторичной записи на участках перекрытия).

Время записи полного сечения составляет 6 мин (поворот на 360°), обратного хода — 2 мин, поэтому время съемки одной очистной камеры (глубиной 60 м) с интервалом через 3 м по высоте не превышает 3 ч. Примерно столько же времени занимают транспортирование, монтаж, демонтаж и калибровка аппаратуры. Для очистных камер характерно отсутствие заметных перепадов температуры по высоте. Измерения показали, что разность температуры воздуха в верхней и нижней частях камеры, как правило, не превышает $1-2^\circ\text{C}$. Такой перепад дает весьма несущественную ошибку вследствие изменения скорости звука (примерно $0,2-0,4\%$), поэтому в результате съемки поправку на изменение температуры не вводят. Калибровку производят в подходной выработке на одном точно измеренном расстоянии. Поскольку нелинейность регистратора не превышает $0,5-1\%$, достаточно произвести калибровку одной точки на каждом масштабе ($1:200$ и $1:400$).

Питание аппаратуры производится от сети переменного тока 50 Гц, 127/220 В, потребляемая мощность не превышает 0,5 кВт, общая масса комплекта, включая контрольный осциллограф, подвесную каретку и кабельные лебедки, не превышает 150 кг.

Результаты съемок недоступных очистных камер Текелийского рудника. На Текелийском руднике в 1964—1970 гг. с помощью звуколокационного метода были сняты 24 очистные камеры. На рис. 40 приведены результаты съемки очистной камеры прибором ЗПК-1. Штриховыми линиями изображены проектные, а сплошными — фактические контуры камер. По имеющимся эхограммам была вычислена относительная среднеквадратичная ошибка по разности более ста двойных измерений. Величина этой ошибки не превышает $1/53$, т. е. соответствует установленной точности измерений.

Производство звуколокационных съемок с помощью прибора ЗПК-1 подтвердило возможность решения рассмотренного комплекса задач с помощью звуколокации. Несмотря на то, что при съемке не фиксировалось по-

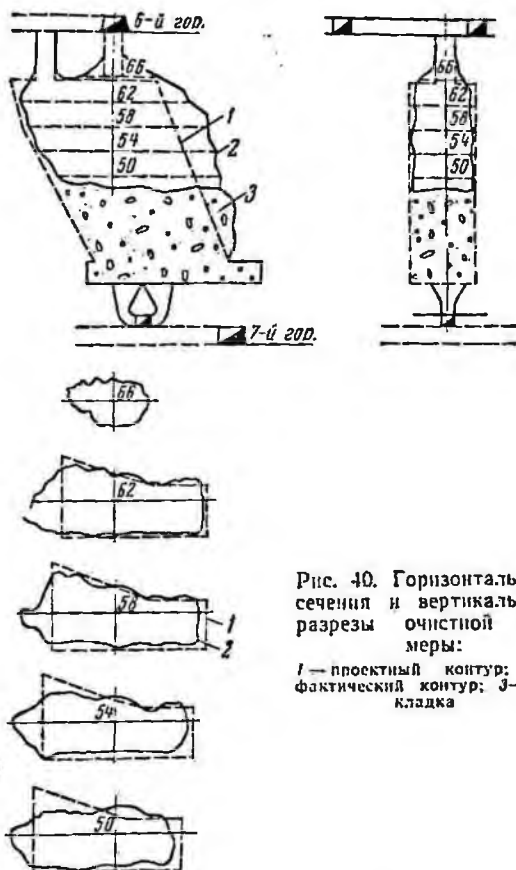


Рис. 40. Горизонтальные сечения и вертикальные разрезы очистной камеры:

1 — проектный контур; 2 — фактический контур; 3 — закладка

ложение потолочины и днища, результаты выполненных работ имеют существенное практическое значение. Из разрезов по простиранию камер видно, что в камере III очереди 41-го блока у всякого бока остался невзорванный массив руды, а в другой камере 42-го блока имел

место вывал породы из висячего бока (рис. 41). Полученные материалы позволили подсчитать объемы неотбитой руды и обрушенной породы и установить причины их проявлений. В камере 41-го блока по данным геологического опробования участок, где остался невзорванный массив руды, состоит из углисто-глинистых сланцев, которые обладают большим сопротивлением на раз-

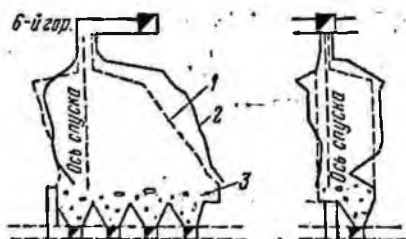


Рис. 41. Вертикальные разрезы очистных камер Текелийского рудника (составлены по материалам звуколокационной съемки):

1 — проектный контур; 2 — фактический контур; 3 — закладка

рыв поперек слоистости. Направление отбойки скважин в описываемом участке как раз и является поперечным. Что касается разрушения пород висячего бока в камере 42-го блока, то оно произошло вследствие слабого контакта между кварцитами и углистыми сланцами в кровле и в висячем боку.

Таким образом, на Текелийском руднике с помощью звуколокационных съемок установлены фактические параметры недоступных очистных камер и бетонных целиков. В результате этого появилась возможность более обоснованно подходить к расположению горных выработок и анализу системы разработки. Внесенные коррективы в систему отработки камер позволили снизить потери и разубоживание руды как за счет пород висячего и лежащего боков, так и за счет отбитого бетона. В результате уменьшения потерь и разубоживания руды, исключения перебуривания скважин получен значительный экономический эффект. Экономия составила 0,21 руб. на 1 т руды, или в среднем 8000 руб. на одну камеру. Об-

щая сумма экономии по руднику от внедрения звуколокационной съемки составила около 130 тыс. руб. [45].

Звуколокатор «Сфера» для полной съемки камер. Создание и внедрение звуколокатора ЗПК-1 в 1966 г. явилось основой для дальнейшего развития звуколокационного метода маркшейдерской съемки недоступных очистных камер. Комплексное решение горнотехнических вопросов потребовало осуществления их полной съемки, включая потолочину и днище, не только из подходящих выработок на горизонте потолочины, но и с других уровней, обусловленных самыми различными параметрами очистных камер и условиями их отработки [19, 21, 44]. Действительно, в недоступных или полудоступных камерах встречаются углы падения от 30—35 до 80—90°, что не позволяет производить свободный спуск прибора и требует проведения съемки из одной точки очистного пространства. Различные системы разработки обеспечивают доступ в очистное пространство через горизонтальные или вертикальные выработки. Поэтому в одном случае съемка возможна только из горизонтальной выработки на уровне днища и требует применения штатива, а в другом позволяет производить спуск прибора в камеру через вертикальную выработку или горизонтальные выработки на горизонте потолочины. Имеются очистные камеры (рудные тела) сложной конфигурации, полная съемка которых возможна только из нескольких точек. В подобных камерах также требуется применение комбинированного прибора, позволяющего выполнять съемку со штатива или при спуске прибора в камеру.

С учетом этих требований в 1969—1972 гг. для Гайского горно-обогатительного комбината был разработан звуколокатор «Сфера». Прибор предназначен как для полной съемки камер из одной точки очистного пространства по замкнутым вертикальным сечениям при его спуске в камеру, так и для частичной съемки камеры по вертикальным профилям или незамкнутым горизонтальным сечениям при установке прибора на штативе в любой горизонтальной подходной выработке. Его основные технические характеристики приведены в табл. 10. Общая масса комплекта аппаратуры: штативный вариант примерно 60 кг, подземный вариант примерно 100 кг. Прибор имеет две модификации электроакустического

Прибор и год окончания его разработки	Назначение прибора, способ его установки во время съемки	Пределы измеряе- мых расстоя- ний, м	Точность измерений
ЗПР-2Н (1964)	Дистанционная точечная съемка вертикальных профилей; акустическая система опускается на металлических лентах через восстающий или из подходов выработок с помощью консоли	0,2—27	1:50
ЗПК-1 (1966)	Дистанционная съемка по горизонтальным замкнутым сечениям; акустическая система опускается на металлических лентах через восстающий или из подходов выработок с помощью каретки	1,5—40	1:50
«Сфера» (1972)	Дистанционная съемка по вертикальным, горизонтальным и наклонным замкнутым сечениям; акустическая система опускается на металлических лентах через восстающий или из подходов выработок с помощью каретки или может устанавливаться на штативе в подходов выработках	1,5—50	1:50
«Зонд» (1972)	Дистанционная съемка по горизонтальным сечениям в условиях повышенной температуры ($+80^{\circ}\text{C}$) окружающей среды; спуск акустического снаряда производится на коротком кабеле на глубину до 1500 м	1,5—50	1:50

преобразователя — акустический диполь и одновибраторный преобразователь, каждая из которых позволяет проводить обзор по любым замкнутым сечениям.

На рис. 42 приведена конструкция акустической системы на штативе. Она состоит из трех основных узлов: преобразователя 1, рамы с редукторами вертикального 2 и горизонтального 3 вращения и собственно штатива 4. Для установки штатива в исходном горизонтальном положении имеется уровень 5, а для азимутальной привяз-

Таблица 10

Пределы углового перемещения и точность ориентировки		Вид регистрации результатов	Способ ориентирования в пространстве	Подходы для съемки
в горизонтальной плоскости	в вертикальной плоскости			
$360^\circ \pm 30'$	—	Визуальный отсчет измеряемых расстояний по осциллографу	Относительно створа лент, на которых опускается прибор	Восстающий в потолочные, горизонтальные выработки на уровне потолочины
$360^\circ \pm 30'$	—	Автоматическая запись на самописце горизонтальных замкнутых сечений в масштабе 1:200 или 1:400	То же	То же
$360^\circ \pm 30'$	$360^\circ \pm 30'$	Автоматическая запись на самописце круговых замкнутых сечений в масштабе 1:200 или 1:500	Относительно створа лент или с помощью маркшейдерской привязки при установке прибора на штативе	Горизонтальные подходные выработки на любом уровне по высоте камеры, восстающий
$360^\circ \pm 3^\circ$	—	Автоматическая запись на самописце горизонтальных замкнутых сечений в масштабе 1:200 или 1:500	С помощью магнитного датчика азимута	Вертикальные буровые скважины

ки преобразователя на раме установлен оптический визир 6. С помощью редуктора 3 осуществляется вращение преобразователя совместно с рамой в горизонтальной плоскости. Редуктор 2, смонтированный непосредственно в раме, вращает преобразователь в вертикальной плоскости. Центр симметрии преобразователя совпадает с центром вращения. В исходном положении преобразователь находится в вертикальной плоскости, и начальное направление звукового луча будет горизонтальным.

Методика съемки с помощью штатива состоит в следующем. Прибор устанавливают с соблюдением правил техники безопасности в подходной горизонтальной выработке в точке, откуда возможен наибольший обзор камер. Штатив приводится в горизонтальное положение по уровню 5, а преобразователь автоматически фиксируется в исходном положении с помощью концевых выключателей, установленных в редукторах вертикального и горизонтального вращения.

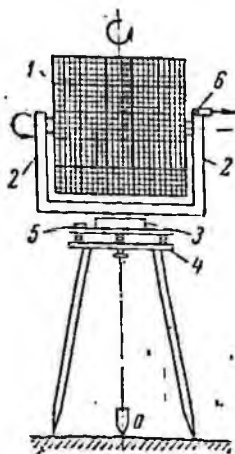


Рис. 42. Акустическая система на штативе.

Ось оптического визира совпадает с плоскостью преобразователя и, следовательно, она перпендикулярна направлению звукового луча. Поворачивая от руки основание акустической системы, совмещают вертикальную нить визира с ответом в ближайшей маркшейдерской точке, координаты которой известны. Затем с помощью редуктора поворачивают преобразователь в горизонтальной плоскости на угол 90° . В результате этого звуковой луч оказывается на продолжении прямой линии, проходящей через маркшейдерскую точку и центр преобразователя. Измеряя расстояние между ними и горизонтальный угол при маркшейдерской точке, вычисляют координаты вертикальной оси вращения преобразователя и дирекционный угол звукового луча.

В дальнейшем методика съемки с помощью штатива аналогична методике съемки при спуске преобразователя в камеру.

Фиксация исходного направления звукового луча, управление механизмами вращения акустической системы и контроль за углами ее поворота осуществляются с помощью регистратора (рис. 43). На его лицевой панели расположены соответствующие органы управления и неподвижный градусный лимб, внутри которого вращается кассета с диаграммными бланками. На кассете установлен механический указатель (стрелка), с помощью которого можно производить отсчет углов поворота преоб-

разователя (кассеты с бланками) по лимбу. Система управления вращением преобразователя построена таким образом, что при его возврате в исходное положение как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости происходит автоматическое выключение соответствующего редуктора.

В соответствии с поставленными горнотехническими задачами составляется проект съемки камеры, предусматривающий число вертикальных или горизонтальных сечений, их дирекционные углы или высотные отметки, масштабы записи с учетом проектных данных и исходного положения прибора, начальный угол поворота преобразователя для установки его в первом сечении. Непосредственно перед началом съемки совмещают указатель с нулем градусного лимба. Затем включают вертикальный обзор и осуществляют запись первого полного или частичного вертикального сечения в масштабе 1:200 или 1:500. При этом преобразователь и диаграммный бланк делают один полный оборот на 360° , после чего вращение автоматически прекращается и указатель снова совмещается с нулем лимба. Далее включают горизонтальное вращение и поворачивают преобразова-

тель на первый горизонтальный угол β_1 . При вторичном обороте на 360° осуществляют запись второго вертикального сечения, по окончании которого указатель совмещается с отсчетом β_1 . Для съемки третьего сечения поворачивают преобразователь на угол β_2 , получают отсчет по лимбу, равный $\beta_1 + \beta_2$, и осуществляют запись вертикального сечения и т. д.

В результате съемки получают эхограммы вертикальных сечений с известными дирекционными углами.

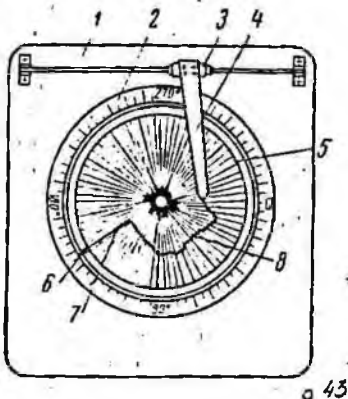


Рис. 43. Регистратор звуко-
катора «Сфера»:

1 — лицевая панель; 2 — градусный
либ; 3 — каретка; 4 — перо; 5 —
кассета с диаграммным бланком;
6 — указатель; 7 — нулевая линия;
8 — контур записываемого сечения

Центр эхограммного бланка представляет собой центр электроакустического преобразователя с известными координатами. Перед началом записи каждого вертикального сечения прочерчивают нулевую линию (см. рис. 43), фиксирующую положение горизонтального луча с известной высотной отметкой. Однако при съемке со штатива, как это видно из рис. 33 и 34, на эхограмме будет зафиксировано не замкнутое вертикальное сечение, а только его часть. Обзор участков в этом случае, находящихся в мертвой зоне, будет возможен только с противоположной стороны камеры.

Таким образом, с помощью штатива можно осуществлять только частичную съемку камеры или локальный обзор ее отдельных участков, что имеет практический смысл, но не решает поставленную задачу по полной съемке камер. Полный обзор камеры с помощью штативного варианта звуколокатора возможен в отдельных случаях при условии многократной съемки из различных подходящих выработок.

Поэтому для полной съемки камеры целесообразно применять второй вариант съемки, предусматривающий спуск электроакустического преобразователя непосредственно в очистное пространство. Для этого акустическую систему снимают со штатива и опускают на металлических лентах в камеру через восстающий в потолочине или с помощью подвесной каретки. Одна из схем съемки, при которой спуск преобразователя осуществляется с помощью каретки, приведена на рис. 44. Преимущество второго варианта съемки — полный обзор камеры из одной точки очистного пространства по любым замкнутым сечениям. Возможность съемки не зависит от угла падения рудного тела. Учитывая преимущество этого варианта, целесообразно предусматривать в проекте отработки очистных камер проведение вертикальных выработок в потолочине для последующей звуколокационной съемки. Как видно из рис. 44, преобразователь фиксируется в исходном положении, при котором направление звукового луча перпендикулярно вертикальной плоскости, проходящей через створ лент. Одновременно плоскость преобразователя будет вертикальна, а звуковой луч — горизонтален. Дирекционный угол створа лент (звукового луча) и координаты оси спуска определяют обычными маркшейдерскими методами.

При полной съемке камер по второму варианту также составляют проект съемочных работ с учетом фактического положения преобразователя. В результате вычисляют дирекционные углы планируемых к съемке вертикальных сечений и горизонтальные углы между этими сечениями и исходным направлением звукового луча. Съемку начинают с разворота преобразователя в горизонтальной плоскости для совмещения звукового луча

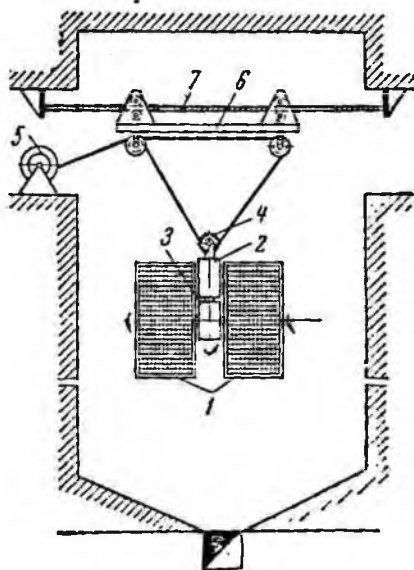


Рис. 44. Схема звуколокационной съемки камеры с помощью акустического диполя:

1 — диполь; 2 — редуктор горизонтального вращения; 3 — редуктор вертикального вращения; 4 — подвижная платформа; 5 — лебедка; 6 — каретки; 7 — трос

с первым вертикальным сечением. Угол поворота контролируется по градусному лимбу регистратора, а направление вертикального сечения (дирекционный угол) фиксируется на эхограммном бланке нулевой линией (см. рис. 43). В этом положении осуществляются обзор и запись первого замкнутого вертикального сечения при вращении преобразователя внутри рамы на угол 360° .

Затем снова разворачивают преобразователь с рамой в горизонтальной плоскости и совмещают звуковой луч со вторым вертикальным сечением, производят его запись и т. д.

С помощью звуколокатора «Сфера» можно производить запись любых замкнутых сечений. Например, в определенных условиях при наличии геологических нарушений, воронок в днище, вывалов из висячего бока или потолочины возникает необходимость фиксировать сечение по произвольному направлению. Съемка этих локальных контуров камеры горизонтальными или вертикальными сечениями малоэффективна или невозможна, так как они находятся в мертвой зоне. Поэтому для их фиксации записывают конические сечения при различных углах наклона звукового луча. Для этого вибратор поворачивают в вертикальной плоскости на нужный угол и включают горизонтальный обзор. Наклонный звуковой луч при этом перемещается в пространство по образующей прямого конуса, следы встречи которого с поверхностью горной выработки фиксируются регистратором в виде плоского конического сечения.

Эхограммы горизонтальных и вертикальных сечений практически не требуют камеральной обработки, масштаб записи устанавливается заранее.

Учет влияния температуры и других внешних факторов на скорость звука и исключение связанных с этим ошибок измерений в звуколокаторе «Сфера» осуществляется с помощью автономного блока калибровки. Калибратор содержит два малогабаритных акустических преобразователя — излучатель и приемник, расположенных на точно установленной базе R_0 и электрически связанных со схемой локатора. В режиме «калибровка» цепь «излучатель — приемник — электронный блок» представляет собой замкнутое функциональное кольцо, в котором акустическая база является линией задержки. Сигнал циркулирует по этому кольцу, каждый раз проходя через базу R_0 . С помощью селектора отсчитывают любое число сигналов, получая расстояние калибровки $R_n = nR_0$, где n — заданное число сигналов калибраторного блока.

Акустическая база в приборе «Сфера» равна 2 м и выполнена в виде звукового лабиринта, размещенного в переносном кожухе небольших размеров. В кожухе

имеются отверстия для свободной циркуляции воздуха. Электронная схема локатора позволяет выполнять калибровку в любые моменты съемки камеры.

Рассмотренные выше две модификации акустической системы прибора «Сфера» с одинаковым успехом могут быть использованы для работы. Различие между ними состоит в следующем. Односекционный преобразователь (см. рис. 42) имеет более острую характеристику направленности, однако не позволяет в некоторых случаях проводить эффективную съемку потолочины камеры. Это обусловлено возникновением реверберации, т. е. многократным отражением акустического импульса между элементами подвески и рабочей поверхностью преобразователя.

Акустический диполь, наоборот, практически нечувствителен к системе подвески, но имеет высокий уровень добавочных лепестков диаграммы направленности.

Поскольку конструкция и электрическая схема обеих акустических систем одинаковы как для штативного, так и для подвесного варианта съемки, выбор акустической системы для проведения конкретной съемки определяется особенностями объекта и задачами съемки с учетом указанных выше замечаний.

Так как с разработкой звуколокатора «Сфера» принципиально решена задача полной съемки недоступных и полудоступных очистных камер, возникает вопрос об использовании материалов звуколокационных съемок для прямого учета потерь и разубоживания. Действительно, в настоящее время на предприятиях цветной металлургии не существует прямого метода учета потерь и разубоживания при отработке недоступных очистных камер. Косвенные же методы, например учет фактического объема выпущенной руды или поданной в камеру закладки не могут дать требуемой информации о фактических параметрах камеры, потерях и разубоживании. Поэтому все работы по нарезке и отбойке камер ведутся только по проектным данным без знания действительных их параметров, без установления мест и объемов потерь полезного ископаемого, без выявления причин потерь и разубоживания. Фактически при камерных системах отработки имеют место потери отбитой и неотбитой руды, разубоживание от обрушения потолочины или пустых пород всяческого бока, а также при отбойке закладочного

материала от междукammerных целиков. Все эти виды потерь и разубоживания, как правило, остаются невыявленными, а их объемы определяются косвенными методами и зачастую констатируют лишь сам факт их наличия. Иногда часть фактических контуров устанавливается только при обработке соседних камер с помощью проведения дорогостоящих нарезных или разведочных выработок. Так, например, на Гайском ГОКе в настоящее время для уточнения положения закладки проходят на одну камеру до 24 разведочных скважин. На этом же руднике и на Текелийском комбинате имеют место случаи выхода проектных выработок в заложенное очистное пространство ранее отработанных камер. Очевидно, что подобное положение может быть изменено только при производстве периодических маркшейдерских съемок очистных камер. Съемка должна выполняться при отбойке панелей или слоев, при выпуске руды, перед закладкой камеры, при обработке междукammerного целика. В итоге при обработке одной камеры должно выполняться четыре-пять съемок.

Несомненно, что широкое внедрение в производство звуколокационной съемки и определение фактических параметров очистных камер на всех стадиях их отработки является экономически целесообразным, так как позволяет осуществить прямой учет потерь и разубоживания, а следовательно, и разработку научно и технически обоснованных методов борьбы с ними.

§ 9. СЪЕМКА ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ ЧЕРЕЗ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ БУРОВЫЕ СКВАЖИНЫ

Условия съемок и характеристика объектов. В последние годы в нефтедобывающей и газовой промышленности намечается дальнейший рост промышленной добычи высокооктанового конденсата. Для его хранения и технологической обработки требуются герметичные емкости весьма значительных размеров. Для этого используются сухие подземные полости, получаемые на большой глубине с помощью мощных кумулятивных взрывов. Измерение геометрических размеров этих полостей и определение их пространственного положения имеет актуальное значение для разработки методов их создания и контроля за их состоянием при эксплуатации.

Обычно подземные камеры, предназначенные для указанных целей, располагают на глубине до 1000 м, а их поперечный размер может достигать 100 м. Сообщение с поверхностью земли осуществляется через вертикальную буровую скважину диаметром 170—220 мм в свету. Скважина выходит в камеру примерно в ее центральной части. Атмосфера внутри камеры имеет повышенную температуру, влажность и примеси различных газов и токсических веществ.

Звуколокационная установка «Зонд». Для дистанционной маркшейдерской съемки этих камер в ЛГИ в течение 1967—1971 гг. была разработана звуколокационная установка «Зонд» (табл. 10). Схема съемки подземной камеры показана на рис. 45. Установка содержит скважинный снаряд, опускаемый в камеру на бронированном кабеле КТБ-6. Каротажная лебедка и электронная регистрирующая аппаратура располагаются в наземной станции, смонтированной на машине геофизической станции АЭКС-1500.

В наземную аппаратуру входят: пульт управления, самописец, электронно-лучевой осциллограф, блок питания, феррорезонансный стабилизатор сетевого напряжения. В скважинном снаряде находятся: оголовок,

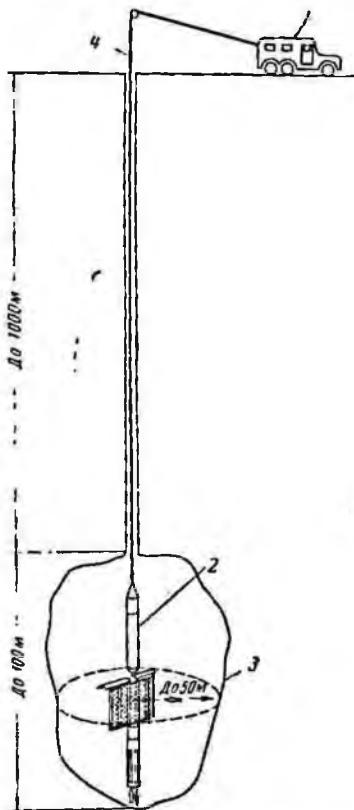


Рис. 45. Схема звуколокационной съемки подземной камеры прибором «Зонд»:

1 — каротажная станция с наземной аппаратурой; 2 — акустический снаряд; 3 — контур измеряемой полости; 4 — бронированный каротажный кабель

электронный и механический отсеки, измерительный вибратор, сигнальный отсек. Каротажная лебедка с кабелем входит в комплект станции АЭКС-1500.

При создании установки «Зонд» был выполнен обширный комплекс исследований и опытно-конструкторских работ, связанных с решением принципиальных вопросов, обусловленных специфическими особенностями объектов и физическими условиями их съемки.

Главным является вопрос выбора акустического преобразователя, обеспечивающего требуемую дальность действия локатора и соответствующую диаграмму направленности. Дальность действия задается возможными поперечными размерами объекта, а выбор углов диаграммы направленности преобразователя в горизонтальной и вертикальной плоскостях можно обосновать следующим образом. Поскольку пространственная конфигурация стенок измеряемых пустот заранее неизвестна, а также неизвестно направление и распределение возможных нарушений их поверхности (крупных трещин, расслоений, вывалов и т. п.), то с этой точки зрения необходимо обеспечить максимально острую симметричную характеристику направленности в обеих плоскостях. Однако удовлетворить оба эти требования оказывается невозможным при использовании обычных типов электроакустических преобразователей, так как их размеры по горизонтали строго ограничены наружным диаметром снаряда (около 130 мм). Устранить этот недостаток повышением рабочей частоты практически невозможно, так как при дальности действия локатор 40—50 м в подземных выработках верхним пределом даже для наиболее чувствительных электростатических преобразователей является частота, равная 18—20 кГц. Единственным решением этой задачи является применение складного преобразователя, составленного из нескольких шарнирно-соединенных плоских секций. Во время нахождения снаряда в скважине секции сложены и не выступают за его пределы. После выхода в подземную полость (камеру) их раскрывают до совмещения в вертикальной плоскости. В таком положении они образуют многосекционный плоский преобразователь, линейные размеры которых значительно превышают диаметр снаряда.

Другим важным моментом, возникающим при раз

работке аппаратуры для съемки через скважины глубоко расположенных пустот, является вопрос об устойчивости системы спуска снаряда. Поскольку глубина при съемке может достигать 1000 м и более, наиболее рациональной и производительной является система снаряда на каротажном кабеле, широко применяемая в промышленной геофизике. При этом во время спуско-подъемных операций происходит раскручивание (закручивание) кабеля. По этой причине при спуске или подъеме с одного уровня на другой снаряд неизбежно приобретает вращательное движение и после остановки на горизонте съемки совершает затухающие крутильные колебания около своего положения равновесия. Время затухания этих колебаний целиком определяется механическими параметрами системы, а также величиной интервала спуска (подъема), предшествовавшего остановке на данной глубине,

$$\Delta t_{y_{\max}} = \frac{T}{\alpha_1} \ln \frac{\theta_{уд} \Delta H}{\theta_{ор}}, \quad (52)$$

где $\Delta t_{y_{\max}}$ — максимальное время успокоения, с; T — период затухающих колебаний снаряда, с; α_1 — логарифмический декремент затухания; $\theta_{уд}$ — удельный угол, соответствующий максимально возможному углу закручивания кабеля в пределах упругой деформации на 1 м, рад; ΔH — интервал спуска (подъема), м; $\theta_{ор}$ — допустимая угловая погрешность ориентирования измеряемых сечений, рад.

Формула (52) устанавливает однозначную связь между допустимым интервалом съемки, точностью ориентирования и временем выдержки снаряда на данной высоте, по истечении которого снаряд можно считать неподвижным и производить обзор (запись) горизонтального сечения камеры. При выводе этой формулы предполагалось, что закручиванию подвергается лишь та часть кабеля, которая свободно свисает из скважины в камеру. Остальная (верхняя) часть кабеля касается стенок скважины и вследствие этого предполагается механически закрепленной, т. е. не участвующей в крутильных колебаниях системы.

Параметры α_1 и $\theta_{уд}$ определяют экспериментально для конкретного кабеля, на котором предполагается

спускать снаряды. Угол θ_{op} задается техническими условиями на съемку или определяется точностью ориентирного устройства в снаряде. Величина T зависит от условий работы и определяется длиной свободно висящего кабеля, крутильной жесткостью и осевым моментом инерции системы кабель—снаряд.

Для уменьшения времени успокоения в приборе «Зонд» используется бронированный коротажный кабель КТБ-6, обладающий высокой крутильной жесткостью.

На рис. 46 схематически показана компоновка основных элементов в скважинном снаряде прибора «Зонд». Кабель жестко связан с датчиком сигнала «Стоп», который может в некоторых пределах перемещаться относительно оголовка и корпуса снаряда под действием его веса. При свободном спуске датчик находится в выключенном состоянии. Если же во время спуска происходит остановка снаряда, связанная с его заклиниванием в узком сечении скважины или упором в дно камеры, сила давления на датчик со стороны снаряда уменьшается и происходит автоматическое срабатывание этого датчика, включающего аварийный сигнал «Стоп». В этом случае спуск немедленно прекращают.

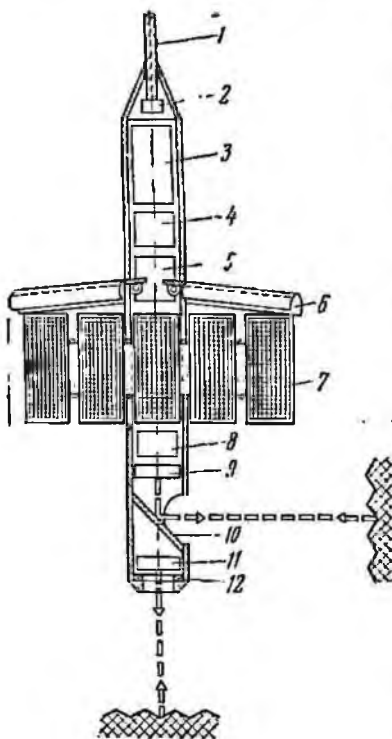


Рис. 46. Схема компоновки скважинного снаряда:

1 — коротажный кабель; 2 — датчик сигнала «Стоп»; 3 — электронный блок; 4 — механизм вращения; 5 — механизм раскрытия; 6 — защитные кожухи; 7 — секционированный измерительный вибратор; 8 — датчик азимута; 9 — скважинный сигнальный вибратор; 10 — плоский отражатель («зеркало»); 11 — донный сигнальный вибратор; 12 — датчики температуры

В верхней, неподвижной относительно кабеля части снаряда находятся электронный блок и механизм вращения. В нижней (вращающейся) части снаряда расположены: механизм раскрытия; защитные кожухи; секционный складной измерительный вибратор; магнитный датчик азимута; скважинный сигнальный вибратор; плоский отражатель, направляющий звуковой луч вибратора перпендикулярно оси спуска; донный сигнальный вибратор, контролирующий положение снаряда относительно дна камеры; датчики температуры, установленные по периметру выходного отверстия в донной части снаряда. Конструкция измерительного вибратора и остальных узлов снаряда обладает достаточно надежной работоспособностью в условиях повышенной влажности и токсичности в диапазоне температур от -30 до $+80^{\circ}\text{C}$.

Управление и контроль за работой скважинного снаряда осуществляются оператором наземного пульта управления и сводятся к следующим основным операциям — раскрытие и закрытие измерительного вибратора и защитных кожухов, съемка горизонтальных сечений, включение и выключение синхронного с самописцем вращения вибратора, фиксация положения снаряда в скважине и в момент выхода из нее в полость камеры, фиксация положения снаряда относительно дна камеры, азимутальная привязка измеряемых сечений, непрерывное измерение температуры окружающего воздуха внутри камеры в процессе ее съемки, предупреждение возможных аварий при спуске снаряда (заклинивание в скважине, посадка на дно камеры и т. п.). Дополнительные операции связаны с изменением длительности зондирующих импульсов, частоты их заполнения, включением принудительного обогрева измерительного вибратора при работе в зимних условиях, контролем за его температурой и т. п.

При движении по скважине измерительный вибратор находится в закрытом (сложенном) состоянии. Защитные кожухи предохраняют его от механических повреждений и предотвращают прямое попадание на его рабочие поверхности брызг и грязи со стенок скважины. После выхода снаряда в полость камеры измерительный вибратор раскрывают, приводя его в рабочее положение, как показано на рис. 46. При этом все секции уста-

навливаются в одной плоскости, образуя единый преобразователь большой площади, а кожухи располагаются над ними и защищают от капежа с потолочины камеры. В таком положении производится съемка горизонтальных сечений камеры. Ее методика аналогична методике съемки очистных камер прибором ЗПК-1. Основные особенности методики использования прибора «Зонд» изложены ниже.

Момент выхода снаряда из скважины в полость камеры определяют по сигналам скважинного сигнального вибратора на контрольном осциллографе. В этом месте фиксируют показание счетчика глубины спуска на каротажной лебедке и дальше спуск ведут ступенчато с остановками примерно через 2 м. Если расстояние между снарядом и ближайшей стенкой камеры оказывается не менее 1,5 м, раскрывают измерительный вибратор и дальнейшее измерение горизонтальных расстояний производят с его помощью, записывая их на самописце в нужном масштабе (1:200 или 1:500). Время записи одного замкнутого сечения (поворот на 360°) составляет, как и в предыдущих приборах, 6 мин. Вращение снаряда может быть прекращено в любой момент и при любом положении измерительного вибратора. Это необходимо для контроля за колебаниями свободно висящего снаряда.

За приближением снаряда ко дну камеры наблюдают по сигналам донного сигнального вибратора, поступающим на контрольный осциллограф. Спуск прекращают при нахождении снаряда на расстоянии 0,5—1 м от дна камеры.

При съемке горизонтальных сечений на каждой высотной отметке фиксируют показания электрического термометра, которые в дальнейшем используются для введения поправок в результат измерений за изменение скорости звука от температуры.

Ориентировку записываемых сечений производят с помощью магнитного датчика азимута (рис. 47). Магнитная стрелка свободно опирается на острие керна, закрепленного внутри герметичного корпуса. Внутренняя полость датчика заполнена демпфирующей жидкостью, например ПМС-100, имеющей интервал рабочих температур от -70 до $+200^{\circ}\text{C}$. На северном конце стрелки закреплен флажок из непрозрачного и немаг-

нитного материала. На верхней и нижней стенках корпуса имеются соосные отверстия, загерметизированные прозрачными стеклами. Над верхним окном располагается коллимированный источник света — лампа накаливания, под нижним окном установлено фотосопротивление (фоторезистор) ФСК, реагирующее на изменение интенсивности светового потока.

В корпусе снаряда датчик азимута устанавливается соосно с осью вращения снаряда. При медленном вра-

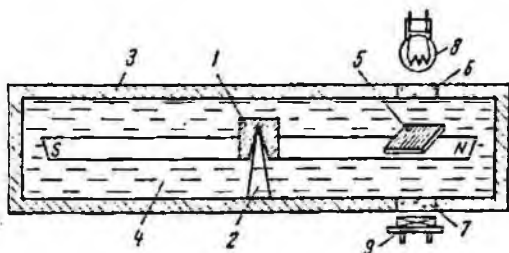


Рис. 47. Магнитный датчик азимута прибора «Зонд»:

1 — магнитная стрелка; 2 — кери; 3 — герметичный корпус; 4 — демпфирующая жидкость; 5 — экран (флажок); 6 и 7 — прозрачные стекла; 8 — источник света (лампа накаливания); 9 — фоторезистор

щении корпуса (угловая скорость равна 1° в секунду) магнитная стрелка остается неподвижной, располагаясь вдоль плоскости магнитного меридиана. В момент прохождения светового луча через северный конец стрелки в створе с окнами и оказывается флажок, перекрывающий этот луч. Освещенность фоторезистора резко уменьшается, вызывая соответствующее изменение величины его сопротивления. Это обеспечивает срабатывание исполнительной схемы в наземной аппаратуре, включающей световой транспарант «Азимут» и одновременно формирующей сигнал азимута на входе самолосца. В этот момент на эхограмме записываемого сечения появляется узкий выброс, который и указывает направление на север. Совмещая по этим выбросам горизонтальные сечения, полученные на различных уровнях по высоте камеры, можно построить ее объемную модель, достаточно сориентированную в пространстве.

Точность ориентировки горизонтальных сечений с помощью магнитного датчика составляет $\pm 3^\circ$.

Скважинный и донный сигнальные вибраторы имеют небольшую дальность действия (5—10 м) и широкий угол диаграммы направленности. Поэтому они служат для приближенного ($\pm 10\%$) измерения небольших расстояний путем визуальных отсчетов по экрану контрольного осциллографа. Основное их назначение — сигнализировать о положении снаряда относительно потолка и дна камеры.

Измерительный вибратор в скважинном снаряде прибора «Зонд» состоит из пяти секций, содержащих по пять одинаковых акустических элементов электростатического типа (см. рис. 37), настроенных на частоту 15 кГц и работающих в режиме излучения-приема. Эффективная площадь раскрытого вибратора составляет 1600 см², угол раствора основного лепестка диаграммы направленности в обеих плоскостях равен примерно $1,2^\circ$. При этом пятно облучения (см. рис. 16) на максимальном расстоянии локации 50 м имеет форму квадрата со стороной примерно 1,6 м и площадью примерно 2,6 м².

Экспериментальные исследования подтвердили расчеты по формуле (52) для кабеля КТБ-6 и показали, что при съемке горизонтальных сечений через 2 м по всей высоте камеры (100 м) максимальное время затухания крутильных колебаний составляет примерно 2 мин на последнем (нижнем) сечении и примерно 0,3 мин на первом (верхнем) сечении. Время съемки камеры занимает примерно 6,5 ч (запись каждого сечения происходит за 6 мин). Спуск и подъем снаряда по скважине на 1000 м занимают около 1 ч. С учетом времени на подготовку снаряда к спуску и демонтаж установки после окончания съемки полное время на съемку такой камеры составляет 9—10 ч.

Опытный образец прибора «Зонд» успешно прошел производственные испытания. Следует отметить, что его применение не ограничивается указанными выше объектами. «Зонд» может быть использован для съемки через вертикальные буровые скважины старых горных выработок, карстовых пустот, труднодоступных пещер и т. п.

В заключение необходимо отметить, что звуколокационная съемка является экономически целесообразным

и зачастую единственно возможным методом контроля недоступных горных выработок и подземных пустот. Несмотря на значительные трудности осуществления акустической локации в воздушной среде, тем не менее в настоящее время уже достигнуты определенные успехи в создании опытных образцов звуколокационной аппаратуры, имеющей промышленное значение (см. табл. 10). Дальнейшее развитие звуколокационной техники связано с решением таких проблем, как увеличение дальности действия, снижение размеров и веса аппаратуры, повышение точности измерений, использование электронно-вычислительных машин для обработки и хранения результатов звуколокационной съемки. Применение автоматических звуколокаторов в совокупности с ЭВМ представляется особенно перспективным при переходе горных предприятий на безлюдную систему подземной добычи полезных ископаемых. Кроме того, звуколокационные методы и приборы могут найти и находят применение в других областях техники, где необходимы автоматический контроль и измерение расстояний в газовых средах, например для контроля за степенью загрузки рудничных вагонеток, для измерения параметров морского волнения с борта движущегося судна, определения глубины буровых скважин и т. п.

Глава III

ЗВУКОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ РАССОЛАХ, ГЛИНИСТОЙ ПУЛЬПЕ И ДРУГИХ ЖИДКОСТЯХ

§ 10. СЪЕМКА КАМЕР ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СОЛИ ЧЕРЕЗ БУРОВЫЕ СКВАЖИНЫ С ПОВЕРХНОСТИ

Каменная соль (галит) широко представлена среди полезных ископаемых, связанных с галогенными формациями, таких как гипс, ангидрит, калийные соли, мирабилит и др. На территории СССР расположены многочисленные месторождения каменной соли, запасы которых, исчисляемые сотнями миллиардов тонн, практически неисчерпаемы. Каменная соль находит применение в пищевой промышленности, сельском хозяйстве и главным образом в химической промышленности, где она служит сырьем для получения соды, хлора, соляной кислоты, едкого натра и других химических соединений.

В настоящее время одним из основных методов добычи каменной соли является выщелачивание через буровые скважины с поверхности. Этим методом добывается более 70% каменной соли.

Задачи маркшейдерской съемки и физические условия измерений в камерах. Одной из основных и ответственных задач маркшейдерской службы является периодическое определение формы и размеров камер, образующихся при размыве соляного массива. От оперативности и точности определения этих показателей зависит эффективность управления процессом размыва соли и возможность формирования камер проектных размеров и конфигураций.

Задача определения формы и объема камер выщелачивания возникла одновременно с первыми попытками

установления теоретических закономерностей растворения соли через буровые скважины. В 1936 г. Е. Трим обосновал зависимость между эффективностью растворения соли и формой камеры. Одновременно им была предложена система размыва с гидроврубом и высказано предположение о цилиндрической форме гидроврубовой выработки.

В СССР первые исследования формообразования камер выщелачивания были проведены в 1936—1938 гг. на рассолопромысле Новый Карфаген инж. Л. А. Василенко на модели из глыбы каменной соли. Полученная им конусообразная форма камеры в 1940 г. была подтверждена широко поставленными опытами П. А. Кулле.

Указанные работы, позволившие представить процесс формообразования камер при различных системах размыва массива, не дали рекомендаций относительно приемлемых методов определения формы реально существующих камер. Наоборот, они показали, что сложность физико-химических закономерностей растворения соли и гидродинамических процессов в камерах, а также неоднородность массива и анизотропия соли не позволяют использовать теоретический способ определения формы камер на рассолопромыслах.

Попытки определения формы камер по эмпирическому значению линейной скорости растворения вертикальной поверхности соляного массива, а также по характеру и величине сдвижения поверхности не дали положительных результатов.

До разработки звуколокационного метода контроля и съемок горных выработок для определения объема камер применяли различные косвенные способы. Наибольшее распространение на отечественных рассолопромыслах получили способы, основанные на учете количества закачиваемой воды, отбираемого рассола и его концентрации, а также по закачке нерастворителя и намерению уровня нерастворитель — рассол. Ограниченно применялся способ равновесных давлений [16]. Основным недостатком этих способов определения объема являлось невозможность объективной оценки формы камеры, которая должна устанавливаться априорно. Именно это и послужило основной причиной поисков новых физических методов определения формы и размеров камер.

Чтобы установить запасы кондиционного рассола и

выбрать оптимальный режим размыва, необходимо иметь данные о распределении концентрации рассола по высоте камеры. В практике эти данные получают отбором проб рассола. Опробование обычно приурочивалось к ремонтным работам и производилось эпизодично.

Физические условия измерений в камерах характеризуются следующими показателями.

1. Глубина залегания камер, зависящая от глубины залегания соляных залежей, достигает в условиях отечественных рассолопромыслов 1500 м. Минимальная высота камеры при подготовительном размыве (гидровруб) составляет 3 м, а максимальная, зависящая от мощности разрабатываемой залежи, достигает примерно 700 м. Проектное значение радиусов горизонтальных сечений камер при существующей эксплуатационной сетке 200×200 м составляет 50 м. Фактические радиусы могут резко отличаться от проектных. Звуколокационные съемки камер показали, что нередко радиусы горизонтальных сечений доходят до 100 м и более (максимальный радиус камеры, зафиксированный съемкой, был равен 175 м).

2. Единственной горной выработкой, соединяющей камеру с поверхностью, является буровая скважина, проходимая конечным диаметром 10—12" и оборудованная системой эксплуатационных труб. На отечественных рассолопромыслах преимущественное распространение имеет трехтрубная конструкция скважин. Обсадная колонна труб диаметром 12" тампонируется подбашмачной заливкой цементного раствора. Она углубляется в соляную залежь на $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ часть ее мощности. Водопроводная колонна диаметром 8" свободно висит на устье обсадной колонны. Ее башмак, на уровне которого удерживается граница нерастворитель—рассол, определяет высоту ступени размыва. Рассолоподъемная колонна диаметром 5" опущена до забоя (дна камеры) и свободно висит, опираясь верхним концом на устье, а в нижней части центрируется башмаком водопроводной колонны. Межтрубное пространство (8—12") заполняется нерастворителем (нефть, воздух). Вода подается между колоннами диаметром 8 и 5", а рассол поднимается по колонне диаметром 5". По мере растворения соли нерастворитель подкачивается в скважину в таком количестве, чтобы между кровлей камеры и водой всегда

находился слой нерастворителя 3—4 см. Это предохраняет кровлю от растворения и объем камеры увеличивается только за счет растворения стенок.

Во время нормальной эксплуатации скважины закрыта оголовком и доступ в камеру невозможен. При необходимости спуска в камеру какой-либо аппаратуры оголовок должен быть демонтирован. При этом со скважины снимается давление и отбирается часть нерастворителя, т. е. эксплуатация скважины временно прекращается.

При бурении скважины возможны случаи искривления стволов, таким же искривлениям подвержены и колонны эксплуатационных труб. Анализ данных инклинометрической съемки стволов скважины показывает, что угол наклона скважины изменяется до 8—10°. Такие искривления нужно учитывать при проектировании жестких узлов аппаратуры, опускаемой в камеру.

3. Проектными формами камер vychelachивания являются правильный цилиндр (при ступенчатом гидроврубe) и сфера (при ступенчатом протн-вотоке). Однако влияние геологических факторов, нарушение технологии размыва и отсутствие действенного маркшейдерского контроля привели к наличию на рассолопромыслах большого числа камер, форма которых резко отличалась от проектной. Преобладающее большинство камер, по опыту рассолопромысла Стерлитамакского СЦК, помимо локальных отклонений от проекта имеет ярко выраженную асимметрию относительно колонн эксплуатационных труб. Форма отдельных камер совершенно не соответствует проектной. Примером этого может служить камера № 4 (Стерлитамакский СЦК), одно из горизонтальных сечений которой показано на рис. 48.

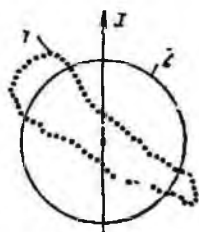


Рис. 48. Горизонтальное сечение камеры (Стерлитамакский СЦК):

1 — фактический контур;
2 — проектный контур

Поверхность стенок существующих камер может быть различно ориентирована относительно оси измерения и составлять иногда с ней весьма острые углы.

Стенки камер представляют собой поверхность естественного массива с коэффициентом твердости 2 и плотностью 2,1—2,2 т/м³.

4. Камеры выщелачивания заполнены рассолом, концентрация которого изменяется по высоте камеры от 0 (у потолочины) до 318 г/л (в донной части). Распределение концентрации соли в рассоле по высоте камеры подчиняется экспоненциальному закону. Концентрация в пределах отдельных горизонтальных сечений, по данным П. А. Кулле [30], практически одинакова. Помимо основной хлорнатриевой составляющей в рассоле имеются ионы кальция, калия, магния и серноокислого остатка. Их количество обычно незначительно. По данным ВНИИГ, содержание каждого из них в весовых единицах не превышает 1%. Однако и такое незначительное содержание примесей в рассоле оказывает влияние на распространение в нем звука, ограничивая дальность действия звуколокационной аппаратуры.

Среднее значение плотности кондиционного рассола ($305 \leq K_{\text{плс}} \leq 318$) 1,2 г/см³, благодаря чему в данной части камеры измерительная аппаратура и оборудование подвергаются гидростатическому давлению 100—150 кгс/см².

5. Температурный режим камер выщелачивания в основном определяется температурой воды, подаваемой в камеру из естественных водоемов. Возможные колебания температуры рассола в камерах, находящихся в различных климатических зонах и расположенных на глубине от 100 до 1500 м, по данным практики, не выходят из пределов 2—25°С. Температура рассола в камерах, имеющих значительный объем, заметно не изменяется. Исключение составляет верхняя часть камеры в районе потолочины, где температурный градиент следует учитывать при характеристике температурного режима камеры. В количественном отношении зафиксированы перепады температуры рассола в камере до 3°С.

Необходимую и достаточную точность измерений в камерах можно установить с учетом производственного допуска на определении объема горных выработок, равного $\pm 5\%$ V_k [15, 17].

С точки зрения съемочных работ определение объема камеры можно представить как трехмерную задачу, решение которой описывается уравнением $V_k = HS_1$ (рис. 49).

Относительная ошибка объема камеры

$$m_V^2 = m_H^2 + m_S^2. \quad (53)$$

Измерения, связанные с определением высоты камеры H или составляющих ее расстояний, при физических способах съемки камер могут быть осуществлены с помощью механических или сельсинных счетчиков каротажной лебедки и контролироваться методом магнитных меток. Практика геофизических работ показывает, что измерение расстояний по скважинам этими способами осуществляется (для данных глубин) с ошибками, не превышающими $\pm 0,1\% H$. В камерах выщелачивания измерение величины H несколько упрощается наличием жестко закрепленной точки 1 (см. рис. 49), расстояние до которой от устья скважины известно (при монтаже измеряются трубы от устья до башмака водопроводной колонны). Многократные измерения величины H в камерах Ишимбайского месторождения каменной соли также показали, что ошибка определения H не выходит за пределы $\pm 0,1\% H$ (максимальное отклонение в серии оказалось равным $0,4\% H_{\text{ср}}$).

Ошибка при определении площади горизонтального сечения камеры m_s , зависит от ошибок при измерении радиусов горизонтального сечения m_r , как ошибка функции

$$S_1 = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r_i^2 d\varphi. \quad (54)$$

Если заменить S_1 равновеликим кругом, т. е. принять, что $S_1 = S_2$, то, очевидно, что R будет равно $r_{\text{ср}}$ (в пределах от $\varphi = 0$ до $\varphi = 2\pi$).

Относительная ошибка объема камеры при этом с учетом (53)

$$m_V^2 = m_H^2 + 4m_R^2. \quad (55)$$

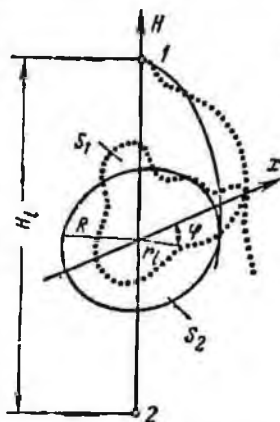


Рис. 49. К вычислению допустимой ошибки измерения в камерах выщелачивания:

1 — башмак водопроводной колонны труб; 2 — дна камеры; S_1 — площадь горизонтального сечения камеры; S_2 — площадь равновеликого круга

Учитывая допустимую ошибку при определении объема камеры и малую ошибку величины H , нетрудно вычислить допустимую ошибку измерения радиусов горизонтальных сечений камер выщелачивания, которая находится в пределах $\pm 2,0 \div 2,5\%$.

Приняв продольные и поперечные ошибки при измерении радиусов одинаковыми, вычисляем допустимую ошибку ориентирования горизонтальных сечений камер, которая не должна превышать

$$m_0 = \frac{m_R}{R} \rho = \frac{1,25 \cdot 57,3}{50} = \pm 1^\circ 26'.$$

Установленная точность измерения радиусов горизонтальных сечений камер и их ориентирования позволяет также успешно решать задачи, связанные с контролем формы камеры и составлением плана горных выработок рассолопромысла. В первом случае в связи с приближенностью технологических расчетов более высокая точность измерения не оправдана. Во втором — ошибки съемочных работ, связанных с привязкой физических измерений в камерах, значительно превышают установленные нормы ошибок измерения и ориентирования радиусов камер и определяют погрешность плана горных выработок рассолопромысла.

Организация исследований по разработке звуколокационной станции «Луч». К началу разработки звуколокационной станции «Луч» приборы подобного назначения в отечественной практике не применялись. В 1956—1958 гг. во ВНИИГе велась разработка гидролокатора «Соль», предназначенного для съемки камер выщелачивания каменной соли. В 1957 г. авторами разработки был выполнен эскизный проект гидролокатора. В практике он реализован не был. В 1958 г. исследования в области звуколокационной съемки камер выщелачивания во ВНИИГе были прекращены, а другие организации, занимающиеся этой проблемой в последующие годы, вели самостоятельные разработки.

В 1957—1959 гг. в периодической печати США появились сообщения [52—54] о создании и последующей эксплуатации звуколокатора «Нутромер», предназначенного для определения формы и размеров подземных хранилищ нефтепродуктов и сжиженных углеводород-

ных газов, сооружаемых в массиве каменной соли методом выщелачивания через буровые скважины.

«Нутромер» представляет собой импульсную звуколокационную систему. Комплект аппаратуры состоит из двух основных частей: скважинного снаряда и наземной станции, смонтированной на передвижной тележке. В скважинном снаряде размещены акустическая система, механизм вращения акустической системы, ориентирное устройство и электронные блоки. В наземной станции смонтированы пульт управления и регистратор с фотоприставкой. Механическая и электрическая связь между наземной станцией и скважинным снарядом осуществляется каротажным кабелем.

Примерная схема звуколокационной съемки камеры звуколокатором «Нутромер» может быть представлена следующим образом. В камере, с предварительно поднятой до потолочины колонной труб, отбираются желонкой пробы рассола для определения концентрации его и скорости распространения звука в точках наблюдений. Одновременно с отбором проб необходимо определять температуру рассола в местах отбора проб, так как скорость звука зависит не только от концентрации рассола, но и от его температуры. После отбора проб в камеру опускают скважинный снаряд. На всех проектируемых горизонтах съемки (в точках отбора проб рассола) он останавливается и производится звуколокационный обзор стенок камеры. В это время на осциллограмме фиксируется масштабированный контур горизонтального сечения камеры. При камеральной обработке осциллограмма должна быть исправлена за счет разницы фактической и приборной скорости звука в среде локации. Для ориентирования снимаемых сечений в звуколокаторе «Нутромер» использован магнитный датчик с фотоэлектрической фиксацией магнитного меридиана. На рис. 50 показан образец осциллограммы, снимаемой с звуколокатора «Нутромер», на которой виден контур горизонтального сечения камеры и отметка положения магнитного меридиана точки наблюдений (радиальная прямая).

Параметры аппаратуры: глубина действия 600 м, дальность действия (в чистой воде) 150 м, ошибка измерения $\pm 5\%$.

В 1961 г. были начаты исследования, включающие

изучение физических условий измерений в камерах для определения электроакустических параметров аппаратуры и выбора оптимальной конструкции основных узлов и блоков станции. Работы проводились в лаборатории электроакустики ЛПИ, на Соль-Илецком руднике и в камерах выщелачивания Стерлитамакского СЦК, для которого и разрабатывался звуколокатор «Луч». Было

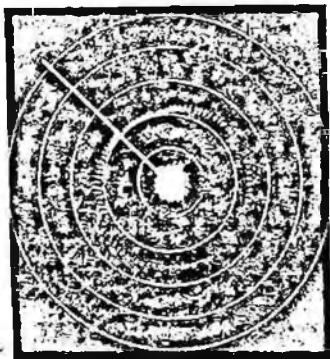


Рис. 50. Осциллограмма,
снятая звуколокатором
«Нутромер»

исследовано затухание звука при распространении в рассолах различной концентрации и состава, а также характер отражений звука от стенок камеры. Исследования проводили преобразователями с диапазоном частот от 180 до 1000 кГц. Эти исследования позволили установить оптимальные рабочие частоты преобразователей звуколокатора (400—700 кГц).

Использование каротажного кабеля для подвеса скважинной аппаратуры потребовало исследований передачи высокочастотных сигналов,

которые не применяются в практике каротажных работ. Результаты этих исследований послужили основой при проектировании электронных блоков аппаратуры.

Разработка аппаратуры для съемки недоступных выработок (проверить результаты съемки камеры выщелачивания нельзя) определила необходимость проведения специальных исследований ошибок звуколокационных измерений. Для установления структурных характеристик погрешностей измерений, их возможных величин и влияния на результаты съемки были проведены специальные лабораторные и производственные эксперименты. В производственных условиях исследовались ошибки ориентирования снимаемых сечений камер. Эти работы дали возможность установить в камерах выщелачивания зону недостоверных магнитных измерений.

В 1963 г. основные работы были окончены. «Луч» прошел производственные испытания и с начала 1964 г.

находится в эксплуатации на рассолопромысле Стерлитамакского СЦК.

Звуколокационная станция «Луч» смонтирована на машине АЭКС-1500. При этом геофизическая аппаратура станции оставлена без изменений и может быть использована по прямому назначению. «Луч» состоит из двух основных частей: скважинного снаряда и приборной стойки. Связь скважинного снаряда с наземной аппаратурой, размещенной в приборной стойке, осуществляется по трехжильному кабелю КТО-4, служащему одновременно и подвесом для снаряда. Спуск снаряда в камеру производится через блок-баланс, устанавливаемый на устье скважины. На блок-балансе имеется механический счетчик глубин и сельсинный датчик, показания которого передаются на репитер указателя глубин в приборной стойке. Коллектор на коротажной лебедке обеспечивает непрерывность электрической связи снаряда с наземной аппаратурой во время спуско-подъемных операций.

Блок-схема локатора «Луч» приведена на рис. 51. Скважинный снаряд не имеет автономного источника энергии. Блок питания в снаряде только преобразует подаваемый по кабелю с поверхности ток промышленной частоты в токи тех видов и напряжений, которые требуются для электронных блоков. Частота повторения, длительность и несущая частота излучаемых импульсов задаются генератором скважинного снаряда. Электрические импульсы с генератора подаются на излучающий преобразователь акустической системы.

Акустическая система «Луча» (рис. 52) состоит из двух приемопередатчиков: обзорного 1 и калпбраторного 2. Каждый приемопередатчик, в свою очередь, состоит из двух пластин пьезокерамики ЦТС-19, склеенных между собой эпоксидным компаундом. С задней стороны излучатель экранирован слоем отражающей акустической резины. В режимах излучения и приема пакет пластин колеблется как единое целое, но одна из пластин подключена к генератору, а другая — к приемному усилителю снаряда. Такой способ включения обеспечивает разделение каналов излучения и приема без коммутации.

От преобразователей во внешнюю среду и обратно ультразвуковые колебания распространяются через обо-

лочку из органического стекла и заполняющий ее глицерином. Выбор этих материалов не случаен. Величина их акустического сопротивления хорошо согласуется между

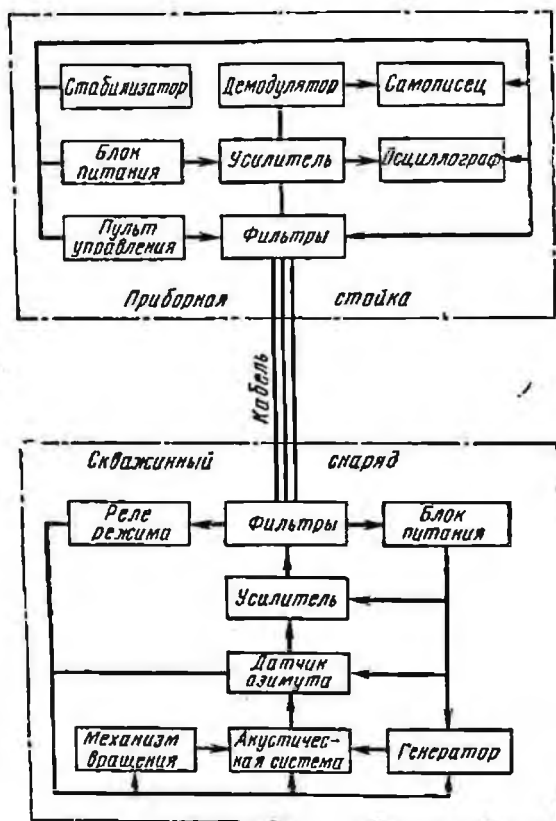


Рис. 51. Блок-схема звуколокатора «Луч»

собой и с акустическим сопротивлением рассола в камерах. Поэтому звуковая энергия передается сквозь оболочку с малыми потерями и минимальным искажением диаграммы направленности преобразователей. Обойма акустической системы, в которой закреплены оба приемо-излучателя, приводится во вращение синхронным двига-

телем ДСМ-2 с дополнительным редуктором. Электрическая связь подвижной части с неподвижными блоками снаряда осуществляется через малошумный тросовый коллектор. Благодаря вращению акустической системы обзорный преобразователь, посылающий сигналы в горизонтальном направлении, измеряет радиусы горизон-

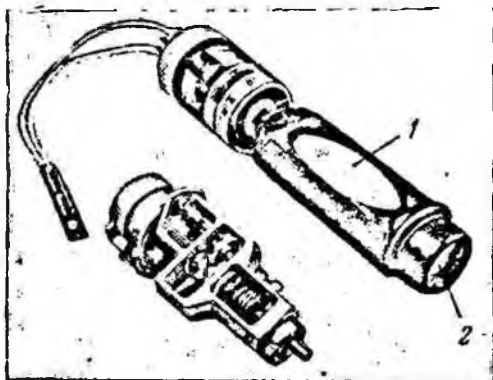


Рис. 52. Акустическая система с механизмом вращения

тального сечения камеры на том уровне, где находится скважинный снаряд.

Пластины обзорного преобразователя имеют эллиптическую форму, которая диктуется условиями съемки. Вследствие значительных флуктуаций отраженного сигнала в камерах выщелачивания прямоугольный преобразователь не обеспечивает однозначности измерений: слишком высок уровень боковых лепестков его диаграммы направленности. Предъявляемым требованиям отвечают эллипс и круг. Эллипс при съемке камер имеет то преимущество, что благодаря разным размерам осей можно получить большую направленность в вертикальной плоскости независимо от того, что размер в горизонтальной плоскости ограничен диаметром скважинного снаряда.

Пластины калибраторного преобразователя имеют круглую форму, определяемую конструктивными сообра-

жениями. Направленность его не имеет столь существенного значения как у обзорного преобразователя. Принцип калибровки заключается в следующем. Излучение калибраторного преобразователя направлено вниз по оси снаряда. Посланный импульс проходит через дно обло- чочки акустической системы и распространяется во внутренней полости калибраторной трубы. На нижнем конце ее имеется кольцо, от которого происходит отра- жение звука. Полость трубы благодаря прорезам в стен- ках всегда заполнена рассолом того горизонта, где на- ходится скважинный снаряд. Поэтому время распростра- нения сигнала в калибраторной трубе позволяет изме- рять скорость звука в точке съемки. Часть звуковой энергии, которая проходит в отверстие кольца, отра- жается от дна камеры и этот сигнал используется для контроля за положением снаряда относительно дна.

Переключение приемоизлучающих преобразователей при изменении рода работы — с калибровки на обзор и обратно — осуществляется контактами электромагнит- ного реле (реле режима). Питание на реле подается по кабелю непосредственно с пульта управления приборной стойки. Таким образом, оператор станции может дать команду изменения рода работы в любой момент съемки. Одновременно с переключением приемоизлучающих пре- образователей реле режима меняет длительность им- пульса на генераторе. При калибровке используются короткие импульсы длительностью $0,1 \cdot 10^{-3}$ с, а для из- менения радиусов камер длительность посылки увели- чивается до $2 \cdot 10^{-3}$ с.

Принимаемые сигналы поступают на усилитель сква- жинного снаряда и передаются по кабелю в наземную часть. Оконечный каскад усилителя используется также для передачи сигналов синхронизации в моменты по-сылки зондирующих импульсов. На каждом цикле посылки в усилителе скважинного снаряда автоматич- ески осуществляется динамическая регулировка усиле- ния. Настройка динамической регулировки в звуколока- торе «Луч» постоянна, поскольку затухание звука в камерах выщелачивания меняется мало.

В наземной части станции сигналы, передаваемые из скважинного снаряда, еще раз усиливаются (для того, чтобы компенсировать их затухание в кабеле) и посту- пают на осциллограф и демодулятор, а с демодуля-

тора — на самописец. Осциллограф служит главным образом для визуального контроля за работой локатора, но может быть использован и в режиме автоматической фоторегистрации. Для этого он снабжен фотопроставкой.

Перьевой самописец «Луча» независимо от осциллографа фиксирует результаты измерений скорости звука (при калибровке) и радиусов снимаемых горизонтальных сечений. Диаметр рабочего поля на бланке самописца составляет 300 мм. Переключение масштабов позволяет производить на этом бланке запись контуров сечений в любом из четырех установленных масштабов (1:100, 1:200, 1:500 и 1:1000) и, кроме того, в масштабе калибровочной шкалы, имеющей градуировку по значению скорости распространения звука и соответствующей плотности рассола. Для каждого сечения съемки в самописец устанавливается новый бланк. Масштаб записи отмечается на бланке вручную.

Положение дна камеры самописцем во время калибровки не фиксируется, так как он может одновременно регистрировать только один сигнал. Отсчет расстояний до дна производится по шкале осциллографа.

Ориентация снимаемых сечений осуществляется следующим образом. Бланк самописца вращается синхронно с акустической системой в скважинном снаряде. В тот момент, когда ось излучения обзорного преобразователя проходит через направление магнитного севера, в снаряде срабатывает фотоэлектрическое реле магнитного датчика и в наземную часть посылается сигнал постоянного тока. Этот сигнал вызывает включение печатного механизма, который наносит на бланке самописца марку севера.

Самописец «Луча» выполнен на базе серийного электронного потенциометра ЭПД, в конструкцию которого внесены необходимые изменения. Чтобы запись контуров сечений выполнялась в системе полярных координат, рычажной привод пера заменен кареткой, движущейся по прямолинейной направляющей. Взамен центрирующего фланца потенциометра для крепления диаграммных бланков сделана планшайба с кассетой, допускающей одновременную закладку пяти—семи бланков. На лицевой панели самописца установлен печатающий механизм отметчика азимута.

Конструкция скважинного снаряда «Луч» схематически показана на рис. 53. Корпус 1, рассчитанный на гидростатическое давление до 150 кгс/см^2 , изготовлен из дюралюминиевых сплавов. Внутри его размещены электронно-ламповые блоки и двигатель 2 с редуктором, приводящий во вращение акустическую систему 3. Оболочка 4 акустической системы, выполненная из органического стекла, выдерживает, как и металлический корпус, давление до 150 кгс/см^2 . В верхней части заполненной глицерином оболочки помещен магнитный датчик ориентирного устройства. К нижнему концу оболочки крепится калибраторная труба 5. Герметизация наружного корпуса в местах соединения деталей осуществляется резиновыми кольцами 6. Для механического крепления и электрического ввода жил кабеля в оголовке снаряда имеется свечной мост 7 и 8.

Техническая характеристика станции «Луч»

Диаметр скважинного снаряда, мм	112
Высота, мм	2300
Масса, кг	26
Максимальная глубина съемки, м	1500
Диапазон измеряемых расстояний, м	0,5—200
Масштабы записи на самописце	1:100; 1:200; 1:500; 1:1000
Точность измерения, %:	
расстояний фиксируемых на самописце	± 2
расстояний, фиксируемых на осциллографе	± 5
скорости распространения звука	± 15
Точность измерения плотности рассола, г/см^3	$\pm 0,015$
Точность ориентации сечений при условии, что скважинный снаряд находится не менее чем на 3 м от башмака колонны труб, градусов	2
Время записи одного горизонтального сечения, мин	6
Несущая частота ультразвуковых импульсов, кГц	380
Угол $\gamma_{0,7}$ диаграммы направленности, градусов:	
в горизонтальной плоскости	4
в вертикальной плоскости	1,5

Съемка. Все работы по подготовке камеры к измерениям (отбор нерастворителя, разгерметизация камеры, демонтаж оголовка скважины, подъем или извлечение рассолоподъемной колонны труб) выполняются ремонтной службой рассолопромысла. Группа обслуживания станции производит шаблонирование колонны своими силами или участвует в этой операции совместно с ремонтной бригадой. В комплекте станции

имеется стальной шаблон, повторяющий форму и размеры скважинного снаряда. Шаблонирование проводится последовательными спусками и подъемами шаблона на тросе от устья скважины до дна камеры. Особенно тщательно проверяется вход шаблона из свободной камеры в колонну труб, так как именно в этой точке наиболее вероятен обрыв скважинного снаряда.

Подготовка к съемке завершается вывешиванием каротажного кабеля. Для этого скважинный снаряд опускают в район дна камеры и оставляют в этом положении на время естественного раскручивания каротажного кабеля. При глубине камеры 1000 м время раскручивания кабеля КТО-4 составляет от 0,5 до 1,5 ч.

Собственно съемка камеры включает три вида измерений: глубины спуска скважинного снаряда (акустической системы) от начального уровня съемки до точки наблюдения, скорости распространения звука на уровне точки наблюдения и радиусов горизонтального сечения камеры. Схема съемки камеры показана на рис. 54.

Измерение глубины спуска скважинного снаряда фиксируется механическим счетчиком блок-баланса и дублируется сельсинным датчиком, репитер которого установлен в приборном отсеке станции. Отсчеты глубины берутся до 0,1 м. Измерения могут контролироваться счетчиком магнитных меток на приборной стойке. Начало отсчета устанавливается на счетчиках при вывешивании скважинного снаряда на блок-

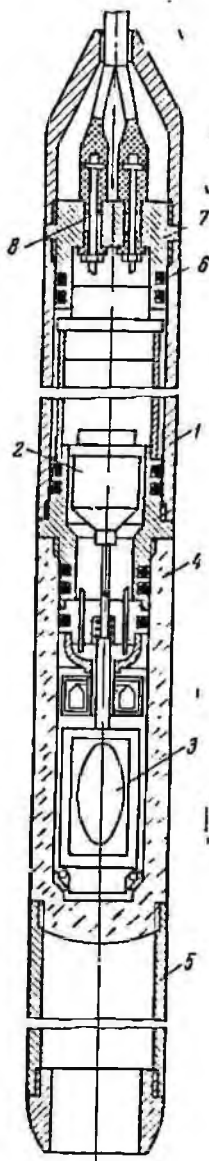


Рис. 53. Схематический разрез скважинного снаряда

балансе. Для повышения точности измерения глубин точек наблюдений производится их дополнительная высотная привязка к башмаку водопроводной колонны труб. Для этого при спуске скважинного снаряда по колонне

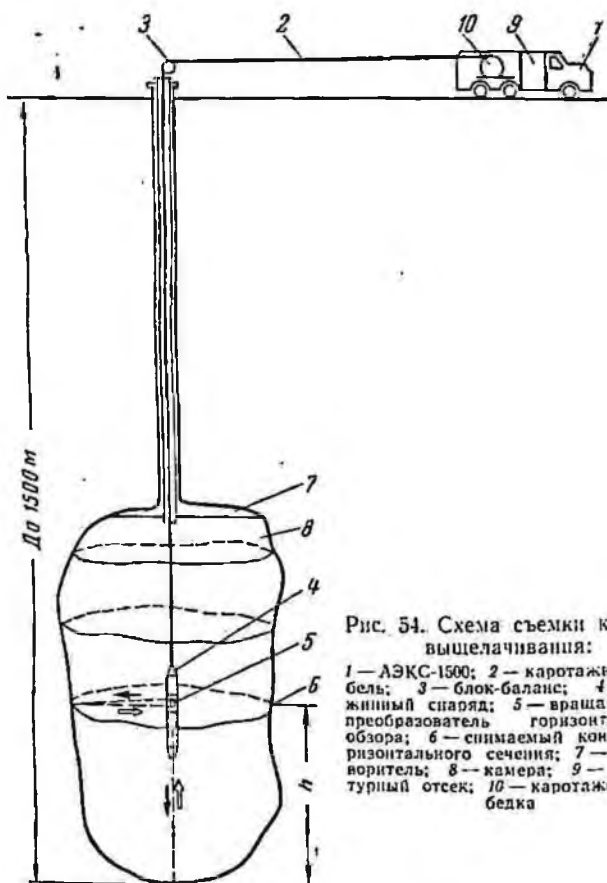


Рис. 54. Схема съемки камеры выщелачивания:

1 — АЭКС-1500; 2 — каротажный кабель; 3 — блок-баланс; 4 — скважинный снаряд; 5 — вращающийся преобразователь горизонтального обзора; 6 — снимаемый контур горизонтального сечения; 7 — пераставоритель; 8 — камера; 9 — аппаратурный отсек; 10 — каротажная лебедка

включают режим «обзор» и на экране осциллографического регистратора наблюдают момент появления импульса, отраженного от стенки камеры. Появление импульса означает, что акустическая система вышла из колонны в свободную камеру. Показания репитера счет-

чика глубины корректируют вручную в соответствии с известной глубиной расположения башмака водопроводной колонны. При подъеме скважинного снаряда, наоборот, момент исчезновения импульса, отраженного от стенки камеры, означает, что акустическая система вошла в колонну. Отсчет по счетчику глубины в этот момент должен вновь соответствовать глубине башмака водопроводной колонны. Величина поправки не должна превышать допустимой ошибки измерения глубины точек наблюдений.

Для определения плотности рассола и скорости распространения звука на уровне точки наблюдений включают режим «калибровка». Результаты измерений фиксируются на диаграммном бланке автоматического самописца линией записи на шкале калибровочных коэффициентов. Запись продолжают до получения замкнутого круга с целью исключения ошибок эксцентриситета установки диаграммного бланка на планшайбе самописца. Обязательным условием правильной калибровки является постоянство уровня калибровочного сигнала с тем, чтобы уменьшить случайную составляющую ошибки фиксации. Для соблюдения этого условия необходимо контролировать крутизну фронта калибровочного сигнала на экране осциллографа.

Для измерения радиусов горизонтальных сечений камеры звуколокационную станцию переключают на режим «обзор». Результаты измерений фиксируются на диаграммном бланке автоматического самописца в виде масштабированного контура горизонтального сечения камеры, ориентированного относительно магнитного меридиана. Запись контура сечения начинают после успокоения скважинного снаряда в точке наблюдений. Время успокоения при интервале между точками наблюдений 5—10 м имеет следующие значения:

Глубина точки наблюдения, м	300	600	1000
Время успокоения, с	70	95	125

Контролем успокоения скважинного снаряда может служить совпадение записи повторного обзора стенок камеры. В соответствии с этим запись следует выключать не по окончании одного полного оборота диаграммного бланка, а несколько позже. При съемке контуров горизонтальных сечений камеры необходим подбор оптимального коэффициента усиления. Он заключается в том,

что оператор, наблюдая за уровнем сигнала на экране осциллографа, увеличивает усиление в случае потерь сигнала на время более 1—2 с. Если потерь сигнала не наблюдается, усиление необходимо уменьшить до минимума. Это позволяет уменьшить проявление ошибок звуколокационной аналогии [3, 17].

При выполнении съемок камер возможны два варианта последовательности измерительных операций. В первом начальной операцией является определение плотности рассола по всей высоте камеры. Результаты этих измерений служат основанием для построения скоростного разреза, по которому выделяются зоны повышенной рефракции и уточняются уровни точек наблюдений. Во втором варианте калибровочные измерения выполняются на каждой точке наблюдения непосредственно перед съемкой сечения камеры.

Звуколокационную станцию «Луч» разрабатывали для съемки камер выщелачивания соли вне колонны эксплуатационных труб. Однако опытная эксплуатация станции доказала ее работоспособность и в более сложных условиях: через колонну стальных эксплуатационных труб и при заполнении камеры (частично или полностью) не рассолом, а нефтепродуктами. Это обстоятельство позволяет использовать станцию для измерений в стволе скважины, а также для контроля за положением потолочины в камерах выщелачивания и съемки подземных хранилищ нефтепродуктов.

Съемка камеры через колонну эксплуатационных труб осуществляется приблизительно без калибровочных измерений, так как ствол рассолоподъемной колонны заполнен рассолом из донной части камеры и его плотность отличается от плотности рассола в камере на уровнях точек наблюдений. Несмотря на резкое снижение уровня (20—30 дБ) отраженных сигналов при измерениях через стальную колонну, большой запас чувствительности аппаратуры позволяет регистрировать результаты автоматическим самописцем. Если самописец использовать нельзя, регистрацию результатов можно осуществлять визуально по экрану осциллографа, записывая в полевой журнал средние значения наблюдаемых расстояний через 10° углового сдвига планшайбы, что соответствует 10-секундному отрезку времени. Учитывая, что показания ориентирного устройства при работе сква-

жигинного снаряда внутри стальной колонны недостоверны, нужно использовать любую возможность ориентировать снимаемые сечения. Часто удается немного поднять колонну (на 5—10 м). Это нужно обязательно использовать для полноценной съемки в свободной камере хотя бы одного-двух сечений. Тогда вышележащие сечения можно приближенно ориентировать по характерным элементам их контура.

При съемке хранилищ нефтепродуктов через колонну труб необходимо определение уровня границы рассол—продукт. Решение этой задачи возможно при движении скважинного снаряда по колонне и наблюдении на экране осциллографа за изменением расстояний до стенки камеры. На границе рассол—продукт наблюдается резкий скачок измеряемого расстояния, соответствующий разности скоростей распространения звука в рассоле и продукте.

В практике эта разность составляет не менее 20% с и скачок определяемого расстояния проявляется достаточно резко. Для более точной оценки ожидаемого скачка и возможности масштабирования эхограмм той части камеры, которая заполнена продуктом, в лабораторных условиях, производят калибровочные измерения в продукте. Измерения в хранилищах нефтепродуктов имеют большое практическое значение, так как они являются пока единственным прямым методом контроля за состоянием емкости хранилища и объема продукта.

«Луч» может быть использован также для съемки ствола скважины и определения уровня потолочины камеры. Эта задача имеет важное технологическое значение, так как определяет процент потерь соли в недрах и экономическую рентабельность принятого способа постоянной выщелачивания. Съемка камер на Яр-Бишкарском месторождении показала, что имеют место случаи размыва потолочины (была зафиксирована потеря потолочины до 100 м) и, следовательно, периодический контроль за их положением необходим. При производстве съемки ствола скважины измеряемое расстояние мало и отраженный рабочий импульс на регистраторе может сливаться с импульсом синхронизации. Нулевой и отраженный импульсы отличаются по уровню, и на экране осциллографа формируется сложный ступенчатый импульс. Длина ступеньки, масштабированная по

меткам времени, соответствует расстоянию до стенки ствола.

Камеральные работы. Основным документом, характеризующим результаты звуколокационной съемки камер выщелачивания, является комплект эхограмм автоматического самописца. Он сопровождается полевым журналом оператора и фотокопиями осциллограмм, выполненных на отдельных точках наблюдений.

В силу технических особенностей звуколокационной аппаратуры и разнообразия физических условий локации запись контуров горизонтальных сечений камер на эхограммах бывает искажена. Одни искажения имеют функциональный характер и их появление можно предвидеть (рефракционные искажения, ошибки звуколокационной аналогии, масштабные искажения, ошибки ориентирования в зонах влияния магнитных масс), другие — случайны и возникают совершенно неожиданно (потеря отраженного сигнала, запись паразитных сигналов от боковых лепестков диаграммы направленности, запись объектов, расположенных вне горизонта съемки). Эти искажения записи должны быть исправлены или вычислены нужные коэффициенты для получения исправленных показателей, снимаемых с эхограмм.

Случайные искаженные записи контура горизонтального сечения камеры на эхограмме фиксируются оператором во время съемки: в период камеральных работ дополнительно расшифровываются отдельные участки контура сравнением с осциллограммами тех же горизонтальных сечений камеры.

На рис. 55 показан пример исправления записи контура камеры по осциллограмме.

Введение поправок из-за ошибок звуколокационной аналогии производится графическим методом [3, 12]. Для этого используется прозрачная палетка с углом раствора $\varphi_0 = 6^\circ 30'$. Как показано на рис. 56, центр палетки закрепляется иглой в центре эхограммы. При вращении палетки ее осевая линия, моделирующая ось излучения, последовательно пересекает запись контура камеры. Все характерные точки пересечения (точки изменения угла встречи записи с осью палетки) сносятся по соответствующим дугам к краевой линии палетки. Перестроенные точки контура соединяют плавной кривой.

Ориентирная поправка позволяет привести ориентирные углы снимаемых радиусов горизонтального сечения камеры к единой прямоугольной системе координат. На эхограмме автоматического самописца имеется след печатного устройства (рис. 57), срабатывающего в момент совмещения оси излучения обзорного преобразователя с плоскостью компасного меридиана магнитного

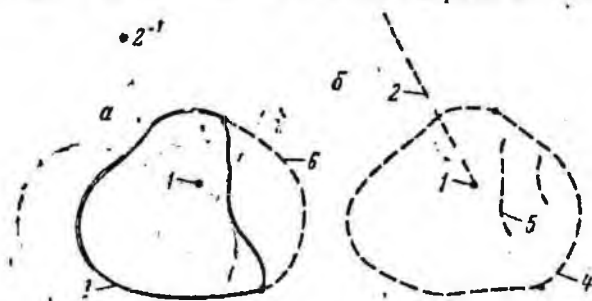


Рис. 55. Исправление записи на эхограмме по осциллограмме:

а — эхограмма; б — осциллограмма; 1 — положение акустической системы; 2 — отметка магнитного (компасного) меридиана; 3 — контур сечения камеры на эхограмме; 4 — то же, на осциллограмме; 5 — выступ нотолочки, зафиксированный на осциллограмме; 6 — исправленный участок контура камеры

датчика. Линия, соединяющая центр эхограммы со штрихом (следом) печатного устройства, представляет собой горизонтальную проекцию компасного меридиана M_0 точки наблюдения. Компасный меридиан составляет с осью x прямоугольной системы координат угол β , являющийся ориентирной поправкой на данной точке наблюдения. Угол β определяется из равенства

$$\beta = \xi + \delta + \gamma, \quad (56)$$

где ξ — компасная поправка магнитного датчика; δ — магнитное склонение в точке наблюдений; γ — сближение меридианов в точке наблюдений.

Компасная поправка определяется в полигонных условиях для каждого магнитного датчика. Углы δ и γ можно определить по крупномасштабным топографическим картам района наблюдений.

Учет и исправление рефракционных искажений в общем виде представляет собой весьма сложную задачу,

трудноосуществимую в условиях рассолопромыслов. При съемке камер выщелачивания рекомендуется упрощенная методика расчета [12, 13], дающая возможность достаточно надежно учитывать рефракционные искажения результатов съемки. По этой методике принято раз-

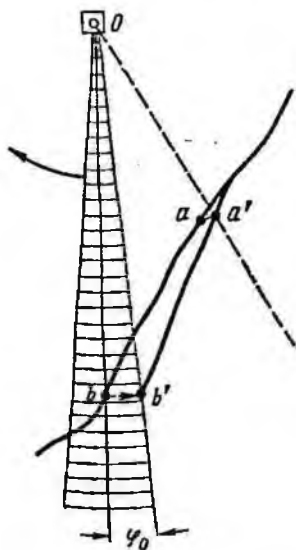


Рис. 56. Введение поправок из-за ошибок звукокационной аналогии

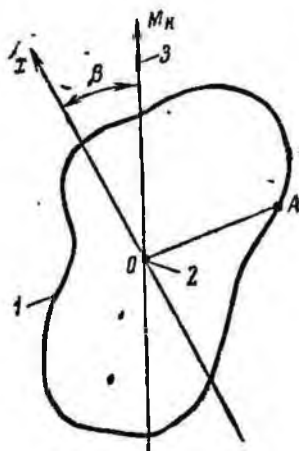


Рис. 57. К определению ориентирной поправки эхограммы: 1 — контур горизонтального сечения камеры; 2 — центр эхограммы (место расположения акустической системы); 3 — след печатного устройства

деление камеры по высоте на три зоны: зону малых градиентов, в которой рефракционные искажения пренебрежимо малы и могут не учитываться, зону средних градиентов (зону поправок), в которой вводятся поправки только в глубину снимаемого сечения, и зону повышенных градиентов (зона недоверной съемки), в которой съемка не проводится до выравнивания концентрации рассола в камере.

Оценка рефракции в камере производится в следующей последовательности. По данным калибровки на

всех точках наблюдений находят значения скорости распространения звука, которые используют для построения скоростного разреза камеры, показанного на рис. 58. На каждом высотном интервале скоростного разреза вычисляется градиент по формуле

$$G = \frac{\Delta c}{\Delta H}, \quad (57)$$

где Δc — разность скоростей в соседних точках наблюдений; ΔH — интервал глубин между точками наблюдений.

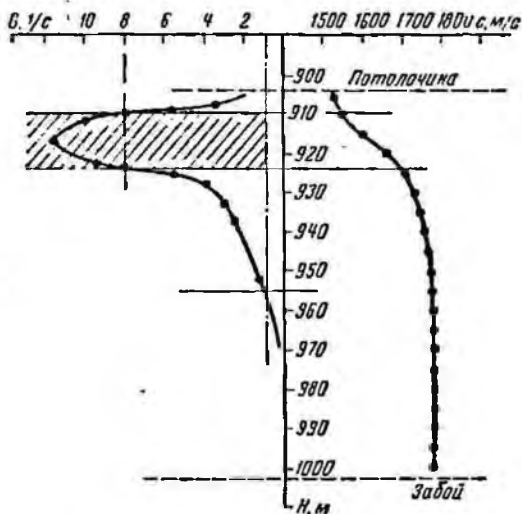


Рис. 58. Скоростной и градиентный разрезы камеры (зоны малых и повышенных градиентов определены для $R=50$ м)

Найденные значения градиентов относят к середине ΔH и, соединяя их плавной кривой, получают градиентный разрез (см. рис. 58). Пользуясь градиентным разрезом и первичными материалами съемки, по графику (рис. 59) устанавливают зоны недостоверной съемки и малых градиентов. В зоне средних градиентов поправки вычисляют по формуле (48).

В камерах с малым эксцентриситетом введение поправок за рефракцию по рассмотренной методике не вызывает затруднений. При значительном эксцентриситете камеры допустимые значения градиента, зависящие от измеряемых расстояний, будут отличаться для различных направлений одного и того же горизонтального сечения. В связи с этим зоны повышенных, средних и

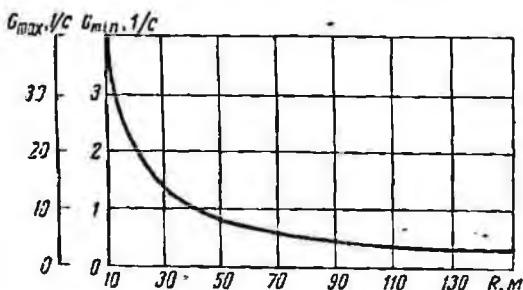


Рис. 59. Зависимость максимально допустимых и минимально учитываемых значений градиента скорости от измеряемого расстояния

малых градиентов выделяют отдельно для каждого направления, по которому предполагается построение вертикальных разрезов камеры. Раздельно вычисляются и поправки за высотное смещение уровня съемки. Таким образом, в сложных по конфигурации камерах высотная отметка точки наблюдений может быть разной в различных вертикальных разрезах.

Высотную отметку точки наблюдений вычисляют по формуле

$$z_3 = z_1 - \{H_2 + (H_3 - H_2)\} \quad (58)$$

Высотную отметку устья скважины z_1 вычисляют по результатам высотной привязки скважины к пунктам геодезического обоснования.

Отметка башмака водопроводной колонны H_2 определяется счетчиком глубин. Если ствол скважины искривлен, то H_2 вычисляется с учетом замеров искривления

$$H_2 = \sum l_i \sin \delta_i$$

или определяется графически по вертикальному разрезу скважины.

В интервал H_3-H_2 вводится поправка счетчика глубин $\delta H_{сч.}$ В высотную отметку точки наблюдений при необходимости вводится поправка на рефракционные искажения результатов измерения.

Отклонение скорости распространения звука в точке наблюдений от тарировочной приводит к масштабному искажению записи контура камеры на эхограмме. Тарировка прибора проводится на кондиционном растворе, поэтому при съемке эксплуатируемых камер масштабные поправки обычно незначительны и приурочены в основном к сечениям в районе потолочины камеры.

Для определения масштабной поправки на бланке эхограммы имеются шкалы масштабных коэффициентов k_m для получения исправленного значения радиуса камеры, определенного по эхограмме. Его величина должна быть умножена на масштабный коэффициент k_m .

Внедрение звуколокационной съемки камер выщелачивания. Сотрудники ЛГИ принимали участие в производственных съемках камер выщелачивания и на их основе составили первые в отечественной практике вертикальные разрезы камер по эксплуатационной сетке и план горных выработок рассолопромысла (рис. 60 и 61).

Для более широкого внедрения звуколокационной съемки камер выщелачивания в практику отечествен-

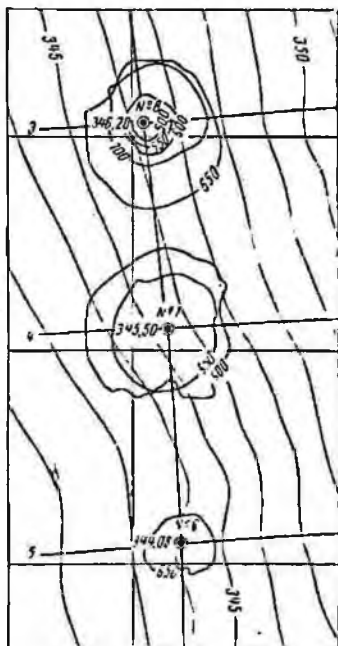


Рис. 60. Участок плана горных выработок рассолопромысла (образец)

ных расслопромыслов в 1964 г. ЛГИ передал техническую документацию на звуколокатор «Луч» ВНИИ

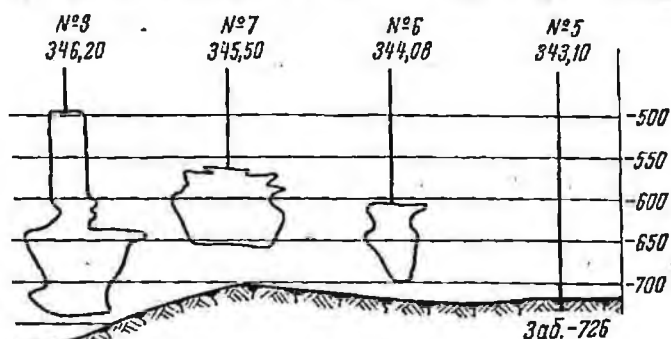


Рис. 61. Вертикальный разрез по одной из линий эксплуатационной сетки (образец)

Марка звуколокатора	Страна-изготовитель, разработчик	Год изготовления	Дальность действия, м	Глубина-ность, м
«Нутромер»	США	1958	0,5—150	600
«Луч»	СССР, ЛГИ им. Г. В. Плеханова	1963	0,5—200	1500
«Контур-1»	СССР, ВИТР МГП СССР	1963	0,3—100	1200
«Контур-2»	СССР, ВИТР МГП СССР	1966	0,3—100	3000
RSB	ФРГ	1967	0,5—150	1800
RSA	ФРГ	1968	0,5—100	1800
«Зонд-1»	СССР, ОКБ «Газприбор-автоматика», МГП СССР	1970	0,3—150	1500

МХП СССР. В 1966 г. был изготовлен второй экземпляр станции. Он использовался для съемки камер рассоло-промыслов Донбасса и стран народной демократии.

Одновременно с ЛГИ разработкой звуколокатора для съемки подземных хранилищ сжиженных углеводородных газов, сооружаемых в массиве соли методом выщелачивания через буровые скважины, занимался ВИТР. Эти работы завершились передачей ВНИИпромгазу МГП СССР в 1964 и 1966 гг. двух моделей звуколокатора «Контур-1» и улучшенной модели «Контур-2» [8].

В 1965 г. ОКБ «Газприборавтоматика» МГП СССР начало разработку звуколокатора на основе технической документации звуколокаторов «Луч» и «Контур». В 1970 г. было изготовлено два экземпляра гидролокатора «Зонд-1» для ВНИИпромгаза.

В табл. 11 дана краткая сравнительная характери-

Таблица 11

Тип регистратора	Размеры скважин- ного прибора, мм		Погрешность измерения		Примечание
	диа- метр	длина	ради- уса, %R	ориен- тировки в гра- дусах	
Осциллографиче- ский (фото на пленку)	~90	~2 000	±5	±2	Без калибраторов (масштабирование результатов по данным опробования)
Автоматический перьевой самописец; осциллографиче- ский (фото на пленку)	110	2 100	±2	±2	Полярная система записи на эхограмме
Осциллографиче- ский (фото на пленку)	92	3 50	±5	±2	
То же	105	2 200	±5	±2	Термостойкий. Работоспособен до $t=110^{\circ}\text{C}$
То же, но фото на кинопленку	96	32 500	—	—	
То же	100	4 100	—	—	
То же, но фото на пленку 18×24 ПАСК-8	110	2 100	±2	±2	Прямоугольная система записи на эхограмме

стика известных звуколокаторов, предназначенных для съемки камер выщелачивания и подземных хранилищ нефтепродуктов, сооружаемых методом выщелачивания.

§ 11. СЪЕМКА ТЕХНИЧЕСКИХ СКВАЖИН БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА И ШАХТНЫХ СТВОЛОВ, ПРОХОДИМЫХ БУРЕНИЕМ

Задачи маркшейдерского контроля и съемок при строительстве технических скважин и шахтных стволов. Физические условия измерений в этих выработках. Промышленное освоение способа проходки шахтных стволов и технических скважин бурением в Советском Союзе относится к 1938 г., когда на шахте им. Парижской Коммуны (Донбасс) была пройдена техническая скважина диаметром 0,9 м и глубиной 146 м буровой установкой Щепотьева-Иванова. В 1941 г. была разработана буровая установка МОМ, предназначенная для бурения шахтных стволов в мягких и средней крепости породы.

Эксплуатация буровых установок Щепотьева-Иванова и МОМ позволила накопить богатый опыт бурения вертикальных горных выработок в различных геологических условиях угольных месторождений, определить оптимальные параметры и режимы работы оборудования, выявить и разработать дальнейшие пути и направления усовершенствования способа бурения стволов. На базе этих исследований и производственных экспериментов были созданы высокопроизводительные буровые установки (УЗТМ, РТБ, УКБ и ТМ), позволяющие широко использовать бурение как способ проходки шахтных стволов и технических скважин в горнодобывающей промышленности.

Вне зависимости от типа буровой установки схему проходки шахтного ствола или технической скважины бурением можно представить в следующем виде. Буровой установкой горную выработку проходят от поверхности на полную проектную глубину. Промывочный раствор, заполняющий ствол, выносит шлам из забоя, охлаждает рабочие части исполнительного органа установки, вращает вал турбобура, осуществляет временное

крепление выработки. Крепят горную выработку в два этапа. Сначала в горную выработку, заполненную промывочным раствором, вводят и устанавливают крепь, которая в этот момент не имеет жесткой связи с массивом горных пород и свободна от нагрузок горного давления. Крепь вводят в действие заполнением кольцевого зазора между оболочкой и стенками горной выработки цементным раствором (тампонаж закрепного пространства). Образование цементного камня в закрепном пространстве обеспечивает жесткую связь оболочки с породными стенками, после чего промывочный раствор откачивается и проведение выработки считается законченным.

В маркшейдерском обслуживании шахтных стволов и технических скважин, проходимых бурением, возникают задачи, решить которые известными в шахтном строительстве методами трудно, а иногда даже невозможно. Эти задачи успешно могут быть решены физическими методами, в частности методом звуколокации.

Стволы и технические скважины проектируются вертикальными. Из-за геологических, механических и технологических факторов ось выработки при бурении искривляется. В большинстве случаев величина искривления оси выработки незначительна. Однако в практике бурения стволов и технических скважин зафиксированы случаи искривления оси выработки, резко выходящие за пределы производственных допусков и требующие исправления (разбуривания) горной выработки. Маркшейдерский контроль за вертикальностью оси выработки должен осуществляться в процессе бурения. Методы такого контроля разработаны еще недостаточно. Только в текущее десятилетие появились работы [4, 5, 11, 33, 50, 51], в которых предложены конкретные рекомендации по выполнению этой работы. Анализ приведенных работ показывает, что все рекомендуемые методы можно разделить на три группы: геометрические, инклинометрические и звуколокационные. Недостатком геометрических и инклинометрических методов следует считать возможность их осуществления только на конкретной буровой установке, а иногда и при проведении специальных подготовительных работ в выработке. Исключение составляет новый метод ВНИИМП, в основе кото-

рого лежит принцип жесткого отвеса (нитяной инклинометр).

При бурении стволов и технических скважин стенки их до возведения постоянной крепи немного разрушаются. Это обусловлено отслоением рыхлых пород при размыве их промывочным раствором, выносом пород массива в районах водоносных горизонтов, обрушениями при пересечении выработкой тектонических нарушений и карстовых зон. Увеличение фактического объема закрепного пространства относительно проектного характеризуется коэффициентом разработки

$$k_p = \frac{V_{\phi}}{V_{пр}},$$

где V_{ϕ} — фактический объем закрепного пространства, определяемый по расходу цементного раствора при введении крепи в действие, м³; $V_{пр}$ — проектный объем закрепного пространства, м³.

Величина коэффициента разработки может значительно колебаться как для различных выработок, так и для отдельных участков одной и той же выработки. В условиях Донбасса коэффициент разработки колеблется от 1,4 до 2,9 и в среднем составляет 2. Естественно, что пользоваться средним значением коэффициента разработки для расчетов объемов разовых заливок цементного раствора при возведении постоянной крепи нельзя. Необходима инструментальная съемка стенок выработок, которая может дать достоверные данные о геометрии и объеме закрепного пространства на различных участках. Такая съемка выполнялась механическими каверномерами, конструкция которых заимствована из геофизической практики. Использование каверномеров не дало положительных результатов по двум причинам. Во-первых, предельный радиус, измеряемый механическими каверномерами, ограничен их конструктивными возможностями и не превышает 2—3 м. Следовательно, на участках наиболее интенсивного разрушения стенок выработки механический каверномер дает заведомо заниженные показания. Во-вторых, как показали лабораторные и производственные эксперименты, кавернометрические съемки производятся грубо,

в результате чего ошибка объема закрепного пространства достигала $\pm 20 \div 25\%$, что значительно превышает производственный допуск, равный $\pm 5\%$.

Контроль за вертикальностью и соосностью участков крепи при ее возведении является важной технической задачей, так как от ее решения зависит качество крепи выработки и эффективность ее дальнейшего использования.

При возведении крепи стыковка секций между собой осуществляется с помощью различных приспособлений, что, однако, не освобождает маркшейдерскую службу от необходимости контроля.

Во время тампонажных работ возможны утечки цементного раствора вследствие трещиноватости и закарстованности массива, а также в связи с выносом его в породах водоносных горизонтов. Поэтому, несмотря на наличие съемки ствола вчерне, нужно контролировать фактический уровень цементного раствора во время тампонирувания закрепного пространства. В практике бурения стволов и технических скважин такой контроль не производится, хотя и были попытки его осуществления тампонажными ставами и по методике, основанной на учете теплового эффекта на контакте труба—цемент в процессе образования цементного камня. Для решения этой задачи целесообразно продолжить исследования возможности применения акустического каротажа, дающего обнадеживающие результаты в скважинах малого диаметра.

Условия измерений в стволах и технических скважинах характеризуется следующим.

1. Шахтные стволы и технические скважины представляют собой вертикальные горные выработки цилиндрического сечения, пройденные с поверхности бурением. Их глубина зависит от глубины разработки месторождения полезного ископаемого. Учитывая общую тенденцию перехода на разработку глубоких горизонтов, максимальную глубину спуска аппаратуры при измерениях в стволах следует принять равной 1000—1500 м. Проектные диаметры стволов и технических скважин находятся в пределах 1—9 м. Распределение каверн по глубине выработки, их конфигурация, размеры и ориентировка случайны. С учетом возможности внецентренного распо-

ложения аппаратуры при измерениях и зафиксированных размеров каверн в породных стенках дальность действия аппаратуры следует установить в пределах 0,3—12 м.

2. Стволы и технические скважины в момент измерений заполнены промывочной жидкостью, представляющей собой глинистый раствор различной концентрации, плотностью от 1,05 до 1,5 г/см³. При резком поглощении промывочного раствора горными породами их обрабатывают торфяным или углещелочным реагентом, который повышает вязкость раствора.

При указанных выше плотностях промывочного раствора опускаемая в горную выработку аппаратура будет подвергаться гидростатическому давлению до 200 кгс/см².

3. Объектами измерений в стволах и технических скважинах служат породные стенки горной выработки и элементы крепи. Стенки горных выработок представляют собой цилиндрические поверхности, осложненные кавернами произвольной формы. Отдельные элементы каверн могут быть различно ориентированы к оси измерения, а в некоторых случаях составлять с ней острые углы и даже зону акустической тени. Стенки выработок могут быть представлены всем разнообразием горных пород, характерных для осадочного комплекса каменноугольных месторождений. Элементы крепи (оболочки) представляют собой правильные цилиндрические поверхности, выполненные из металла или железобетона. Поверхность породных стенок, как и крепи, может быть занлена.

4. Температурный режим в стволах и технических скважинах определяется рядом факторов: температурой промывочного раствора, глубиной выработки, способом бурения. По данным треста Спецшахтобурение, температура в сооружаемых стволах может колебаться от 3 до 40°С. Эти данные относятся к стволам и скважинам глубиной до 600 м. При работе на глубоких горизонтах температура может возрасти до 80°С.

Обоснованием производственных допусков при проходе стволов и технических скважин занимался большой круг лиц и организаций, имевших прямое отношение к проходке стволов бурением. Наиболее полно этот вопрос освещен в работе [52].

Объем ствола вчерне и закрепного пространства может быть вычислен, если известны глубина ствола (технической скважины) и площадь поперечного сечения. В свою очередь, площадь сечения определяется его измеренными радиусами. Если учесть, что радиусы сечения определяют по звуколокационным измерениям, а глубину ствола можно измерить с высокой точностью (по сравнению со звуколокационными измерениями), то допустимую ошибку измерения радиуса ствола можно считать равной $\pm 2\%$. Ошибка объема ствола вчерне и закрепного пространства будет одна и та же и величина ее определяется ошибкой измерения радиуса. Это объясняется тем, что объем закрепного пространства вычисляется как разность объема ствола вчерне и известного объема ствола в свету.

Производственный допуск искривления оси ствола и технических скважин установлен с учетом возможностей беспрепятственного возведения крепи. Его величина обеспечивается при измерении радиуса выработки с ошибкой $\pm 2\%$.

Производственный допуск на определение высоты столба разовой зачатки цементного раствора вычисляют, исходя из условия сохранения поперечной устойчивости крепи под воздействием гидростатического давления со стороны тампонажного раствора. Он оказался $\leq 30\%$ определяемой высоты столба и легко обеспечивается при принятой выше точности измерения радиуса.

Допуск на сдвиг секций в горизонтальной плоскости определяется допускаемыми ГОСТом отклонениями по диаметру крепи и удовлетворяется при измерении радиусов с ошибкой $\pm 2\%$.

Организация исследований по разработке звуколокационной станции «Донецк». В 1964 г. ЛГП начал разработку аппаратуры для звуколокационной съемки технических скважин большого диаметра, получивший название «Донецк».

В это время аппаратура такого назначения в отечественной и зарубежной практике не применялась, хотя идея звуколокационного контроля и съемок шахтных стволов и технических скважин была предложена еще в 1953 г. В 1959 г. в разработке ЦНИИПодземшахтстроем и Ленгипропроектрансом была выпущена опытная

серия звуколокаторов УЗП-3, предназначенных для профилирования шахтных стволов. Как следует из работы [33], УЗП-3 может эксплуатироваться как в воздухе, так и в жидких средах (производственные испытания проведены на вентиляционном стволе шахты № 13-бис треста Советскуголь, который был заполнен водой). Предполагалось, что УЗП-3 или подобную аппаратуру можно использовать и для съемки стволов, проходимых бурением. Однако эти предположения не оправдались. Чрезвычайно сложные условия измерений в стволах не позволили также полностью использовать опыт разработки звуколокаторов, предназначенных для съемки других объектов («Луч», «Контур» и др.).

Основным препятствием, затрудняющим применение звулокации в стволах и технических скважинах, являлся чрезвычайно высокий коэффициент затухания звука в глинистых растворах. Определению количественной характеристики затухания были посвящены специальные экспериментальные работы на опытном стенде. Результаты приведенных исследований позволили установить оптимальный диапазон рабочих частот преобразователей и оценить возможную дальность измерений в буровой жидкости. Установлено, что при значительном разнообразии качественных характеристик среды локации (изменение плотности от 1,05 до 1,5 г/см³) для обеспечения требуемой дальности и детальности измерений целесообразно применять различные преобразователи: высокочастотные для работы в технической воде и легких буровых растворах и низкочастотные — для работы в тяжелых буровых растворах. Впоследствии это было реализовано при конструировании двух скважинных снарядов в комплекте «Донецк».

Важное методическое значение имели исследования колебаний скважинного снаряда, подвешенного на коротком кабеле.

Если крутильные колебания были достаточно детально исследованы при разработке звуколокатора «Луч», то маятниковые колебания снаряда, имеющие большое значение при работе в стволах, исследовались фактически заново. В результате этих работ был создан метод расчета затухания колебаний и составлены графики, позволяющие определить время затухания колебаний скважинного снаряда.

Отличительной особенностью стволов и технических скважин как объектов маркшейдерской съемки является малый размер сечения по сравнению со значительной высотой. Для правильного определения конфигурации ствола необходимо получить данные по съемке весьма большого числа горизонтальных сечений (до 300 штук на ствол), что требует высокой производительности как самих измерений, так и камеральной обработки. Для этого был разработан электронный перьевой самописец с двойной системой координат. Контур каждого горизонтального сечения фиксируется на ленте самописца в полярной системе координат, а вертикальное перемещение скважинного снаряда с одного уровня съемки на другой отображается пропорциональным смещением диаграммной ленты. Таким образом, на ленте самописца фиксируется блок-диаграмма ствола, образец которой показан на рис. 62.

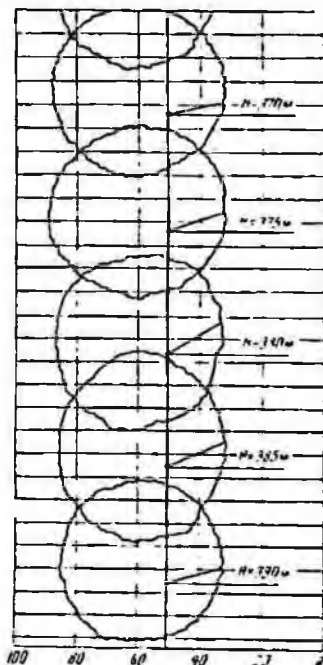


Рис. 62. Блок-диаграмма ствола (образец эхограммы самописца «Донецк»)

В 1967 г. звуколокационная станция «Донецк» была изготовлена. После производственных испытаний и опытной эксплуатации станция была передана тресту Спецшахтобурение МУП УССР и с 1969 г. находится в эксплуатации.

Звуколокационная станция «Донецк» предназначена для маркшейдерской съемки технических скважин большого диаметра и шахтных стволов, проходимых бурением. Основной задачей съемки является определение на различных стадиях проходки геометрических харак-

теристик ствола вчерне: размеров и формы горизонтальных сечений, локальных нарушений стенок ствола, величины и направления его искривления. Станция может быть использована также для определения положения секций крепи при ее возведении.

«Донецк», смонтированный подобно звуколокатору «Луч» на каротажной автомашине АЭКС-1500, состоит из приборной стойки и скважинных снарядов. Приборная стойка установлена в операторском отсеке автомашины. Для спуска снарядов используется кабель КТО-4. Принцип действия и блок-схема «Донецка» в основных чертах повторяют звуколокатор «Луч», поэтому ниже даны лишь их отличительные особенности.

В комплект «Донецка» входят скважинные снаряды двух типов: низкочастотный (НЧ) и высокочастотный (ВЧ). Унифицированные оголовки позволяют с достаточной оперативностью менять снаряды во время съемочных работ. Снаряды обоих типов имеют только «обзорные» приемоизлучатели для съемки контуров горизонтальных сечений. Калибраторные устройства отсутствуют, поскольку характеристики промывочной жидкости в каждом стволе известны и скорость распространения звука может быть найдена по таблицам. Снаряд НЧ предназначен для съемки в глинистых растворах плотностью от 1,1 до 1,4 г/см³, характеризующихся повышенным затуханием звука. Акустическая система этого снаряда состоит из двух идентичных приемоизлучателей рефлекторного типа с цилиндрическими пьезопреобразователями на частоту 53 кГц. Один из них используется в качестве излучателя, другой — приемник. Поскольку измерение малых расстояний на такой относительно низкой частоте требует предельно коротких излучательных импульсов, в снаряде НЧ применяется ударный режим возбуждения излучателя. Снаряд ВЧ предназначен для съемки в технической воде и глинистых растворах плотностью до 1,1 г/см³. Приемоизлучающие преобразователи его, составленные из пьезокерамических пластин, имеют рабочую частоту 125 кГц. Режим возбуждения импульсный (с наполнением импульса несущей частотой 125 кГц); длительность импульса составляет $0,1 \cdot 10^{-3}$ с. Для сокращения послезвучания плоских преобразователей и сопутствующих этому реверберационных помех они снабжены согласующими резонаторами,

которые улучшают условия передачи звуковой энергии во внешнюю среду.

Для сокращения продолжительности съемки скорость вращения акустической системы в снарядах обоих типов повышена, время полного оборота составляет 72 с. Из-за большого числа снимаемых на каждом стволе сечений фоторегистрация результатов съемки, требующая длительной обработки материалов, не применяется. Документальная запись контуров горизонтальных сечений производится только на самописце. По этой же причине запись выполняется не на отдельных бланках, а на диаграммной ленте. Идентичность ориентации всех сечений на ленте обеспечивает система азимутальной привязки звуколокатора.

Принцип записи заключается в следующем. Механизм самописца имеет три независимые кинематические цепи: первая обеспечивает в соответствии с поступающими сигналами радиальное отклонение пера от центра координат, пропорциональное измеряемому расстоянию, вторая вращает кольцевую обойму с радиальными направляющими синхронно с вращением акустической системы в скважинном снаряде, третья, имеющая ручной привод и снабженная масштабным счетчиком, служит для перемещения диаграммной ленты пропорционально величине спуска или подъема скважинного снаряда. На каждом горизонте съемки оператор может включить запись в любой момент, но обойма с направляющими пера начнет вращение после прихода азимут-сигнала из скважинного снаряда. Поэтому запись контура начинается в исходном положении пишущего механизма с точки, лежащей в направлении магнитного севера, которое отмечается линией выхода пера. На рис. 62 это радиальные линии (с отметками глубин), направленные от центров сечений к правому краю диаграммы. Выключается запись также в любой момент по окончании полного оборота, причем, независимо от величины углового перекрытия первичного и повторного контуров, блок автоматики самописца обеспечивает приведение вращающейся обоймы в исходное положение. Таким образом, на ленте получается совокупность одинаково ориентированных контуров горизонтальных сечений в виде блок-диаграммы ствола.

Особенностью приемо-усилительного тракта локатора «Донецк» является наличие вариатора динамической регулировки усиления. Необходимость вариатора вызвана изменчивостью условий локации. Затухание звука в промысловых жидкостях, заполняющих стволы, меняется в широких пределах, а каждому значению его должна соответствовать определенная крутизна регулировки. Для этого процесс динамической регулировки разделен на два этапа. В скважинном снаряде крутизна соответствует наименьшему из возможных значений, т. е. затуханию в технической воде. В наземном усилителе с помощью вариатора дается добавка крутизны до величины, требуемой по условиям съемки. Кроме того, пользуясь вариатором, оператор станции может менять абсолютные значения чувствительности приема, сохраняя неизменной установленную крутизну ее динамической регулировки.

Техническая характеристика станции

Максимальная глубина съемки, м	1000
Диапазон измеряемых расстояний, м:	
в технической воде	0,4—10
в глинистом растворе	0,3—6
Масштаб записи контуров горизонтальных сечений . . .	1:10; 1:20; 1:50; 1:100
Вертикальный масштаб на блок-диаграмме	1:50; 1:200
Длина диаграммной ленты, м	20
Ошибка измерения радиусов сечений	± 2 от предела шкалы
Ошибка ориентации в градусах	± 3
Размеры скважинного снаряда, мм:	
длина	1800
диаметр	190
Масса скважинного снаряда, кг	65
Время съемки одного сечения, с	72
Питание	От сети 50 Гц и 127, 220, 380 В
Потребляемая мощность, кВт	0,7—1

Съемочные работы. Для свободного спуска скважинного снаряда ствол должен быть освобожден от бурового инструмента, а устье ствола перекрыто подротор-

ной плитой (при бурении РТБ), металлической плитой с окнами или балками. Автомашинна станции располагается на расстоянии 20—30 м от устья выработки. На перекрытии ствола устанавливают блок-баланс. Точка схода кабеля с блок-баланса должна быть привязана к центру ствола (рис. 63).

При движении в стволе скважинный снаряд испытывает значительное сопротивление среды, особенно если средой является глинистый раствор повышенной концентрации. Условия спуска и подъема снаряда при этом оказываются различными. При подъеме движущей силой является натяжение кабеля лебедкой, а при спуске — отрицательная плавучесть снаряда. В технической воде и промывочных растворах малых концентраций отрицательная плавучесть снаряда достаточна для его спуска.

В промывочных растворах повышенной плотностью для получения достаточной скорости спуска необходимо подвешивать к снаряду дополнительный груз массой от 20 до 50 кг. Следует иметь в виду, что сопротивление раствора может вызывать нарушение равновесия снаряда, которое неизбежно ведет к увеличению маятниковых колебаний системы. Поэтому рекомендуется спускать снаряд на малой скорости, а съемку сечений выполнять при подъеме снаряда.

Для определения глубины спуска скважинного снаряда производят привязку нулевого отсчета на счетчиках глубин к базовому (нулевому) уровню в натуре. Для этого на кабеле делается отметка (марка), расстоя-

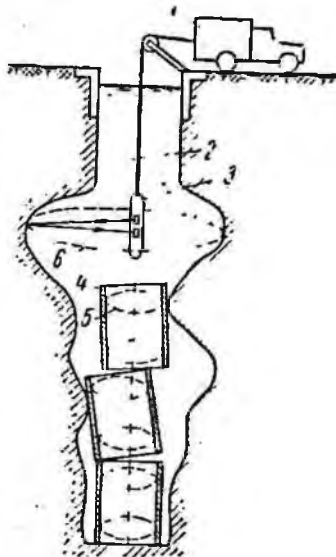


Рис. 63. Схема съемки ствола:

1 — звуколокационная станция «Донецк»; 2 — короткий кабель; 3 — скважинный снаряд; 4 — секция крепи; 5 — контур горизонтального сечения секции; 6 — контур горизонтального сечения ствола

ние от которой до акустической системы скважинного снаряда составляет целое число метров (5 или 10). Кроме нулевой марки, на кабель наносят контрольные марки через каждые 100 м. После навески кабеля на блок-баланс снаряд опускают до совпадения нулевой марки с базовым уровнем. На репитере счетчика глубин и контрольном механическом счетчике вручную выставляют показания, соответствующие расстоянию от акустической системы до нулевой марки. В дальнейшем при спуске скважинного снаряда показания глубин контролируют по контрольным маркам.

Поскольку звуколокатор «Донецк» не имеет калибраторного устройства, до производства съемки выполняется термокаротаж по стволу и измерение концентрации бурового раствора. Эти измерения необходимы для вычисления масштабной поправки при камеральных работах.

Термокаротаж выполняется аппаратурой станции АЭКС-1500. Методика работ описана в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации каротажной станции АЭКС-1500». Измерения температуры должны выполняться с ошибкой, не превышающей $\pm 2^\circ$.

Для определения плотности бурового раствора на горизонтах съемки пробы отбирают желонкой. В первую очередь отбирают пробы в устье и забое ствола. Если разность плотностей в этих точках не превышает $0,04 \text{ г/см}^3$, то значения плотности в точках наблюдения определяют интерполированием. Если $\Delta\rho > 0,4 \text{ г/см}^3$, то интервал между точками опробования делят пополам и в этой точке берется дополнительная проба. Деление интервала опробования по такой же методике ведут до тех пор, пока не будет удовлетворено условие $\Delta\rho \leq 0,04 \text{ г/см}^3$. Плотность раствора измеряют полевым ареометром АГ-2 с ошибкой $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$.

До съемки сечений на объекте выбирают режим приемного тракта звуколокатора. Оптимальные режимы могут быть выбраны только в том случае, если тип скважинного снаряда соответствует свойствам раствора, заполняющего ствол. Для съемки в технической воде и глинистых растворах малой плотности должен использоваться снаряд ВЧ, а для растворов высокой концентрации — НЧ. При концентрации раствора в пределах

$1,1 \leq p \leq 1,2$ выбор снарядов определяют по опыту предыдущих съемок в тех же условиях.

Выбор режимов начинают с определения необходимого уровня чувствительности приема и выбора крутизны динамической регулировки усиления. Для этого снаряд спускают на глубину примерно 20 м от поверхности раствора (где отсутствует аэрация), не выводя его из верхней обсаженной части ствола (кондуктора), и выбирают то положение потенциометра грубой регулировки чувствительности, при котором на экране осциллографа сигналы фиксировались бы четко, не доходили бы до порога ограничения и не исчезали полностью. Ввиду сильной флюктуации отраженных сигналов в кондукторе и изменчивости их положения при внецентренном расположении снаряда в стволе приведенное указание относится не к уровню единичного сигнала в каждый момент наблюдений, а к статистическому уровню группы их за время наблюдений в течение нескольких оборотов акустической системы.

Установив оптимальный уровень чувствительности, включают динамическую регулировку усиления и отыскивают то положение потенциометра, при котором наблюдается плавный спад уровня наблюдаемых сигналов: от величины, близкой к порогу ограничения, — для первых сигналов, наиболее близких к началу развертки, к нулю — для сигналов удаленных от начала развертки на указанное выше время.

После предварительного выбора режимов приемного тракта звуколокатора начинаются собственно съемочные работы.

Скважинный снаряд на малой скорости опускают в ствол и останавливают в 15—20 м от забоя. В нижнем положении снаряд должен висеть не менее 30—40 мин для естественного раскручивания каротажного кабеля. Во время спуска снаряда ведут наблюдения за расстоянием до стенок по осциллографу с целью обнаружения разрушенных участков ствола. По результатам предварительного профилирования стенок ствола выбирают интервалы между точками наблюдений и масштабы записи.

Положение забоя ствола уточняется опусканием снаряда до касания с поверхностью забоя. В момент касания ослабевают натяжение кабеля, что следует кон-

тролировать либо датчиком натяжения, либо визуально по степени провиса кабеля.

При подъеме снаряда снимают горизонтальные сечения ствола.

Когда скважинный снаряд выходит на уровень точки наблюдений и лебедка останавливается, необходимо выждать время успокоения колебаний. В стволах глубиной до 1000 м оно составляет 5—6 мин. В это время лента самописца переводится на уровень, соответствующий уровню точки наблюдения, по счетчику масштабных перемещений на самописце. Начальные показания масштабного счетчика устанавливают вручную на первом уровне съемки. После этого производят съемку сечения.

Во время записи сечения оператор наблюдает за уровнем принимаемого сигнала на экране осциллографа, меняя при необходимости чувствительность приема потенциометром плавной регулировки и отмечая на записи случайные потери сигнала или другие помехи. Запись должна производиться с перекрытием по меньшей мере на одну треть контура сечения. При совпадении записей съемка сечения считается оконченной. Если контуры на эхограмме расходятся, запись должна быть продолжена на второй и третий обороты для выяснения причины расхождения. Если причиной расхождения записи является кручение кабеля, это легко устанавливается по смещению характерных элементов контура сечения. Кручение кабеля, если выдержано время успокоения, может быть следствием его вытяжки под нагрузкой или вынужденных колебаний, вызванных движением жидкости в стволе. В первом случае необходимо дать кабелю вытянуться, прекратив запись на 15—20 мин и повторив ее после этого вновь, во втором случае — переходить на другие точки наблюдений.

При резких отклонениях размеров сечения от проекта и выходе записи за контуры диаграммной ленты запись необходимо повторить в другом масштабе.

Камеральные работы. Первичным документом звуколокационной съемки ствола или технической скважины большого диаметра является диаграммная лента автоматического самописца (эхограмма), сопровождаемая полевым журналом оператора. Диаграммная лента с записью системы горизонтальных сечений горной вы-

работки подлежит камеральной обработке. Камеральная обработка эхограммы проводится с целью корректуры записи контуров горизонтальных сечений выработки и приведения результатов измерения к виду, удобному для использования.

После проведения оси спуска скважинного снаряда проверяют соответствие горизонтов записи сечений на эхограмме и точек наблюдений в натуре. Расхождения могут быть обусловлены недостаточно точным совпадением показаний счетчика глубин спуско-подъемного механизма каротажной станции АЭС-1500 и масштабного счетчика самописца «Донецк» (совмещается оператором вручную), а также неравномерной вытяжкой диаграммной ленты при ее перемещении. Проверка выполняется сопоставлением замеренных на ленте расстояний между снятыми сечениями с данными, выписанными на диаграммной ленте. Если расхождения превышают 2 мм в масштабе записи, положения горизонтов точек наблюдений на эхограмме должно быть исправлено. Поправка обычно вводится не в эхограмму, а при построении вертикальных разрезов горной выработки.

При первичной обработке эхограммы проводятся расшифровка и корректура записи контуров сечений. Корректуре подлежат контуры сечений, запись которых выполнена с помехами, вызванными колебаниями снаряда, потерей отраженного сигнала, появлением паразитных сигналов и т. д. Все эти помехи во время съемки фиксируются оператором в полевом журнале.

Маятниковые и крутильные колебания скважинного снаряда проявляются в расхождении повторных записей контура сечения выработки с первоначальной. Могут быть две причины, вызывающие смещение повторных записей: во-первых, оператором не выдержано время успокоения колебаний и запись была произведена при колеблющемся снаряде и, во-вторых, снаряд на уровне точки наблюдений попал в зону водоносного горизонта и под действием потоков совершал вынужденные колебания. В первом случае колебания затухающие и их амплитуда для каждой последующей записи уменьшается. Запись контура сечения, практически совпадающая с предыдущей, будет соответствовать положению покоя снаряда и должна быть выделена на эхограмме, как рабочая. Во втором случае колебания

снаряда вынужденные и не затухающие, а потому на эхограмме расхождение записей контура сечения сохраняется, независимо от числа оборотов акустической системы, и выбрать запись, соответствующую неотклоненному положению снаряда, нельзя. Ориентировочно эту запись устанавливают по подобию сечений, снятых выше и ниже данной точки наблюдений.

Потеря отраженного сигнала и прием паразитных сигналов вызываются главным образом зеркальной поверхностью отдельных участков стенок ствола и их различной отражающей способностью, наличием крупных кусков породы в растворе. На записи это выражается в виде резких изменений радиуса сечения. При этом перо самописца прочерчивает прямую линию, направленную к центру или от центра сечения. Исправляются эти участки записи по радиусам соседних участков контура.

После первичной обработки эхограммы в запись контуров горизонтальных сечений вводится поправка на ошибку звуколокационной аналогии графическим методом. Если съемка производилась скважинным снарядом НЧ, то угол раствора палетки $\varphi_0 = 9^\circ$. При использовании скважинного снаряда ВЧ угол $\varphi_0 = 3^\circ$.

В звуколокационной станции «Донецк» реализован магнитный способ ориентирования эхограмм. Введение угловой поправки β рассмотрено нами в предыдущем параграфе при описании камеральной обработки эхограмм звуколокатора «Луч».

Скорость распространения звука в глинистых растворах меняется с изменением глубины горной выработки, что приводит к рефракционным искажениям записи контуров горизонтальных сечений в точках наблюдений. Выше указывалось, что рефракционные искажения записи на эхограммах определяются не столько градиентом скорости звука, сколько соотношением градиента и измеряемого расстояния. В стволах и технических скважинах измеряемые расстояния малы и при любых практически возможных градиентах скорости звука рефракционные искажения могут не учитываться при камеральной обработке эхограмм.

Отличие скорости распространения звука в точках наблюдений от тарировочной приводит к масштабному искажению записи контура сечения выработки на эхо-

грамме. Поправка в измеренное расстояние ΔR определяется по выражению

$$\Delta R = R_0 \left(\frac{c}{c_0} - 1 \right), \quad (59)$$

где R — расстояние, на эхограмме, м; c — скорость звука в точке наблюдения, м/с; c_0 — скорость звука тарировочная, м/с.

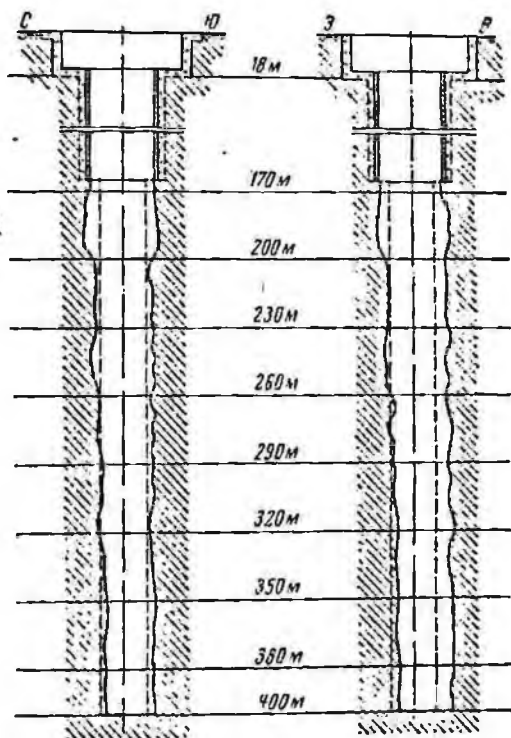


Рис. 64. Вертикальные разрезы ствола шахты № 3—5 «Сокологорровка», построенные по данным звуколокационной съемки

Масштабные поправки ΔR_i вводятся только в те измеренные радиусы, которые используются для построения вертикальных разрезов ствола.

Внедрение звуколокационной съемки шахтных стволов и технических скважин, проходимых бурением. После передачи станции «Донецк» для использования в строительстве технических скважин ЛГИ принимал участие в обеспечении его работоспособности в производственных условиях. Осуществляется авторский надзор за состоянием аппаратуры. Изготовлены запасные скважинные снаряды, акустические системы и другие блоки. Представители ЛГИ периодически участвуют в производственных съемках технических скважин (рис. 64).

Одновременно с ЛГИ, разработкой звуколокатора для съемки стволов разведочных скважин занимался ВИТР. В 1970 г. была изготовлена звуколокационная станция «Профиль-2» [8], которая в благоприятных условиях (ствол скважины заполнен технической водой) может быть использована для съемки технических скважин.

В настоящее время ЛГИ работает над созданием новой звуколокационной аппаратуры, в которой учтен опыт разработки и эксплуатация станции «Донецк». При этом поставлены следующие задачи:

- 1) повышение глубинности действия аппаратуры до 2000 м;
- 2) увеличение термостойкости скважинной аппаратуры до 80°С;
- 3) осуществление, помимо съемки горизонтальных сечений горной выработки профилирования стенок ствола; эта задача связана с решением чрезвычайно сложной технической проблемы — стабилизацией положения акустической системы при перемещении снаряда в стволе;
- 4) автоматизация введения масштабной поправки в процессе съемки.

Глава IV

ЗВУКОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА И КОНТРОЛЬ ЗА ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОДВОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

За последние десятилетия широко стала развиваться разработка подводных залежей месторождений полезных ископаемых. Это связано с применением совершенных, высокоэффективных технических средств и наступлением «минерального голодания» по некоторым видам полезных ископаемых. Методы и условия разработки подводных залежей полезных ископаемых могут быть следующими:

- разработка россыпных месторождений (с искусственным и естественным обводнением) драгами;

- разработка подводных залежей экскаваторами, земснарядами и скреперами;

- разработка залежей в донных отложениях морей и глубоководных озер специальными для морских условий механизмами.

Затруднительность и неэффективность в этих условиях съемки и контроля за горными работами обычными маркшейдерскими способами (особенно при больших глубинах) требуют изыскания новых способов съемки и контроля (телевидение, звуколокация и др.).

Звуколокационный способ в этом отношении имеет существенные преимущества: съемка производится автоматически и с высокой производительностью. При этом на индикаторе (самописце) фиксируется масштабированный профиль дна водоема (горных выработок) и

границы расслоения рыхлых отложений (недоработки), лежащих на плотике — твердом основании.

Сущность звуколокации применительно к рыхлым отложениям поясняется на рис. 65.

§ 12. СЪЕМКА И КОНТРОЛЬ ЗА ДРАЖНЫМИ РАЗРАБОТКАМИ

В настоящее время в СССР более 75% объема горной массы россыпных месторождений (золота, платины, алмазов, вольфрама, олова и др.) перерабатываются драгами. По девятому пятилетнему плану развития народного хозяйства намечается значительный рост дражного строительства, особенно за счет ввода в эксплуатацию драг глубокого черпания, предназначенных для разработки россыпей большей мощности (20—50 м). Все это требует коренного усовершенствования техники и методики геологомаркшейдерского обслуживания дражных разработок.

Кафедра маркшейдерского дела ЛГИ за 1958—1964 гг. провела теоретические и экспериментальные исследования в области применения звуколокации

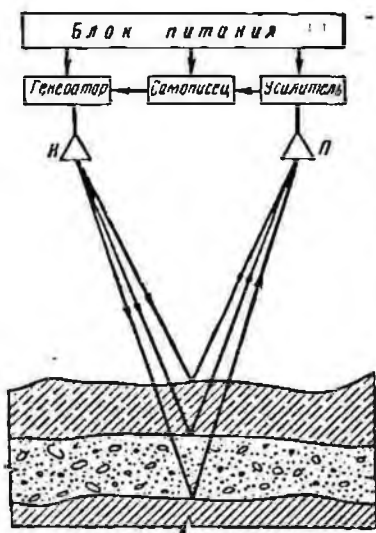


Рис. 65. Функциональная схема звуколокации

на дражных разработках. В результате были разработаны, изготовлены и испытаны в производственных условиях несколько макетов дражного звуколокатора с широким диапазоном электроакустических параметров. Так, рабочая частота магнестрикционных вибраторов колебалась от 22 до 5 кГц, акустическая мощность излучения — от 100 до 500 Вт. Чувствительность приемного

усилителя составляла 1—25 мкВ, разрешающая способность 0,3—0,6 м [27, 29, 20].

При определении параметров дражного звуколокатора определяющими являлись глубинность действия по горным породам и разрешающая способность, т. е. минимальная величина слоя, фиксируемая на эхограмме. В условиях дражного котлована мощность рыхлых отложений, остающаяся на плотике при глубоком черпании, доходит до 6 м. На подтопе дражного полигона она доходит до 10 м. Глубина действия звуколокатора зависит от электроакустических параметров аппаратуры, условий распространения звуковых волн в воде и породе, свойств лоцируемых объектов и уровня шумов. В результате испытаний аппаратуры в полигонных и производственных условиях получена следующая глубинность приема эхосигналов для различных сред, свойственных дражным разработкам, м:

Иловые отложения	15—20
Глина	6—10
«Пески» (рыхлые отложения)	4—6

Производственные испытания опытных образцов аппаратуры показали, что звуколокационным методом могут быть выполнены: съемка на подтопе дражного полигона, т. е. фиксация рельефа дна подтопа, а при благоприятных условиях структуры (границы раздела) — донных отложений, а следовательно, мощности рыхлых отложений и рельефа плотика; съемка подводной части котлована, определение глубины черпания драги в котловане и слоев донных отложений, неотработанных драгой, фиксация подводной части забоя, бортов, отвалов и процесса их формирования, контроль за подыливанием драги, т. е. илонакоплением в призабойной части дражного котлована, контроль за подэфеливанием кормовой части драги, определение потерь полезного ископаемого и источников их образования.

Локационные работы выполнялись как с лодки, так и непосредственно с драги. Для горизонтального масштабирования эхограмм заезды со звуколокатором производились на весельной или моторной лодке равномерно по заранее разбитым створам, отмеченным вехами на бортах дражного котлована и буйками на воде, или

тахеометрической привязкой положения акустических систем.

По результатам съемки можно контролировать полноту отработки рыхлых отложений, определять объемы переработанной драгой горной массы, производить учет потерь и разубоживания полезного ископаемого (песков) и составлять плано-графическую документацию (планы, разрезы) подводной части дражного котлована и полигона.

Комплект малогабаритного дражного звуколокатора МГЗ спроектирован как для стационарной установки на драгах (рис. 66), так и установки его на лодке для проведения съемки подводной части подтопа и котлована в любых их участках.

В комплект дражного звуколокатора входят (рис. 67): основной прибор 1, самописец 2, акустические системы 3 (три комплекта), осциллограф типа С1-4 4 и заборные устройства.

В корпусе основного прибора смонтированы: блок питания и генератор ударного режима, предназначенный для возбуждения звуковых колебаний в магнито-стрикционном излучателе; усилитель с коэффициентом усиления $15 \cdot 10^6$ с аттенюатором и динамической регулировкой; механический коммутатор для последовательного включения акустических систем через 4 мин; блок горизонтального масштабирования со световым табло для фиксации пути перемещения акустической системы вдоль заборного устройства в прямом и обратном направлениях.

Назначение самописца эхолота НЭЛ-5, модернизированного применительно к условиям дражных разработок, — управление посылкой и производство непрерывной записи на эхограмме лоцируемых объектов. Запись производится на электротермической бумаге. В корпусе самописца смонтирован стрелочный указатель прибора горизонтального масштабирования, показания которого используются при камеральной обработке эхограмм.

Акустические системы сменные на 10, 15 и 22 кГц. Каждая из них состоит из двух рефлекторных приемо-излучателей с цилиндрическими магнито-стрикционными преобразователями, которые смонтированы в общий металлический обтекатель.

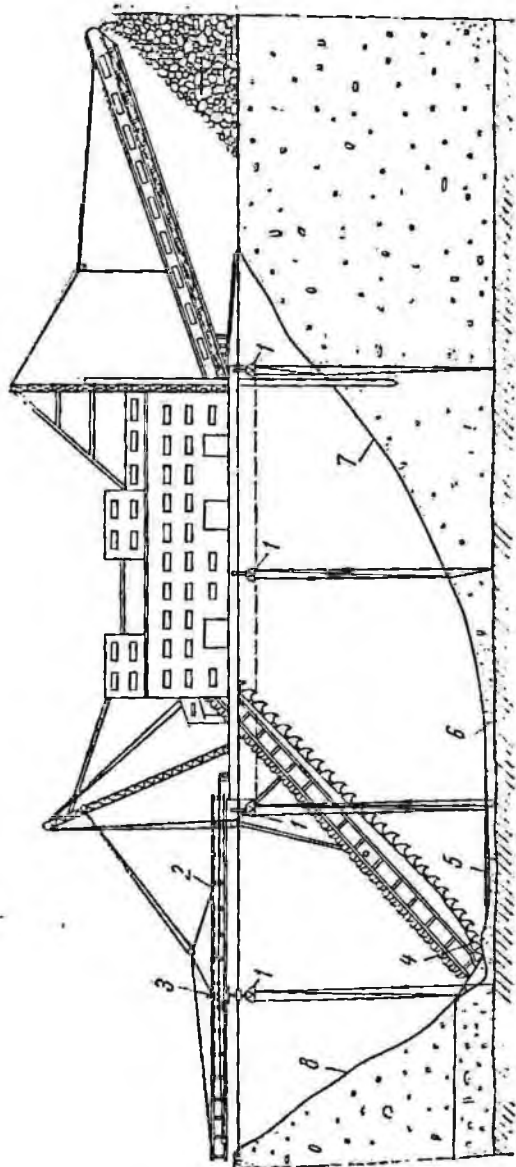


Рис. 66. Звукоизоляция с драги:
 1 — звукоизоляционные системы; 2 — передвигание лабиринтные устройства; 3 — каретка с системой; 4 — выходы
 отложения непереработанные; 5 — плывы отложения; 6 — плитник; 7 — эффецый отвал; 8 — откос забой

Забортные устройства бывают двух типов: одно для постоянного крепления акустических систем в кормовой и средней частях понтона драги, другое для подвижного крепления системы в носовой части понтона. Назначение второго типа забортного устройства — доставка акустической системы в любую часть призабойного простран-

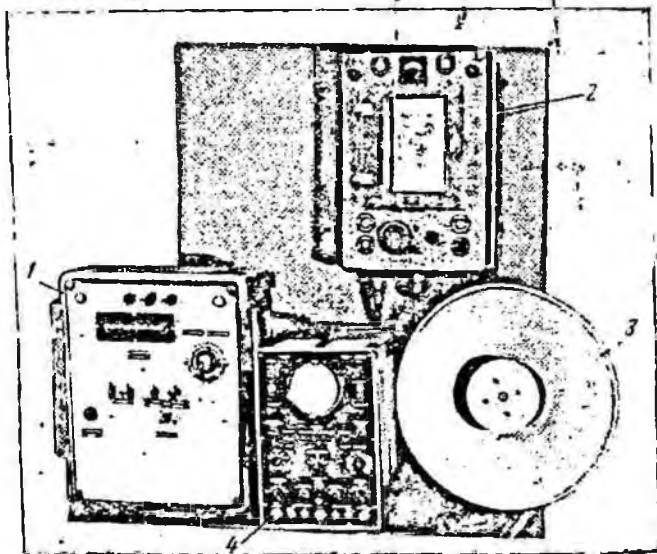


Рис. 67. Комплект дражного звуколокатора МГЗ

ства котлована. Это устройство выполнено в двух вариантах. Одно из них показано на рис. 68.

С внешней стороны трапа на кронштейнах в одной вертикальной плоскости на расстоянии 1—1,5 м друг от друга крепят две направляющие, по которым на роликах с помощью троса и лебедки с реверсивным электромотором вдоль трапа перемещается каретка. Вместе с кареткой перемещается акустическая система, укрепленная на конце штанги, которая подвижно (в вертикальной плоскости) закреплена на каретке между роликами. При наклонном положении трапа штанга под действием силы тяжести занимает вертикальное поло-

жение и крепится (фиксируется) на дуге. На полке верхнего направляющего уголка на расстоянии 2—4 м друг от друга установлены концевые выключатели, с помощью которых передаются сигналы на табло горизонтального масштабирования перемещения каретки с

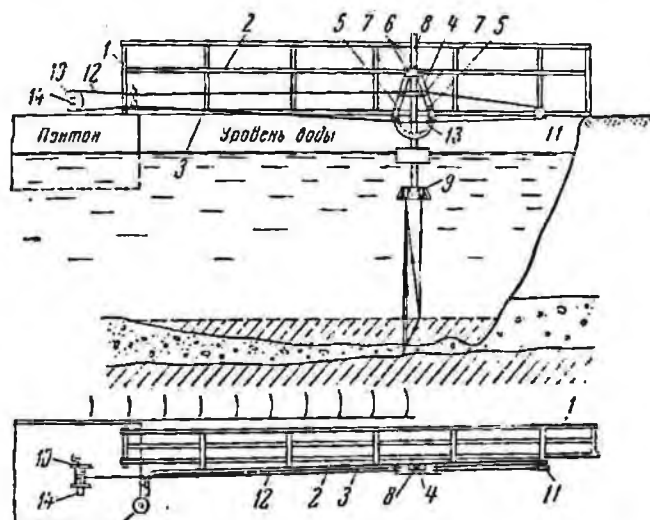


Рис. 68. Передвижное заборное устройство:

- 1 — трап; 2 и 3 — направляющие; 4 — передвижная каретка; 5, 6 и 7 — ролики; 8 — штанга; 9 — акустическая система; 10 — лебедка; 11 — блок; 12 — трос; 13 — дуга; 14 — реверсионный электродвигатель

акустическими системами вдоль трапа. В это время на эхограмме автоматически производятся оперативные отметки, фиксирующие отрезки пути, пройденные акустической системой в прямом и обратном направлениях [20, 29].

Во втором варианте заборного устройства вместо направляющих уголков и каретки параллельно трапу устанавливается балка, по которой перемещается тельфер, состоящий из компактной подъемной лебедки и ходовой тележки, автоматически перемещающейся на балке. На конце троса, наматываемого на лебедку, укреплен поплавок с акустической системой, который с помощью реверсивного двигателя равномерно переме-

шается по балке в прямом и обратном направлениях. На эхограмме звуколокатора в это время автоматически производится отметка начала и конца пути, а также пунктов остановки акустической системы через каждые 2 м. Таким образом осуществляется горизонтальное масштабирование эхограмм.

Техническая характеристика дражного звуколокатора

Глубина действия, м	18—25
Разрешающая способность, м	0,3—0,6
Масштаб эхограмм	1:250
Скорость перемещения электротермической бумаги на самописце, мм/мин	70
Инструментальная ошибка определения глубины, %	Около 2
Рабочая частота, кГц	10, 15, 22
Угол диаграммы направленности в градусах	15
Питание	От оси переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В
Мощность, потребляемая прибором от сети, Вт	Не более 400

Комплект дражного звуколокатора ДЗЛ. В 1968 г. заводом им. В. И. Ленина (г. Бельцы) МССР с учетом разработки МГЗ Ленинградского горного института по заказу Министерства цветной металлургии был спроектирован и изготовлен в малой серии опытный образец дражного звуколокатора.

ДЗЛ был испытан в производственных условиях и установлен на драгах глубокого черпания треста Лензолото. Предполагается, что помимо основного назначения дражный звуколокатор может быть применен для определения границ участков вечной мерзлоты и рыхлых донных отложений рек, озер и прибрежных районов морей (шельфа) при инженерных, геологических и других изысканиях. Он может применяться при инженерном обследовании дна под гидротехнические сооружения при строительстве портов, причалов, разведке и разработке подводных месторождений полезных ископаемых, изучении режима рек и решении других задач.

В комплект звуколокатора (рис. 69) входят: центральный прибор 1, прибор комбинированный 2, усилитель 3, акустические системы 4, заборные устройства.

В корпусе центрального прибора расположены перьевой самописец, усилитель и пульт управления.

На передней крышке центрального прибора сосредоточены ручки оперативного управления режимом работы самописца и усилительного тракта геолокатора, а также расположен переключатель диапазонов глубин

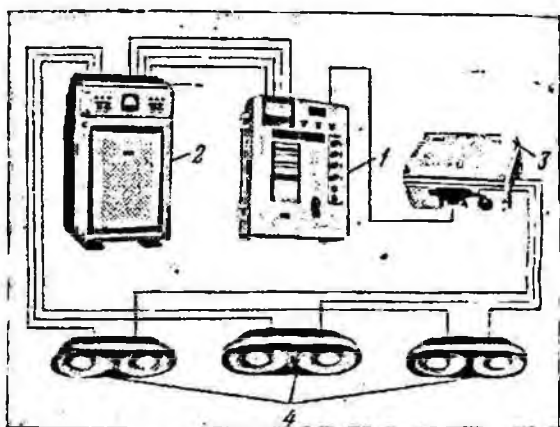


Рис. 69. Комплект ДЗЛ (дражный вариант)

0—30 и 0—60. На боковом пульте центрального прибора расположены ручки управления забортым устройством в автоматическом режиме, оперативной отметки и регулировки основного усиления.

Под передней (верхней) крышкой на сборной планке расположен вспомогательный пульт управления: ручное управление тельфером подвижного забортного устройства, управление освещенностью шкалы самописца, переключатель контрольного прибора, переключатель полосы пропускания усилительного тракта и тумблеры «Мотор», «Отметка I», «Отметка II».

Прибор комбинированный. Он выполнен в виде стойки, в которой размещены блоки послышки, питания и комбинированный. Блок послышек выполнен в виде кассеты, состоящей из трех генераторов ударного возбуждения с цепями коммутации, служащих для возбуждения соответствующих вибраторов-излучателей, распо-

ложенных в различных местах драги; устройства запуска ударных генераторов; выпрямителей на 1500 В и 400 В и автомата управления двигателем, который выполнен в виде съемного субблока.

Блоки питания также размещены в кассетах прибора. Питание осуществляется от сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Усилительное устройство ДЗЛ выполнено в виде отдельного прибора, смонтированного в корпусе из алюминиевого сплава. Усилитель состоит из трех входных каскадов на лампах, релейного коммутатора и основного усилителя.

В комплект ДЗЛ входят три акустические системы: одна рабочей частотой 15 кГц и две — 10 кГц. Тип систем применен такой же, что и в МГЗ.

При создании комплекта ДЗЛ предусмотрен лодочный вариант, в котором из комплекта, стационарно устанавливаемого на драге, используется только легко демонтируемый центральный прибор.

В комплект лодочного варианта входит отдельный преобразователь постоянного напряжения. Он служит для питания аппаратуры от аккумуляторной батареи напряжением 24 В и выполнен в виде переносного прибора.

Забортные устройства могут быть двух типов: для стационарной установки акустических систем в различных местах дражного понтона и для перемещения акустической системы между понтоном и забоем.

После производственных испытаний три комплекта ДЗЛ в 1969 и 1970 гг. смонтированы на драгах глубокого черпания комбината Лензолото для постоянной эксплуатации.

Методика выполнения звуколокационной съемки. Периодичность звуколокационной съемки зависит от режима работы драги и необходимости решения различного рода контрольных горнотехнических задач. Съемка подводной части дражного котлована может быть текущей и контрольной. Текущая съемка выполняется с драги перед подшагиванием ее с целью контроля за полнотой зачистки плотика, глубиной черпания, формой и шириной откоса забоя. Контрольная съемка выполняется в установленные календарные сроки (в конце месяца, два раза в месяц) и по мере необ-

ходимости. При контрольной съемке фиксируются все объекты подводной части котлована с установкой звуколокатора на лодке.

Чтобы избежать вредного влияния на показания звуколокатора интенсивного взмучивания воды, насыщения ее воздушными пузырьками при работе драги, съемку следует производить при холостом ходе драги (перед подшагиванием или в период остановки ее, при смазке машины).

В зависимости от внешних условий и назначения съемки подводной части котлована параметры и блоки звуколокатора могут быть различные. Для работы на различной глубине предусмотрены два диапазона глубины и плавная фазировка. При необходимости детализации разреза и достижения лучшей разрешающей необходимости используют акустическую систему с более высокой частотой излучения и направленности. Это особенно часто применяется для четкой фиксации поверхности дна и откосов котлована, когда используются 15—22-килогерцовые системы. Для достижения большой глубины локации породы применяют систему с более низкой частотой.

Для проверки правильности записи самописцем состояний до лоцируемых объектов, а также для устранения возможных ошибок в показателях звуколокатора необходимо перед началом работ производить его тарировку. Для этого в районе работ выбирают участок с ровной плотной поверхностью для котлована и, пользуясь стальной рулеткой с грузом, измеряют глубину. Одновременно глубину определяют с помощью звуколокатора. По результатам измерений находят коэффициент тарирования по формуле

$$k_T = \frac{H_\Phi}{H_T}, \quad (60)$$

где H_Φ — глубина измерения рулеткой; H_T — глубина определения по эхограмме.

Коэффициент тарирования используют при обработке эхограмм.

При съемке в сложных условиях необходимо производить плавную регулировку усиления, добиваясь получения на эхограмме четкой записи снимаемого объекта (поверхности отработки, откосов забоя, бортов и др.).

Если регулятором усиления не удастся получить четкую запись, а также при затемнении фона эхограммы, следует применить ступенчатую регулировку с помощью аттенуаторов или динамическую регулировку.

В связи с тем что высотная отметка акустической системы зависит от уровня воды в дражном котловане и на подтопе, при обработке эхограмм необходимо учитывать по рейке контрольного поста фактические отметки уровня подтопа во время съемки.

Для учета деферента драги при зачистке и задрке плотника необходимо момент деферента отмечать на эхограмме нажатием оперативной кнопки самописца.

Звуколокационная съемка предзабойной части котлована при использовании автоматического заборного устройства, связанного с трапом, производится по радиальным профилям, перпендикулярным линии забоя. При этом тельфер (каретка) с акустической системой устанавливается в исходное положение и с постоянной скоростью непрерывно или с остановками прокатывается от понтона драги до забоя и обратно. Трап в это время должен быть подвижным и по возможности занимать горизонтальное положение. При негоризонтальности по инклинометру (подвесному полукругу) определяют угол наклона его. На эхограмме производятся оперативные отметки начального, конечного и промежуточных положений акустической системы, фиксирующиеся на пульте управления. По этим отметкам проводится горизонтальное масштабирование эхограмм. Горизонтальное масштабирование эхограмм может также производиться при локации с лодки по установленному на лебедке с тросиком счетчику, отмечающему количество пройденных акустической системой метров, и связанному с оперативной кнопкой самописца.

Положение радиальных съемочных профилей на плане определяют:

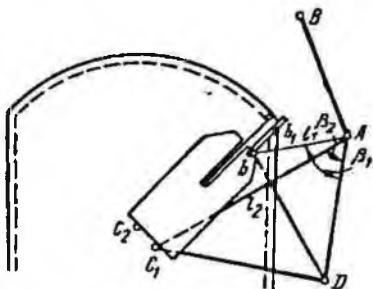
по координатам рабочей сваи C_1 , C_2 (рис. 70) драги и начального положения b акустической системы прямой засечкой или тахеометрически;

по координатам (углам засечки β_1 и β_2) сваи и вех на бортах котлована.

В первом случае положение профиля на плане определяется по координатам x , y сваи драги и начального положения b акустической системы.

После определения положения и съемки первого профиля по мере поворота драги вокруг сваи производится запись на эхограмме профиля дна призабойной части котлована по дуге, описываемой акустической системой.

Масштабирование этой эхограммы осуществляется блоком горизонтального масштабирования перемещения драги при его наличии или тахеометрически. При повороте драга через определенные, заранее назначенные расстояния или углы поворота останавливается и производится съемка по следующему радиальному профилю. Положение этого профи-



ли определяется по координатам x , y свая и величине дуги, описанной акустической системой, или углу поворота драги, определенному по прибору. Аналогично определяют положения последующих радиальных профилей. При накладке профилей на план может быть использован масштабированный макет драги.

Чтобы не усложнять маневрирование драги, при совмещении установленных бортовых вех с осью забортного устройства следует вехи на верхней бровке

забоя выставлять после остановки драги, а затем осуществлять геодезическую привязку их.

Съемку подводной части откоса забоя и бортов котлована можно выполнять двумя способами:

перемещением акустической системы над откосом забоя (борта);

поворотом акустической системы в вертикальной плоскости.

В первом случае акустическую систему равномерно перемещают над откосом забоя (борта) заездами на лодке или с помощью забортного устройства, укреплен-

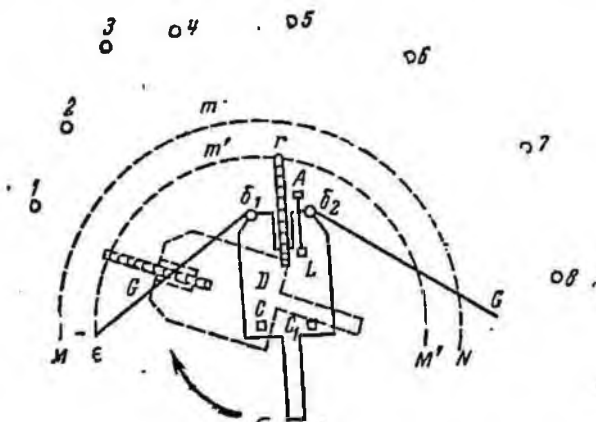


Рис. 71. Схема привязки профилей локации по вехам:

1-8 — вехи; D — понтоз драги; Г — черпаковая цепь; δ_1 и δ_2 — направляющие блоки головных канатов; G — головные канаты; С и С₁ — сваи; MmN и m'M' — соответственно верхняя и нижняя бровки забоя драги; А — акустическая система; L — лебедка забортного устройства

ного на трапе. Горизонтальное масштабирование эхogramм производят по световому табло или по оперативным отметкам через 1-2 м пройденного расстояния акустическими системами. Съемку откоса забоя производят одновременно со съемкой всех объектов призабойного пространства.

Во втором случае съемку откоса подводной части забоя производят с помощью поворотного устройства.

позволяющего поворачивать акустическую систему в вертикальной плоскости на $110-120^\circ$ от ее исходного положения (рис. 72).

При съемке подводного забоя драгу в намеченной точке останавливают. При включении самописца акустическая система поворачивается от исходного верти-

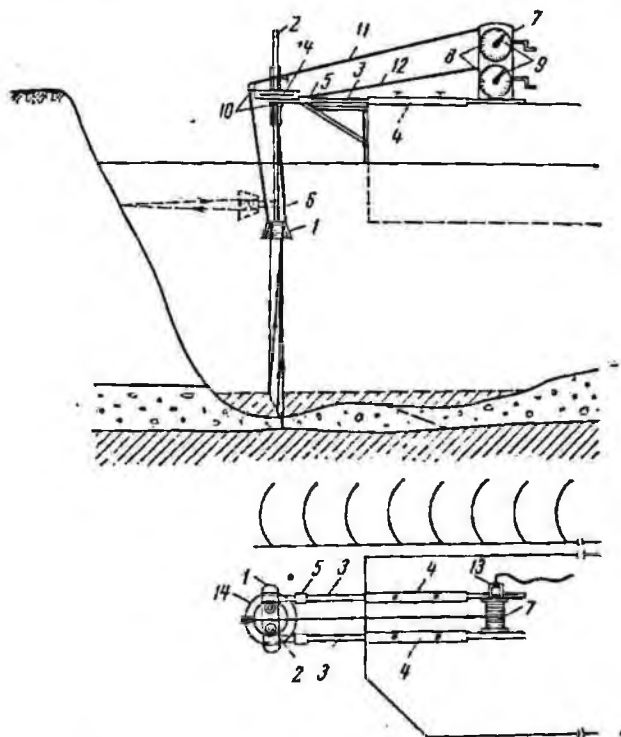


Рис. 72. Штанговое заборное устройство:

1 — акустическая система; 2 — вертикальные штанги; 3 — горизонтальные штанги; 4 — патрубки; 5 — муфта; 6 — поворотное устройство (шарнир); 7 — лебедка; 8 — лимбы; 9 — стрелки указатели; 10 — блоки; 11 и 12 — тросы; 13 — мотор; 14 — поворотный круг

кального до горизонтального положения с остановкой через $5-10^\circ$. Момент остановки и начало поворота на эхограмме отмечают оперативной отметкой. Угол поворота определяют по индикатору блока с автоматиче-

ской сельсинной связью или по счетному диску на лебедке забортового устройства. Съемку забоя производят сериями, каждая из которых включает поворот акустической системы от вертикального до горизонтального положения и обратно.

В связи с изменением расстояний от акустической системы до поверхности забоя при повороте акустической системы необходимо регулировать усиление звуколокатора с тем, чтобы обеспечить четкость записи на эхограмме.

Контроль за подэфеливанием кормы драги производят включением акустических систем, закрепленных в кормовой части понтона, так как при развороте драги эти участки понтона наиболее близко подходят к верхней части эфельного отвала и при отсутствии контроля могут «садиться» на эфеля. Контроль за подыливанием забоя можно проводить самостоятельно или совместно со звуколокационной съемкой предзабойного пространства. Для предупреждения подэфеливания и подыливания драги необходимо изучить процесс формирования эфельных отвалов, систематически определяя углы откосов и расположения отвалов в котловане.

Контрольную съемку подводной части всего дражного котлована или подтопа дражного полигона с лодки выполняют заездами по створам, фиксируемыми заранее установленными и привязанными вехами, или с привязкой положения лодки тахеометрическим способом.

Перед началом контрольной съемки в котловане или съемки на подтопе следует произвести рекогносцировочные заезды со звуколокатором по площади съемки.

На основании результатов рекогносцировочных заездов можно осуществить наиболее рациональную разбивку и закрепление рабочих профилей. Для наиболее эффективного контроля за полнотой отработки россыпи и положением плотика профили локации следует совмещать с разведочными линиями или отдельными скважинами (шурфами). Для определения формы откосов (забоя, бортов, отвалов), межходовых и межшаговых целиков (гребешков) профили локации надо располагать перпендикулярно (поперек) им.

Если водоем малой глубины и поверхность дна имеет большой коэффициент отражения, то на эхограмме будут зафиксированы поверхность дна и интенсивные

кратные его отражения (повторное эхо), накладывающиеся на записи поверхностей раздела донных отложений. При этом целесообразно создавать непосредственный контакт акустической системы с поверхностью дна укладкой акустической системы на дно, т. е. переходить к точечному методу локации (рис. 73).

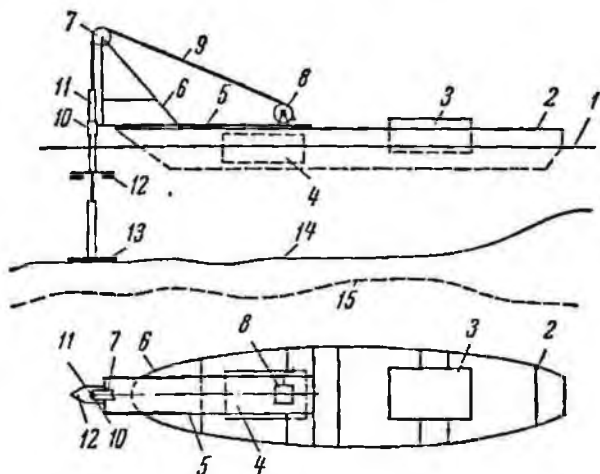


Рис. 73. Установка комплекта звуколокатора на лодке:
 1 — горизонт воды; 2 — лодка; 3 — аккумулятор; 4 — звуколокатор; 5 — крепежная доска; 6—11 — забортное устройство с лебедкой; 12 — акустическая система; 13 — акустическая система, уложенная на дно; 14 — дно; 15 — плотик

Для контроля точности записи необходимо рабочий заезд по каждому профилю производить дважды в прямом и обратном направлениях. Для получения на эхограмме более четкой записи следует постоянно регулировать усиление.

Камеральная обработка результатов звуколокационной съемки производится в следующем порядке:

- обработка (вычисление) материалов привязки рабочих профилей и маршрутов звуколокационной съемки;
- обработка эхограмм;
- составление планово-графической документации на основе эхограмм и решение производственных задач по ним.

Обработка материалов привязки. Геодезическая привязка эхограмм производится с пунктов рабочего (съемочного) обоснования, расположенных в районе работ. Способами привязки могут быть тахеометрический, прямая и обратная засечки, с базисом при инструменте, а на больших акваториях — радиодальномерная. Пространственные положения промежуточных профилей и точек локации определяют одним из этих способов.

Обработка материалов инструментальных привязок створов, профилей, маршрутов и отдельных точек на профиле и на маршруте выполняются известными способами. Основные точки створов (конечные, свая) наносятся на план графически или по вычисленным координатам, а промежуточные точки — только графически.

Обработка эхограмм состоит в расшифровке (интерпретации) первичных материалов, полученных при звуколокационной съемке, вертикальном и горизонтальном масштабировании эхограмм, а также корректровке (внесение поправок) эхограмм.

На эхограмме, как известно, регистрируется сигнал от границ между средами, отличающимися волновыми сопротивлениями. Отраженный сигнал на эхограмме изображается в виде штриха, образующегося от прожига электротермической бумаги. При регистрации последовательных отражений по профилю на эхограмме регистрируются линии соответствующей интенсивности почернения.

Наиболее сложной частью обработки эхограмм, требующей определенного навыка в конкретных условиях, является их расшифровка. Верхняя линия (двойная) на эхограмме соответствует уровню заглубления приемопередаточной системы в воду и получается от сложения синхроимпульса и прямого сигнала. Если зафиксировалась двойная линия, то отсчетной линией записи нуля во всех случаях считают верхний край верхней прямой.

Следующая линия (ниже «нуля») образуется сигналами, отраженными от дна (граница вода—грунт). Расшифровка записи дна в большинстве случаев не вызывает затруднений, так как фиксируется четко и наглядно. Исключение составляют случаи, когда в придонных слоях воды имеется плавающая растительность (дери, водоросли), затонувшие бревна, а также когда

дно перекрыто механическими взвесами. При этом на эхограмме записываются обе поверхности. Однако нижняя запись более твердого (плотного) собственно дна (плотика) будет более четкой; как правило, оно дает повторное эхо.

После расшифровки записи дна выделяются его повторные эхо, которые располагаются ниже записи дна.

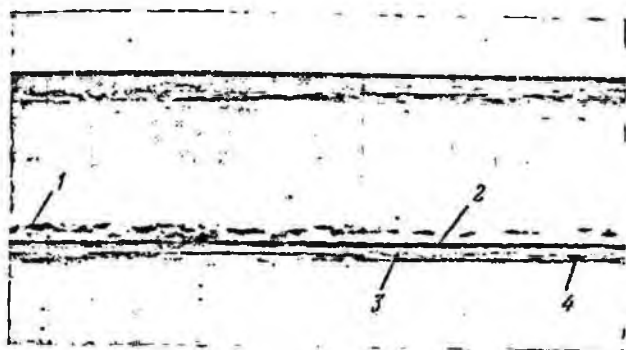


Рис. 74. Эхограмма с фиксацией донных отложений в призобойной части:

1 — слой взвешенного ила; 2 — слой осевших мелких фракций;
3 — слой песков незачищенных драгой; 4 — плотик

Расшифровка повторного эхо (при значительной глубине черпания подтопа) трудностей, как правило, не вызывает, так как запись их располагается ниже записи дна и донных отложений, лежащих на плотике. При плотных слоях донных отложений на повторных эхо вместе с дном отражаются и слои. Причем слои отражаются иногда более четко, чем в первичной записи. Поэтому при звуколокации рекомендуется производить четкое разделение слоев на эхо регулированием усилителя.

В призобойной части котлована (между понтоном драги и забоем) донные рыхлые отложения, лежащие на плотике, представлены, как правило, сложной структурой, состоящей из следующих слоев: взвешенного (разжиженного) ила, осевшего ила, рыхлых отложений, оставшихся на плотике.

На рис. 74 приведена эхограмма призобойного пространства, на которой зафиксированы три слоя мощ-

ностью 2,4 м. Верхний слой представляет собой иловые отложения, а нижние — рыхлые отложения, оставшиеся на плотике.

Мощность слоя иловых отложений зависит от гранулометрического состава пород и скорости течения воды в котловане. Слой взвешенного ила обычно легко расшифровывается, так как его поверхность горизонтальна.

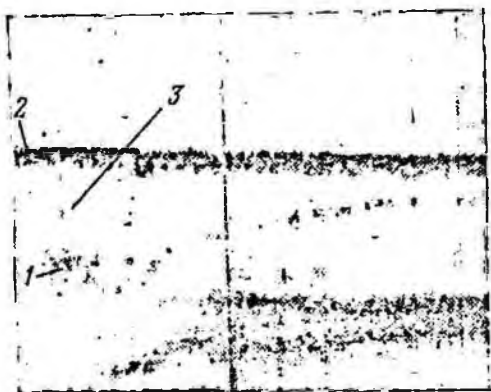


Рис. 75. Эхограмма с фиксацией слоя приплотниковой мерзлоты:

1 — плотик; 2 — горизонт черпания; 3 — слой вечной мерзлоты

Иногда во взвешенном иловом слое включены затонувшие деревья, деревянные стойки, дерн и т. д. Тогда верхняя граница ила приобретает пятнистый вид.

При работе драги в условиях локальной (вечной) мерзлоты (приплотиковой) с помощью звуколокатора можно определить ее плановое положение и мощность. Так, например, на рис. 75 проведена эхограмма звуколокационной съемки в призобойной части котлована 116-й драги. При заезде от драги к левому борту котлована было зафиксировано резкое погружение плотика (около 5 м). В то же время горизонт черпания драги с поддиркой плотика несколько повысился. Выдача черпаками мерзлой породы подтвердила наличие мерзлоты.

Контроль за полнотой отработки рыхлых отложений драгой непосредственно связан с выявлением источни-

ков потерь и мерами их снижения. Рассмотрим некоторые источники потерь, при выявлении которых может быть использован звуколокационный способ. К таким видам относятся потери, связанные с оставлением рыхлых отложений в призабойном пространстве не зачищенными, с резкими западениями и изменениями профиля плотика, вечной мерзлотой, с межшаговыми целиками.

Потери, связанные с оставлением невычерпанных драгой рыхлых отложений на плотике, складываются из межшаговых целиков, отложений обрушившегося откоса забоя и боковых бортов (при глубоком драгировании), вывалившихся песков из переполненных ковшей черпаковой цепи, неполной зачистки плотика и др.

Образование потерь межшаговых целиков (гребеньях), как известно, связано с зашагиванием драги. Межшаговые гребешки с увеличением глубины драгирования и подшагивания возрастают. Потери в гребешках могут быть значительными, так как в них остается наиболее обогащенная часть рыхлых отложений.

Определение фактической величины межшаговых целиков непосредственными замерами в процессе драгирования практически невозможно, особенно при больших глубинах черпания. Применение же звуколокации позволяет отразить фактическую картину. Если глубина черпания не превышает 10—15 м и породы в бортах устойчивые, то межшаговые гребешки хорошо выявляются и количественно определяются по эхограмме. На рис. 76 приведена эхограмма с профилем забойной части котлована с подводной верхней бровкой забоя (с подтопом). На эхограмме зафиксировались крутой откос забоя драги 1, углубление черпания 2, межшаговый

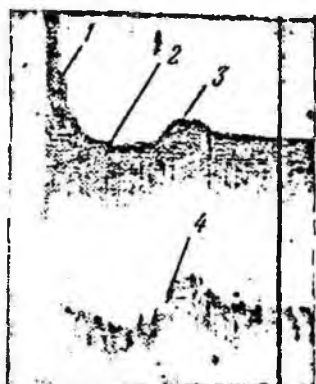


Рис. 76. Эхограмма с записью межшагового гребешка

гребешок 3 и повторное эхо 4 с отражением той же записи. Имея горизонтальное и вертикальное масштабирование эхограммы, легко подсчитать по ней объем межшагового гребешка.

При большой глубине черпания и в неустойчивой породе, слагающей откос забоя, углубление черпания через некоторое время заполняется вывалившимися из черпаков и осыпавшимися (обрушившимися) рыхлыми

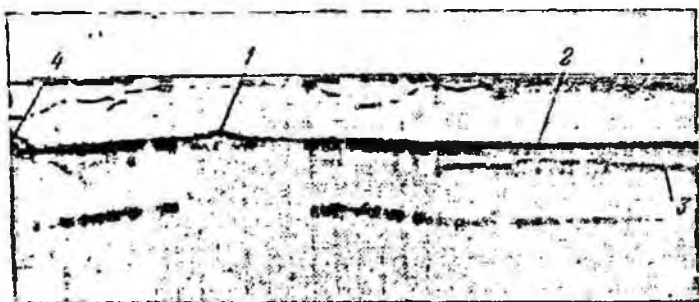


Рис. 77. Эхограмма с фиксацией межшагового гребешка и слоя рыхлых отложений

отложениями из забоя, в связи с чем межшаговый целлик вуалируется (сравнивается с окружающими его рыхлыми отложениями). Чтобы выявить межшаговые гребешки, в этих условиях необходимо звуколокационную съемку вести сразу же вслед за завершением черпания драги (поддиркой плотика). На рис. 77 представлена эхограмма дна котлована 65-й драги в предзабойной части, записанная звуколокатором. На эхограмме кроме межшагового поднятия 1 и слоя рыхлых отложений (недоработка) 2 зафиксировался и плотик с поднятиями и западениями 3. Значительное отстояние гребешков от забоя 4 объясняется медленным перемещением (с остановками) акустической системы над призабойным пространством.

Имея на эхограмме положение и форму даже верхней части межшагового гребешка, можно определить общее очертание и размеры гребешка с большей достоверностью и точностью, чем графическим способом.

Кроме межшаговых целиков, значительным источником потерь, входящих в число оставшихся рыхлых отложений на плотике, к неотработанным драгой относятся: вывал песка из переполненных черпаков, неполная зачистка плотика и обрушения массы борта забоя и сползания рыхлых отложений в очистное пространство за пределы действия черпаковой цепи. Бурное обрушение борта забоя и сползание рыхлых отложений происходят от сотрясения забоя и удара волн воды в забой, поднимаемых драгой при ее деференте в момент поддирки плотика. Величина и интенсивность обрушения во многом зависит от физико-механических свойств горного массива.

Опыт показал, что потери при глубоком черпании достигают значительных размеров. Оставленные рыхлые отложения на плотике неотработанными в отдельных случаях составляют 1,5 м и более, не считая пловых отложений.

При определении по эхограмме мощности рыхлых отложений, оставшихся неотработанными, слой ила необходимо исключать. Подшагивание драги осуществляют после того, как в результате дополнительной зачистки плотика слой рыхлых отложений будет минимальным.

Потери, связанные с резким изменением плотика (складки, западинки, карсты и др.), могут быть весьма значительными. Из практики известно, что имеется прямая зависимость между количеством намытого металла и рельефом постели (плотика) россыпи. Поэтому достоверное знание погребенного рельефа плотика имеет важное практическое значение, тем более, что разведочные работы резкие изменения плотика не выявляют (из-за малой густоты скважин). При проведении звуколокационной съемки в предзабойной части дражного котлована представляется возможным оперативно выявлять такие западания и принимать меры к их отработке.

Кроме резких западаний плотика, заполненных мерзлотными металлоносными песками и выявленных при звуколокационной съемке на полигоне 116-й драги, там же зафиксированы многие другие западания, имеющие различные размеры и форму (рис. 78).

Опыт показывает, что звуколокационный метод выявления изменений рельефа плотика, в том числе и резких западаний, может быть использован не только в котловане драги, но и на подтопленном дражном полигоне при благоприятных условиях (отсутствие расти-

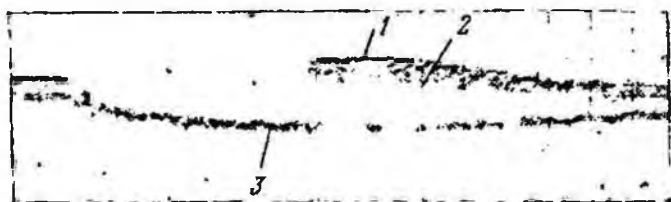


Рис. 78. Эхограмма с западаниями плотика:
1 — поверхность дна; 2 — слой рыхлых отложений; 3 — западания в плотике



Рис. 79. Эхограмма с межходовым целиком

тельного покрова на дне, незначительная мощность толщи рыхлых отложений, отсутствие крупных фракций в породах).

При разработке россыпи двумя или несколькими параллельными заходками могут формироваться межходовые целики значительных размеров.

На рис. 79 приведена эхограмма звуколокационной съемки дражным звуколокатором на полигоне одной из драг, который обрабатывался тремя заходками. На эхограмме зафиксированы два целика 1 и 2 между тремя заходками, образовавшими как бы три подводных котлована.

Вертикальное масштабирование эхограмм. Точность вертикального масштабирования эхограмм прежде все-

го зависит от точности определения скорости распространения звуковых волн в лоцируемой среде, что является одной из трудных задач. В условиях подводной разработки залежи полезных ископаемых необходимо знать скорость распространения волн в двух основных типах сред — в жидкой (в воде) и твердой (донные отложения, слой горных пород). Поэтому всю толщу воды и донных отложений следует рассматривать как многослойную систему.

Скорость прохождения звуковых волн в воде котлована зависит в основном от насыщенности воды механическими взвесями (взмученность), температуры воды, солености воды (от минерализации), насыщения воды нерастворившимся воздухом (воздушными пузырьками), статического давления.

Скорость распространения звука, полученная в котловане 66-й драги экспериментальным путем, отличалась от скорости, вычисленной по формуле (15), в пределах 1%. Чтобы исключить влияние указанных факторов на точность определения расстояний до лоцируемых объектов (дно водоема), необходимо производить более частую тарировку звуколокатора.

Определение скорости звука в донных отложениях. Большую сложность представляет определение скорости распространения звуковых волн в слоях донных отложений, так как скорость звука в различных породах различна.

При дражных разработках в призабойном пространстве, где осуществляется контроль за полнотой отработки россыпи, залегающие на плотике донные отложения могут быть в виде:

а) иловых отложений, образовавшихся в результате выпадения из взмученной воды мелких частиц и мелко-го песка, а также оплывания забоя ила из эфельных отвалов. В условиях Ежовской россыпи треста Лензолото мелкие фракции (песчано-глинистые) составили около 20% (от 1,2 мм и менее) и их скопление в призабойном пространстве доходило до 2,5 м. Плотность иловых отложений составляет 1,2—1,6 г/см³.

б) рыхлых отложений, лежащих на плотике и состоящих из глины, гравия, песка, гальки, валунов. Слой рыхлых отложений образуется в результате недоработки драгой межшаговых гребешков, вывалов песков из

ковшей, обрушения откосов забоя и бортов. Мощность слоя достигает при глубоком драгировании 4,5 м. Скорость распространения звуковых волн колеблется от 1300 до 1700 м/с и в среднем приближается к скорости в технической воде котлована.

Определять скорость звуковых волн можно сопоставлением эхограмм с данными буровых скважин, звуковым (акустическим) каротажем по скважинам, способом прямого сигнала (звуковой пеленг), способом географов отраженных волн, лабораторными исследованиями образцов пород.

В первом случае производится заезд на плавучих средствах со звуколокатором вдоль буровой линии, на которой скважины отмечены буйками, или используют точечный метод, когда над скважинами устанавливают акустическую систему, а лодка с комплектом звуколокатора закрепляется якорями. Слои горных пород, зафиксированные на эхограмме, сопоставляются с мощностью этих же слоев, полученных в результате бурения. При этом вводится поправочный скоростной коэффициент или определяется скорость распространения волн в слое горных пород по формуле

$$c_{сч} = c_{т} \frac{h_{т}}{h_{ф}}, \quad (61)$$

где $c_{т}$ — скорость звука, полученная при тарировке; $h_{т}$ — мощность слоя, снятая с эхограммы; $h_{ф}$ — мощность слоя, полученная по данным бурения.

Примером такого способа определения скорости могут служить экспериментальные работы, проведенные на Гладышевском озере под Ленинградом. Район Гладышевского озера сложен четвертичными отложениями, представленными различными по возрасту моренами. На озере был разбит и закреплен буями экспериментальный профиль, по которому произведен многократный заезд с дражным звуколокатором.

По эхограммам, на которых зафиксирована многослойная толща донных отложений, выбраны характерные места для закладки скважин (рис. 80). Скважины бурили с отбором проб на глубину до 10 м. Сопоставлением геологических колонок по скважинам с записью на эхограммах в одних и тех же точках установлены структурная аналогия залегания слоев и их мощность.

По полученным данным определена скорость распространения звуковых волн (м/с) в слоях донных отложений, которая колебалась в следующих средних пределах, м/с:

черный ил	1400—1600
глина серая с песком	1520—1670
черная глина	1560—1700

Если массив горных пород в донных отложениях нарушен, как это имеет место при разработке россыпей драгой, для определения скорости звука используют

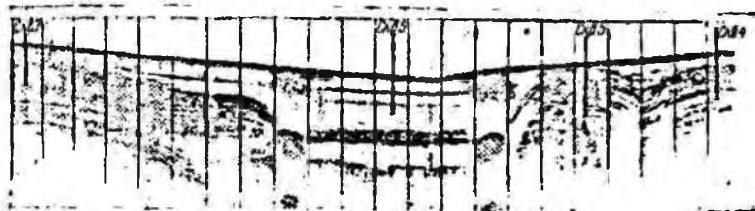


Рис. 80. Эхограмма экспериментального профиля на Гладышевском озере

отметку плотика по данным бурения и эхограмме, где зафиксировано положение дна и плотика. По эхограмме можно определить отметку дна z_d и измерить акустическую мощность рыхлых отложений. Тогда фактическая мощность h рыхлых отложений

$$h = z_d - z_n; \quad (62)$$

$$z_d = z_n - H, \quad (63)$$

где z_d — отметка поверхности дна; z_n — отметка плотика; z_n — отметка горизонта воды (заранее известна); H — глубина черпания, определяемая по эхограмме.

Зная фактическую мощность слоя и ее значение, полученное по эхограмме, можно определить и скорость звуковых волн в слое рыхлых отложений.

Способ гидрографа отраженных волн основан на регистрации продольных сейсмических волн, отраженных от поверхности сред с различными волновыми сопротивлениями. Использование способа отраженных

волн в звуколокации связано с анализом зависимости временного интервала (времени распространения звукового импульса от излучателя до отражающей поверхности и обратно к приемнику) от базового расстояния. Построение эхографов производится по эхограммам, полученным при различных базисных расстояниях.

Погрешность метода отраженных волн зависит в основном от инструментальной погрешности прибора и изменения скорости вдоль пути распространения волн, которая является случайной. Опыт показывает, что в условиях дражных котлованов глубокого черпания, где изменение скорости звука составляет 100—250 м/с, ошибка метода отраженных волн не превышает 3—3,5%.

После того как установлена скорость распространения звука в различных средах, зафиксированных на эхограмме, порядок обработки и вертикального масштабирования эхограмм может быть следующим.

1. На эхограмму наносится «нулевая» линия, соответствующая уровню воды в котловане. Ее положение определяется с учетом поправки вследствие погружения акустической системы.

2. Определяется глубина и мощность слоев, которые затем переводятся в требуемый вертикальный масштаб строящегося профиля.

Таким образом, глубина (мощность слоя) в масштабе

$$h = k, l / M_{\text{в}}, \quad (64)$$

где l — глубина по эхограмме; $M_{\text{в}}$ — вертикальный масштаб по эхограмме.

3. От проведенной нулевой линии (уровня подтопа) откладывается масштабированная глубина характерных точек дна. Линия, построенная по этим точкам, будет представлять собой профиль дна. Далее от линии дна последовательно откладывают масштабированную мощность слоев рыхлых отложений. Оформление профилей рабочих заездов и их дальнейшее использование при решении геологомаркшейдерских задач не отличается от оформления и использования обычной маркшейдерской графической документации по профильным линиям.

Горизонтальное масштабирование эхограмм в общем случае производится по соотношению зафиксиро-

ванных на эхограмме горизонтальных расстояний и соответствующих им расстояний на местности (в натуре).

$$M_r = \frac{l}{R}, \quad (65)$$

где l — расстояние между оперативными отметками на эхограмме; R — расстояние между соответствующими промежуточными точками на местности.

С другой стороны, горизонтальный масштаб может быть получен из выражения

$$M_r = \frac{v_0}{u}, \quad (66)$$

где v_0 — скорость протяжки бумаги самописца; u — скорость движения акустической системы при съемке.

Скорость протяжки бумаги самописца при шкале 50 м равна 0,5 мм/с, а при шкале 25 м составляет 1 мм/с.

Таким образом, для получения на эхограмме горизонтального масштаба в пределах 1:500—1:2000 скорость движения лодки должна составлять 0,2—10 м/с при пользовании шкалой 50 м и 0,5—2 м/с при пользовании шкалой 25 м.

Основные условия качественного масштабирования эхограммы — постоянство скорости движения плавучих средств при съемке.

Учитывая трудность обеспечения заранее заданной скорости перемещения по всей длине профиля, следует выдерживать постоянство скорости на отдельных отрезках его между соседними маркировочными вехами (буйками).

Точность масштабирования эхограмм во многом зависит от способа привязки драги или других плавучих средств. Если на драге отсутствует автоматическое масштабирование или вместо передвижного забортного устройства применяется штанговое, то для масштабирования и привязки эхограмм можно применить графический прием, предложенный Д. А. Казаковским. Поясним на примере применения штангового устройства с поворотным шарниром (см. рис. 72), приспособленного для съемки подводных откосов, имеющих значительный уклон (забой, борта отвалов). По мере поворота драги и записи на эхограмме с помощью специальных визирок

наблюдают прохождение той или иной бортовой вехи через створ линии КА горизонтальных штанг забортного устройства (рис. 81). В этот момент делают оперативную отметку на эхограмме и надписывают около отметки номера вех. Впоследствии, в камеральной обстановке, по отметкам масштабируют эхограммы и наносят на план положение снятого профиля. Для этого по коорди-

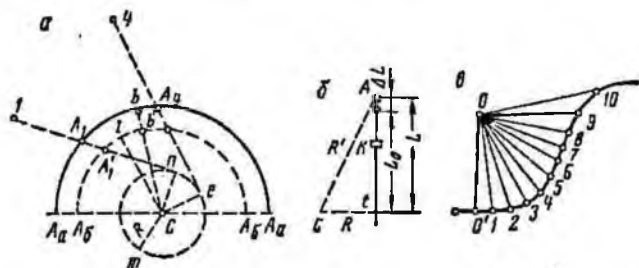


Рис. 81. Детали графического построения в связи с привязкой и масштабированием эхограмм продольного профиля

натам x, y наносят на план положение вехи 1, 2, ..., 8 и сваи С. Из точки С (рис. 81, а) проводят дуги окружностей $A_a b A_a$ и $A_b b' A_b$, описываемые акустической системой и центром блока головного каната драги. Из точки С проводят окружность mn , описываемую основанием t перпендикуляра Ct , опущенного из центра С на продолжение линии AK . Радиусы дуги $A_b b' A_b$ и окружности mn , являющиеся постоянными величинами, измеряются в натуре. Радиус R' дуги $A_a b A_a$ определяется графически или аналитически по радиусу R окружности mn и расстоянию L . При этом $L = L_0 + \Delta L$, где L_0 — расстояние от основания перпендикуляра ct до муфты консоли (рис. 81, б), а OL — расстояние от муфты до центра вертикальной штанги забортного устройства (см. рис. 72). Дуга $A_a b A_a$ (см. рис. 81, а) представляет собой положение на плане профильной линии, записанной на самописце. Для получения этой линии положения точек, соответствующих оперативным отметкам на эхограмме, из проекций вех проводят касательные к окружности mn . Точки A_1 и A_2 пересечения этих касательных с дугой $A_a b A_a$ будут искомыми точками. При построении точек, определяющих положе-

ния акустической системы при ее движении по профилю, можно воспользоваться и другим приемом. Для этого на дуге $A_a b A_a$ как и в предыдущем способе, строят точку A_1 , а на дуге $A_b b' A_b$ — точку A'_1 . Далее на дуге $A_b b' A_b$ от точки A_1 откладывают отрезки l , определяемые по длине окружности и оборотам блока правого головного каната. Через концы дуг проводят из центра C радиусы, точки пересечения которых с дугой $A_a b A_a$ будут соответствовать положению акустической системы на профильной линии в момент оперативной отметки. При этом способе в натуре устанавливается только одна l веха. Промежуточные вехи не выставляются. Оперативные отметки на эхограмме делают при прохождении вехи l через створ линии KA и далее через определенное число оборотов блока правого головного каната. Необходимо иметь в виду, что иногда дуги $A_a b A_a$ и $A_b b' A_b$ практически будут совпадать и можно ограничиться построением одной дуги $A_a b A_a$.

Горизонтальное масштабирование эхограмм производится по соотношению расстояний между оперативными отметками на эхограмме и соответствующими им расстояниями в натуре.

Для получения на эхограмме более четкой записи профиля плотника рекомендуется съемку по профильным линиям производить при движении драги слева направо, когда акустическая система находится в менее взмученной воде. Эхограммы, полученные при локации поверхности отработки, нумеруются и на них указываются номер драги, номер заходки, координаты x , y , свай и вехи, а также числовые значения величин R , L_0 , ΔL и l в зависимости от способа съемки.

При составлении планово-графической документации с результатами звуколокационной съемки может быть использован следующий графический прием (рис. 82). На горизонтальную прямую (линию уровня воды) наносят отмеченные на эхограмме точки профиля 1—6, расположенные между концами A и B профиля. Точки проектируют на линию $A'B'$, параллельную отсчетной линии эхограммы (точки $1'$, $2'$, $3'$, $4'$, $5'$, $6'$). Из точки B' проводят линию $A''B''$ под углом к линии $A'B'$, на которой откладывают (от точки B') горизонтальную проекцию AB в выбранном горизонтальном масштабе (отрезок $A''B''$).

Точки A' и A'' соединяют прямой. Затем все точки линии $A'B'$ переносят на линию $A''B''$ параллельную прямой $A'B'$.

Из точек, построенных на линии $A''B''$ (точки $1''$ — $6''$), восстанавливают перпендикуляры, на которых откладывают полученные с эхограмм значения глубины в точках 1 — 6 . Соединив найденные точки, получают профиль.

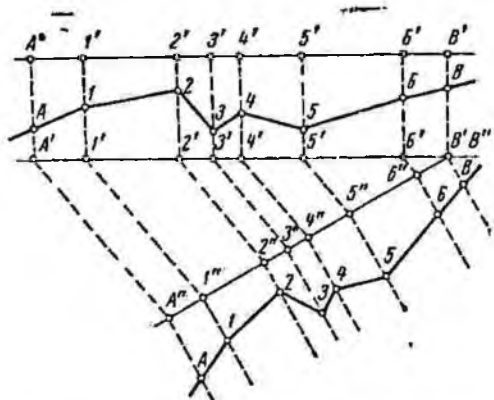


Рис. 82. Графический способ горизонтального масштабирования эхограмм

Поправки и точность звуколокационной съемки. Ошибки звуколокационной съемки возникают на всех этапах работ: при привязке съемки, при звуколокационных измерениях и при использовании результатов съемки для решения горнотехнических задач.

Учитывая, что ошибки первого и третьего вида работ общеизвестны, остановимся кратко на учете ошибок собственно звуколокационных измерений — на технических ошибках и звуколокационной аналогии.

Технические ошибки зависят от аппаратуры, методики работ и внешних условий (среды). Их можно разделить на случайные и систематические. Случайные ошибки не могут быть исключены из результатов измерений, но должны быть определены при решении конкретных задач и сведены к минимуму. Систематические ошибки независимо от источников возникновения, должны учитываться и исключаться.

Ошибка из-за базы между вибраторами зависит от величины базы и глубины локации. Поправка на базу всегда отрицательная и определяется по известной формуле [47]. В табл. 12 отражено значение поправок на базу, вычисленных по формуле.

Из таблицы видно, что значение поправок возрастает по мере увеличения базы и уменьшения величины локации. Учитывая, что в применяемых акустических системах база не превышает 1 м, поправка может не учитываться, так как она будет в пределах 10 см. С увеличением базы до 2 м (на малых глубинах) поправка должна вводиться [47].

Таблица 12

Глубина локации, м	Значения поправок при длине базы, м		
	0,5	1	2
0,5	-0,06	—	—
1	-0,03	-0,13	—
2	-0,01	-0,06	-0,27
3	—	-0,04	-0,17
4	—	—	-0,13
5	—	—	-0,1
6	—	—	-0,06

Ошибка рефлекторных систем, которые часто используются в геолокаторах, выражается в дополнительном расстоянии (5—10 см), проходящим звуком в конусе отражателя. Она имеет систематический характер. Ошибка исключается тем, что измерение заглубления вибраторов делается не по центральному сечению поката, а по верхней кромке.

Ошибка положения формирующей поверхности — ошибка определения заглубления приемноизлучающей системы относительно поверхности воды. Поскольку это измерение выполняется непосредственно линейкой или по градуированной штанге с высокой точностью (1÷2 см), то она может не учитываться.

Ошибка непостоянства скорости распространения звука обуславливается отклонением температуры, состава среды и физико-механических свойств ее во времени и пространстве. Она может выражаться значительной величиной при многослойной среде (вода, слои горной породы в донных отложениях). Большая часть ее учитывается при введении коэффициента тарировки в водной среде. Остаточная погрешность будет зависеть от интервала контроля за скоростью звука. При плавном изменении скорости звука в среде

влияние ошибки снижается определением среднего значения скорости распространения звука. К такому приему приходится прибегать при определении скорости в донных отложениях. Если изменение скорости звука в воде может быть учтено предрасчетом и тарировкой, то в горных породах оно трудно поддается расчету, так как зависит от многих факторов (водонасыщенности, пористости, литологии и др.), хотя в ограниченных пределах одного месторождения скорость звука изменяется меньше и может усредняться.

Опыт локации дражных и карьерных котлованов показал, что остаточная погрешность в благоприятных условиях составляет около 1% измеряемого расстояния.

Ошибка нестабильности развертки, т. е. ошибка из-за произвольных отклонений скорости развертки от заданного значения, пропорциональна отклонениям и имеет случайный характер. В дражном и карьерном звуколокаторах эта ошибка составляет $\pm 0,5\%$ измеряемого расстояния. Ошибкой нестабильности определяется погрешность масштаба записи.

Ошибка фиксации, зависящая от формы акустического импульса и характеристики приемного тракта, имеет случайный характер. В рассмотренных звуколокаторах максимальное значение ее равно 7 см.

Ошибка считывания (снятия) с эхограммы показаний локации зависит от четкости записи нулевой линии и поверхности объекта локации, а также от точности измерения расстояния между указанными линиями. Измерение расстояния возможно с точностью до 0,2 мм, что будет соответствовать 2 см в натуре при масштабе эхограммы 1 : 100. В то же время ошибка из-за усреднения линий «нуля» и дна (границ раздела пород) находится в пределах 0,5—1,5 мм, что составит 10—25 см. Среднее значение ошибки считывания можно принять равным 17 см.

При этом суммарная техническая ошибка с учетом независимости действия ее составляющих при глубине 20 м

$$m_r = \pm \sqrt{m_M^2 + m_c^2 + m_\phi^2 + m_{сч}^2} \approx 29 \text{ см}, \quad (67)$$

где m_M — ошибка масштаба (нестабильности развертки); m_c — ошибка непостоянства скорости распростра-

нения звука; m_f — ошибка фиксации; $m_{сч}$ — ошибка считывания.

В 1962 г. в дражном котловане одной из драг треста Лензолото была проведена многократная звуколокационная съемка одного из профилей. Звуколокационные съемки контролировались рулеточными промерами. Средняя ошибка составила 23 см.

Аналогичные работы были выполнены в котловане Индерского рудника, где съемку проводили 14 раз при различных акустических системах (10, 15, 20 кГц). Расстояние от поверхности воды до плотика составляло 12 м. Мощность слоя горных пород около 2 м. Средняя квадратичная ошибка звуколокации составила 24,4 см.

Ошибки звуколокационной аналогии. При производстве звуколокационной съемки подводных горных выработок приходится иметь дело с резкими подъемами, западаниями, откосами и другими формами рельефа. Фиксация их сопровождается ошибками зву-

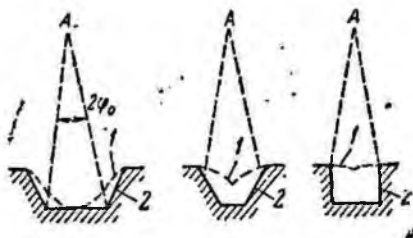


Рис. 83. Схемы влияния звуколокационной аналогии на фиксацию западаний:

1 — искаженный рельеф ошибки аналогии;
2 — фактический рельеф

колокационной аналогии, так как звуколокатор регистрирует расстояния не по оси акустической системы, а до ближайших площадок дна, поверхности которых расположены нормально к падающим на них акустическим лучам и дают отражение, интенсивность которого достаточна для срабатывания индикатора звуколокатора. Появление этих ошибок показано на рис. 83.

Для дражных и карьерных котлованов существенное значение имеет правильная фиксация различного рода откосов (забоя, боковых бортов, отвалов), так как не-

правильное их отображение влечет за собой ошибки в составлении плановографической документации горных работ, в учете движения запасов и потерь.

Для предварительной оценки ошибки звуковой аналогии может быть использована формула Брейна

$$\Delta h = R \sin \frac{\varphi_0}{2} \operatorname{tg} \theta, \quad (68)$$

где R — расстояние от акустической системы до откоса; φ_0 — угол направленности излучателя; θ — угол откоса, град.

Так как формула (68) включает только геометрические элементы (расстояние, углы) и не учитывает физические факторы (интенсивность излучения, чувствительность приема, условия отражения звукового сигнала, то

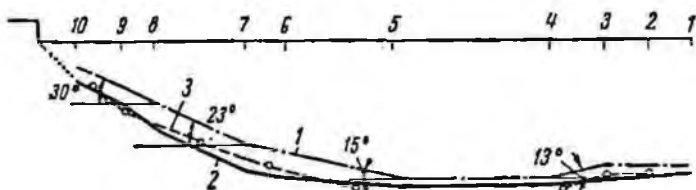


Рис. 84. Звуколокационные профили подводного откоса котлована с учетом ошибок звуколокационной аналогии:

1 — звуколокационный; 2 — по рулеточным измерениям; 3 — построенный с учетом ошибок звуколокационной аналогии

она может быть использована только тогда, когда форма откоса приближается к прямолинейной.

Наиболее рационально использовать графический метод исключения ошибки звуколокационной аналогии с помощью прозрачной палетки с углом раствора, равным углу φ_0 диаграммы направленности излучателя.

Введение поправки звуколокационной аналогии с помощью палетки при угле φ_0 возможно только при равномасштабной эхограмме (вертикальный и горизонтальный масштаб одинаков). В противном случае необходимо принимать соответственно другой угол φ_0 или учитывать его изменение при составлении профиля.

На рис. 84 приведен профиль дна дражного котлована 65-й драги, составленный на основе звуколокаци-

онной съемки и рулеточного промера. Введение поправки звуковой аналогии существенно изменяет линию профиля, что дает возможность повысить качество и точность решения горнотехнических задач по профилю.

Звуколокационная съемка и решение горнотехнических задач. При использовании данных звуколокационной съемки (эхограммы, осциллограммы и др.) можно решать различные горнотехнические задачи. Рассмотрим некоторые примеры такого использования результатов съемки.

1. В 1958—1959 гг. была выполнена звуколокационная съемка на Исовском прииске в районе 25-й драги, где затопленный участок россыпи представлял собой переработанные в прошлом рыхлые металлосодержащие отложения мощностью до 10—11 м, залегающие на известняках. Глубина подтопа полигона до 6 м. Поверхность дна водоема и плотика имела весьма сложную неправильную форму. Рыхлые отложения представляли глинами, илом, суглинками и песком с галькой.

На участке съемки площадью 52 тыс. м² было разбито 28 профилей, по которым производили звуколокационные заезды, и 24 точки наблюдения, в которых укладывали акустические системы на дно. В пределах участка до первой переработки рыхлых отложений было пройдено шесть шурфов. Шурфы в натуре не сохранились, но были отметки плотика, которые использовали для акустических наблюдений. Все звуколокационные работы были выполнены с весельной лодки за три смены. По большинству профилей получены эхограммы с фиксацией дна, плотика и границ раздела рыхлых отложений. Данные по остальным профилям выполнены по точечным наблюдениям с укладкой акустической системы на дно. По данным наблюдений были составлены гипсометрические планы дна водоема и плотика и план изомощностей рыхлых отложений. Применительно к условиям полигона 25-й драги составление графиков имело важное значение, так как после первой переработки россыпи рельеф участка резко изменился, а топографическую съемку и дополнительное шурфование рыхлых отложений не производили. Полученные материалы дают возможность определить объем рыхлых отложений, подлежащих переработке драгой.

Помимо съемки участка, звуколокационные работы были проведены на разведочной линии I—I с тремя старыми шурфами. Необходимо было определить рельеф дна и положение плотика. Звуколокационные наблюдения вели с укладкой акустической системы на дно. В обоих случаях использовали звуколокаторы с самописцами от РЭЛ-1м и ПЭЛ-2 с акустическими системами частотой 14,5 и 10 кГц. Горизонтальное масштабирование эхограмм выполняли засечками или с помощью механического длинмера.

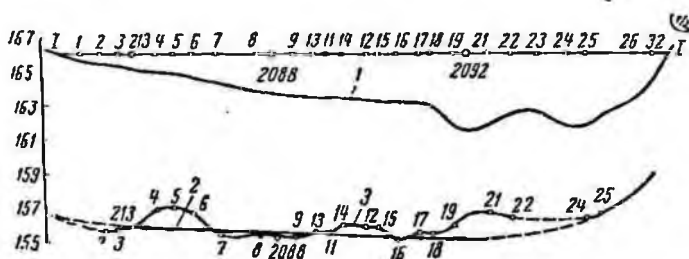


Рис. 85. Профиль плотика:

1 — дно подтопа; 2 — плотик по данным разведки; 3 — плотик по данным акустических наблюдений

В результате обработки полученных материалов были построены по линии I—I профили дна и плотика (рис. 85), по которым была определена мощность рыхлых отложений. Из рисунка видно, что акустический профиль плотика существенно отличаются от сглаженного профиля, построенного по разведочным шурфам. Работы, проведенные на дражном полигоне, свидетельствуют о перспективности метода звуколокации, так как применяемая в настоящее время разведка при помощи выработок связана с большими трудностями и не обеспечивает выявления деталей рельефа плотика.

2. Контроль за илообразованием в дражном котловане имеет важное практическое значение. Подыливание забоя, достигающее значительной мощности, может привести к нарушению нормального режима эксплуатационной драги и снижению ее технико-экономических показателей, так как может наступить момент, когда драга вместо металлоносных песков будет черпать иловые от-

ложения. Примеры такой степени подыливания имели место в Советском Союзе (25-я драга Исовского прииска) и за рубежом (17-я и 20-я драги американской компании «Юба-Консолидейшен Голд-Филдс»). Процесс подыливания наблюдается и на некоторых драгах комбината Лензолото (Мараканская, Ежовская россыпи), где рыхлые отложения содержат большой процент мелких фракций. Из всех существующих методов определения мощности иловых отложений (непосредственный замер, расчетный и др.) наиболее эффективным является звуколокационный.

Для определения контура распространения мощности и объема иловых отложений в котловане 65-й драги была произведена звуколокационная съемка с лодки заездами по заранее намеченным профилям с тахеометрической привязкой. Съемку производили на различных стадиях работы драги и после 7-часовой остановки драги, когда сформировался контур иловых отложений. Параллельно со звуколокационными измерениями по некоторым профилям производили рулеточные промеры.

3. Изучение процесса формирования откосов и определение их углов в котловане во время работы драги особенно при глубоком драгировании также имеет важное практическое значение.

При разработке мощных залежей с глубоким черпанием происходит массовое обрушение верхней части забоя и интенсивное оползание больших масс в основании забоя в виде навалов породы, что вызывает выполаживание откосов и значительный разнос бортов в котловане. Все это отрицательно сказывается на технико-экономических показателях работы драги, а также приводит к перегрузке и аварийности механизмов драги. Поэтому требуется систематический контроль за положением забоя, особенно перед подшагиванием драги. Существующие способы наблюдения за откосами (рулеточные промеры, расчетный и др.) малоэффективны, а иногда и неприемлемы. Звуколокационная съемка откосов имеет преимущества: объективность изображения, непрерывность фиксации профиля и др.

При звуколокационном способе наблюдений за формированием откосов и определении их углов в котлованах 65-й и 116-й драг было намечено более 20 профилей, перпендикулярно расположенных к забоям и боковым

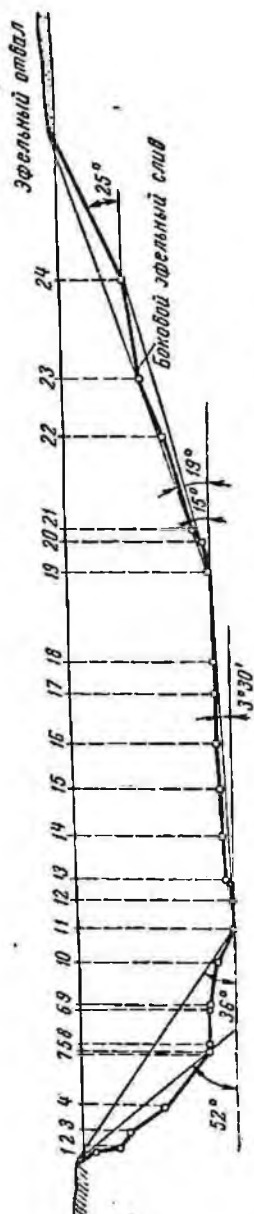


Рис. 86. Продольный профиль котлована, построенный по данным звуколокации

бортам. По профилям производили заезды на лодке со звуколокатором с постоянной скоростью. Привязка осуществлялась тахеометрическим способом. По некоторым сторонам производили также рулеточные промеры, недостаток которых состоял в скольжении груза рулетки по откосу и застревании в иле.

По материалам съемки был составлен план в изоглубинах, на котором наглядно отобразились нижняя бровка забоя и боковых откосов, крутизна откосов, граница распространения илов. Составление плана в изоглубинах особенно рационально тогда, когда звуколокационная съемка произведена по створам, не перпендикулярным простиранию откосов. На основе эограмм и плана были определены заложения откосов забоя и бортов и их высота, а по ним вычислены по всем профилям углы откосов (табл. 13).

Таблица 13

Профиль	Заложение откоса, м	Высота забоя, м	Угол откоса в градусах
a-a	20,5	18,0	43
I-I	15,5	17,9	51
II-II	15,7	17,6	50
III-III	14,3	17,9	52
IV-IV	15,2	18,2	51
—	19,5	18,5	44
II-II	14,8	17,8	51

Из таблицы видно, что наибольшие углы соответствуют

центральной части забоя и находятся в пределах 50—52°. Углы откосов могут быть определены также и графическим способом. Но всегда необходимо учитывать ошибку звуковой аналогии.

На рис. 86 по результатам съемки графически построен продольный профиль котлована 116-й драги от эфельного отвала до забоя.

§ 13. ЗВУКОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОДВОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ КАРЬЕРАМИ

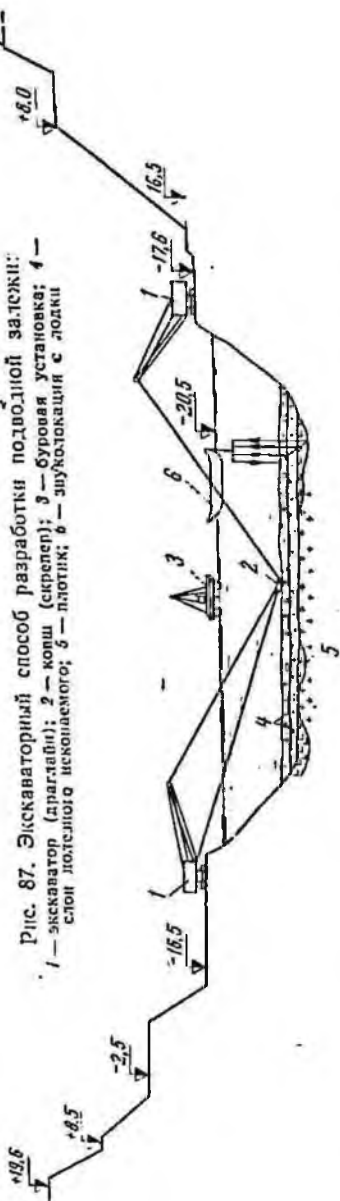
Данный способ разработки подводных месторождений широко применяется при добыче химического сырья, россыпных месторождений, строительных материалов со дна рек, озер, затопленных карьеров и других водоемов.

Рассмотрим применение звуколокации на примере карьерной разработки одного из обводненных месторождений. Верхняя часть месторождения, лежащая выше водопосного горизонта, обрабатывалась обычным карьерным способом, а нижняя — подводным. Подводную часть залежи обрабатывали спаренными экскаваторами, расположенными на противоположных бортах карьера (подводное скреперование) или драглайнами. Буровзрывные работы проводили в основном скважинным способом, буровой станок вращательного бурения устанавливали на понтоне (рис. 87). В результате разработки нижней части образовался котлован значительных размеров и глубины (до 15 м), на дне которого оставалось неотработанное полезное ископаемое (в целике и переложившееся). Контроль за полнотой отработки залежи и съемка подводной части котлована обычным способом малоэффективны и не всегда возможны. Более приемлемым при этом является звуколокационный способ.

Кафедра маркшейдерского дела ЛГИ в 1965—1967 гг. разработала опытные образцы карьерного звуколокатора КЗЛ с широким диапазоном параметров и комплектации. В комплект КЗЛ (рис. 88), сданный для эксплуатации на руднике, входят: основной (центральный) прибор 1, магнитострикционные системы 2, забортное устройство 4, прибор горизонтального масштабирования

Рис. 87. Экскаваторный способ разработки подводной залежи:

1 — экскаватор (драглайн); 2 — ковш (скрепер); 3 — буровая установка; 4 — ствол полезного ископаемого; 5 — плотик; 6 — звукоотражающая с лодки



ния 3, аккумуляторная батарея напряжением 24 В.

Основной прибор. В литом корпусе основного прибора находятся: генератор ударного возбуждения, обеспечивающий мощность импульса 1500 Вт, усилитель с коэффициентом усиления $5 \cdot 10^6$, настроенный на три частоты 10, 15 и 20 кГц, самописец с записью на электростермической бумаге с помощью пера, укрепленного на движущейся ленте.

В приборе имеется динамическая регулировка усилителя, которая улучшает фиксацию границ раздела глубинных донных отложений. Установлена автоматическая оперативная отметка (кроме ручной), позволяющая производить горизонтальное масштабирование эхограмм при равномерном движении плавучих средств.

В приборе находится блок автоматического контроля за вращением барабана самописца со стрелочным индикатором, позволяющий контролировать тарировку прибора, что необходимо при камеральной обработке эхограмм.

Акустические системы магнитоотриксционные цилиндрические на 10—20 кГц с коническими отражателями.

Забортное устрой-

ство для крепления акустических систем на плавучих средствах состоит из патрубка (укрепленного на основании), в который входит штанга с подпятником для крепления акустической системы. Патрубок со штангой скрепляют зажимными винтами. Штанга, на конце которой крепится акустическая система, перемещается вдоль патрубка с лебедкой и тросом пока система не опустится до необходимого горизонта (до дна).

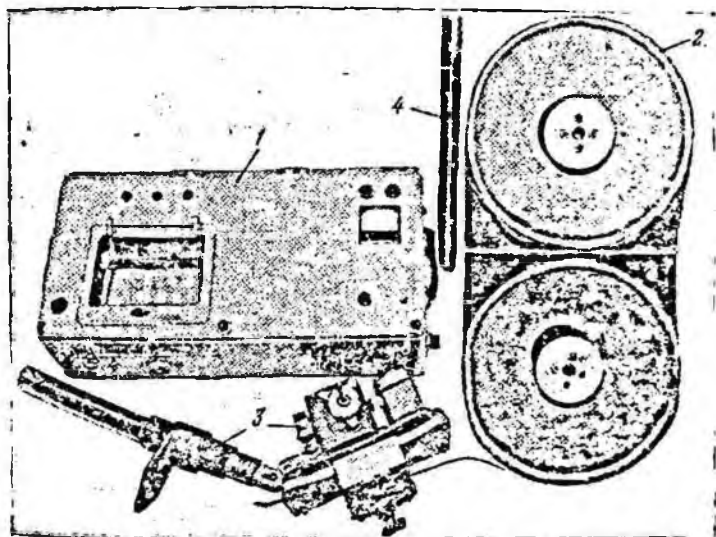


Рис. 88. Комплект карьерного звуколокатора

Прибор автоматического горизонтального масштабирования эхограмм служит для синхронизации перемещения плавучих средств и электротермической бумаги самописца.

При разработке подводной залежи экскаваторами или скреперами звуколокационная аппаратура не может быть установлена на механизмах, осуществляющих добычу и должна быть полностью автономной, причем возникает проблема точной и достаточно оперативной привязки результатов измерений. С учетом этого для КЗЛ разработан блок горизонтального масштабирования с роликовым силовым приводом, который может пе-

ремещать плавучее средство вместе со звуколокатором вдоль направляющего троса, натянутого в котловане съемки (рис. 89). От этого же привода с помощью гибкого вала получает синхронное движение лентопротяжный механизм самописца. Таким образом, при съемке автоматически обеспечивается постоянный горизонтальный масштаб эхограммы и ее пространственная привязка. К основным частям блока горизонтального масшта-

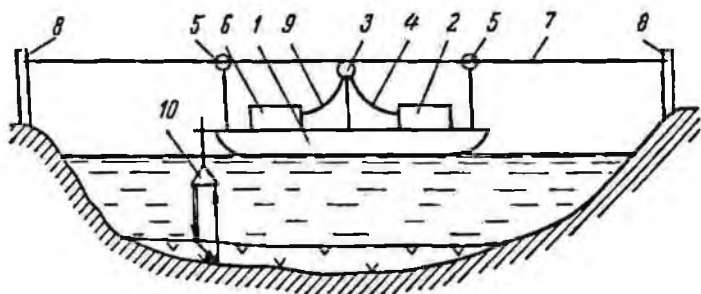


Рис. 89. Схема размещения комплекта КЗЛ на лодке:
1 — плавсредство; 2 — КЗЛ; 3 — механизм горизонтального масштабирования; 4 — гибкий вал; 5 — направляющие стойки; 6 — источник питания; 7 — трос; 8 — катящиеся стойки; 9 — шланг питания механизма горизонтального перемещения; 10 — вибраторы

бирования относятся: реверсивный электродвигатель, силовой редуктор, блок рабочего шкива, направляющие стойки, редуктор протяжки эхограммы, гибкий вал, трос.

При производстве звуколокационной съемки подводной части карьера комплект аппаратуры устанавливают на весельной или моторной лодке. Заезды со звуколокатором производят в намеченных направлениях с обеспечением горизонтального масштабирования эхограмм одним из трех способов: по отмеченным вехам (буйкам) профиля, тахеометрической привязкой, по прибору горизонтального масштабирования. Во всех случаях (особенно в первых двух) необходимо соблюдать равномерное передвижение плавучего средства.

В результате съемки на эхограммах отражаются различные стадии обработки залежи. На эхограмме, полученной после проведения взрывных работ, четко фиксируются два слоя донных отложений. Первый слой (с верхней горизонтальной границей) представляет собой

полезное ископаемое, находящееся во взвешенном (разжиженном) состоянии. Второй слой состоит из взорванной массы полезного ископаемого, лежащей на плотике.

На рис. 90 показана эхограмма звуколокационной съемки во время продолжительной остановки экска-

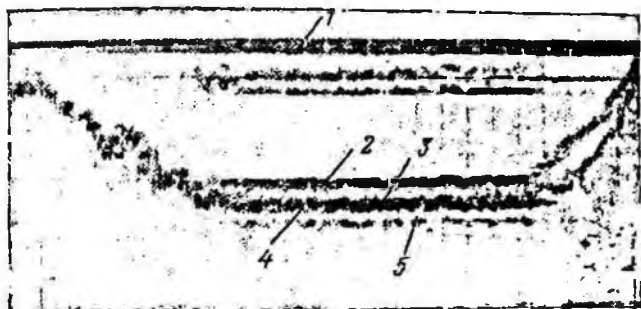


Рис. 90. Эхограмма после длительной остановки экскаватора:

1 — поверхность воды; 2 — осевший слой пла; 3 — слой взорванной массы; 4 — слой не взорванной массы; 5 — плотик

тора, когда механические взвеси осели и на эхограмме зафиксировались три слоя: слой осевших взвесей, слой взорванной массы, слой невзорванного полезного ископаемого и плотика. Важное значение имеет оперативный контроль за работой экскаватора. На рис. 91 представлена эхограмма, отражающая полноту отработки экскаваторных заходок. На эхограмме видно, что в правой части котлована полезное ископаемое почти полностью отработано, а в левой части — подлежит отработке.

На эхограмме (рис. 92) записан продольный профиль дна котлована одного из карьеров, где зафиксировались неравномерная разработка зале-

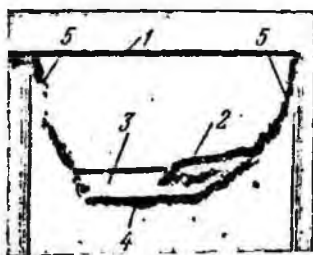


Рис. 91. Эхограмма контроля за полнотой отработки:

1 — поверхность воды; 2 — неотработанные полезные ископаемые; 3 — отработанная часть; 4 — плотик; 5 — борт котлована

жи по глубине 2 и значительные целики между заходками экскаватора 1.

Имея такого рода эхограммы, можно охарактеризовать состояние подводных горных работ (рельеф, по-

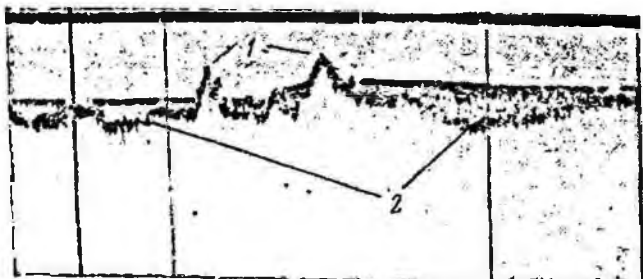


Рис. 92. Эхограмма продольного профиля котлована

ложение границ разработки, бровки), форму откосов, глубину черпания, границы раздела слоев донных отложений, осуществлять контроль за полнотой отработки, а также решать другие горнотехнические задачи.

§ 14. ПРИМЕНЕНИЕ ЗВУКОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОРСКИХ ЗАЛЕЖЕЙ

В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом все большее развитие получает добыча полезных ископаемых со дна морей и океанов. Это связано с дефицитом некоторых полезных ископаемых. Кроме того, добыча полезных ископаемых на суше становится более трудоемкой и малоэкономичной. В то же время побережья морей (шельф) хранят несметные минеральные богатства в виде морских россыпей, содержащих в промышленных масштабах олово, золото, редкоземельные и другие важные элементы. Возможно также наличие коренных месторождений, покрытых осадками и морской водой.

При разработке подводных россыпей резко сокращаются капитальные затраты и сроки ввода в эксплуатацию предприятий (плавучих агрегатов).

В 1969 г. кафедра маркшейдерского дела ЛГП совместно с кафедрами геофизических методов разведки и геодезии проводила работы по теме «Исследование возможности применения звуколокации, микросейсмики и

радиодальнометрии при подводной добыче полезных ископаемых в условиях дальневосточных морей».

Опытно-экспериментальные работы проводили в Хасанском районе Приморского края в бухтах «Экспедиция» и «Рейд Полады». Донные отложения бухты состоят из мелкозернистого (сверху) и крупнозернистого (ниже) песка. Общая мощность рыхлых отложений достигает до 15 м. Подстилающей породой является мощный слой плотного ила.

Как известно, при разработке месторождений, находящихся на дне моря, возникает важная задача изучения рельефа дна, донных отложений и геометрических параметров горных выработок с целью контроля за полнотой отработки полезного ископаемого, маркшейдерского учета добычи и составления плано-графической документации горных выработок. Обычные способы съемки (рулеткой, лотом и др.) указанных объектов непригодны.

Для выполнения экспериментальных работ в 1969 г. была использована ранее разработанная аппаратура ТПЗ и КЗЛ.

При проведении работ в бухтах были намечены профили. Каждый профиль был отмечен буями и привязан радиогеодезическим способом. По профилям проводили заезды на плавучем средстве, на котором была размещена и работала различная аппаратура — звуколокационная, радиометрическая и магнитная. Работали одновременно два звуколокатора — высокочастотный (ТПЗ) и низкочастотный (КЗЛ). Волнение водной поверхности достигало двух-трех баллов. Скорость движения плавучих средств была постоянной на протяжении всего профиля и составляла примерно 15 км/ч.

В результате звуколокационной съемки получена серия эхограмм, отражающих характер поверхности дна и границы расслоения донных отложений. С помощью ТПЗ были зафиксированы с высокой четкостью и решающей способностью все высотные изменения дна. Такого рода запись дна, кроме основного назначения, является дополнительной информацией для геофизических методов разведки (магнитной, радиометрической и др.), объясняющей аномальные места по профилю из-за резкого изменения рельефа дна.

На эхограмме (рис. 93), записанной звуколокатором КЗЛ с низкочастотными вибраторами, в отличие от эхограммы, зафиксированный ТПЗ, кроме поверхности дна зафиксировались границы между толщей непосредственных донных отложений и подстилающих пород (плотик). Причем мощность донных отложений составила около 8 м, что хорошо согласуется с разведочными

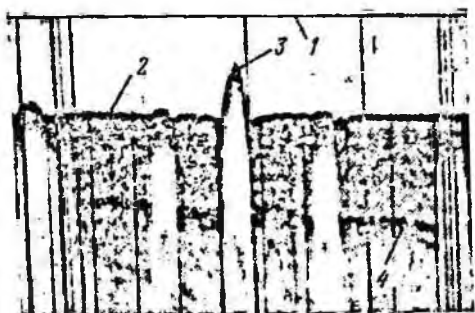


Рис. 93. Эхограмма фиксации морского дна и донных сложенных:

1 — поверхность воды; 2 — дно; 3 — банка;
4 — плотик

данными. По характеру записи на эхограмме поверхности дна можно отличить обычное изменение рельефа дна от неровностей, связанных с наличием инородных объектов (банки, валуны и др.). От таких объектов происходит почти полное отражение звука.

Фиксация слоев донных отложений дает возможность контролировать полноту обработки подводных залежей.

На характере записи поверхности дна сказывается волновая качка плавучих средств с преобразователями, под влиянием которой на эхограмме появляются пилообразные выбросы.

Наряду со звуколокационной съемкой проводили исследования влияния угла падения на уровень отраженного сигнала и на степень трансформации фронтов первого отраженного сигнала скорости распространения звука в горных породах. Работы проводили на экспериментальном профиле с относительно ровным песчаным дном. В результате работ выявлено, что уровень первого

отраженного сигнала при данных условиях меняется весьма незначительно (2—5%). Такую флуктуацию частично можно отнести за счет неравномерности амплитуды посылочного сигнала. В то же время наблюдалось изменение амплитуды отраженного сигнала в 1,5—2 раза, что можно объяснить колебаниями плавучих средств.

При изменении угла падения от 0 до 50° уровень отраженного сигнала менялся до 40%. Следовательно, при работе с высокочастотными ТПЗ ($f=140$ кГц) в основном преобладает диффузное отражение от донной поверхности.

Зависимость длительности фронтов сигнала от угла падения была незначительной (табл. 14).

При дальнейшем увеличении угла падения длительность сигнала значительно возрастает (до 6—8 мс) и форма его усложняется, что можно объяснить интерференцией принятых сигналов с различных участков пятна облучения, размеры которого на донной поверхности при увеличении угла резко возрастают.

В результате проведенных экспериментальных звуколокационных работ в Приморье и других районах выявлена возможность фиксации изменений рельефа дна и подводных горных работ с высокой разрешающей способностью при глубине водной среды от 0,5 до 60 м с помощью высокочастотного звуколокатора ТПЗ. С этой же целью можно также успешно использовать звуколокатор КЗЛ, имеющий рабочую частоту излучения 10 и 15 кГц. Несмотря на некоторое снижение разрешающей способности съемки геометрических параметров подводных горных работ, с помощью КЗЛ можно фиксировать недоработку слоев полезного ископаемого и тем самым контролировать полноту отработки залежи.

Установлено также, что с помощью КЗЛ в благоприятных условиях могут фиксироваться границы раздела в донных отложениях на глубине до 8—10 м с высокой разрешающей способностью. В 1968 г. ВИТРОм проводились звуколокационные работы на титано-циркониевых россыпях в Рижском заливе с помощью ЗГЛ-1. В ре-

Таблица 14

Угол падения, град	Длительность, мкс		
	фронта	спада	сигнала
0	150	200	1101
50	200	250	1100

зультате был отбит плотик из мелкозернистых продуктивных песков мощностью до 3 м, составлена плано-графическая документация, характеризующая условия залегания россыпи и плотика. Учитывая, что многие горные породы в донных отложениях характеризуются большой величиной затухания и отражения звуковых колебаний (крупнозернистый песок, галька, ракушняк и др.), для зондирования больших глубин донных отложений необходимо спускаться в область низких частот (1—5 кГц), обладающих более высокой проникающей способностью по сравнению с высокими частотами. В то же время при переходе к низким частотам возникают осложнения, связанные с резким увеличением размеров и веса магнитострикционных акустических систем.

Перспективными являются электрогидравлические, индукционные, газовые и пневматические датчики, но при их применении значительно увеличиваются размеры и вес комплекта аппаратуры, а также снижается разрешающая способность.

В настоящее время в СССР и за рубежом создаются звуковые геолокаторы, предназначенные для изучения глубинных геологических структур и маркирующих горизонтов морского дна. Примером может служить создание геолокатора ЗГЛ-3, с помощью которого в сложных сейсмогеологических условиях Балтики получена глубинность до 500 м, а при испытании на Черном море глубинность по породам составила 1—1,5 км при энергии генератора импульсных токов (ГИТ) 10 кДж. Серийный геолокатор ЗГЛ-3 имеет ГИТ на 0,5—40 кДж. Разрешающая способность благодаря применению в ЗГА-3 двух отдельных усилительно фильтрующих цепей составляет на малых глубинах локации 3—4 мс, на больших 12—16 мс. В настоящее время ВИТР работает над созданием ЗГЛ-5Р, в котором применен многоэлектронный электрогидравлический излучатель с еще более высокой разрешающей способностью [23]. Все это создает перспективу для эффективного изучения россыпных месторождений полезных ископаемых, залегающих в верхних слоях морского шельфа. Таким образом наряду с работой над новыми принципами возбуждения колебаний, обеспечивающих большую глубинность локации, продолжаются исследования и в области повышения разрешающей способности мощных геолокаторов.

Мало исследованными являются и вопросы плановой привязки геологоразведочных и горных работ на больших акваториях.

В то же время развитие поисково-разведочных работ и разработки месторождений полезных ископаемых дна морей и океанов требует выполнения значительного объема плановой привязки для картирования этих работ. Решение поставленной задачи обычными методами с применением оптических инструментов невозможно из-за сложных метеорологических условий и больших расстояний визуирования.

Одним из способов, позволяющих автоматически и непрерывно определять плановое положение движущихся (постоянных) объектов, является радиогеодезический метод. Однако применение таких систем для привязки плавучих средств на больших акваториях требует исследования вопросов, относящихся к условиям распространения коротких радиоволн, определения рабочей скорости их и т. д. Особо важным является изучение влияния качки плавучих средств на взаимное ориентирование станций дальномера.

Для проведения экспериментальных работ в Приморье кафедрой геодезии ЛГИ был выбран радиодальномер РДГ, серийно выпускаемый в СССР, точность измерений расстояний которым определяются по формуле

$$m_R = \pm (5 + 3 \cdot 10^{-6} R), \text{ см}, \quad (69)$$

где R — измеряемое расстояние.

Экспериментальная проверка влияния качки судна на устойчивость радиодальномера РДГ производилась на озере Вышегородской геодезической базы ЛГИ (Псковская обл.) и в бухте «Экспедиция» в Приморье. Расстояние, измеренное на одной несущей частоте, составило 2101,6 м. При снятии отсчетов судно раскачивалось в пределах $\pm 15 \div 20^\circ$, однако это не влияло на устойчивость измерительной окружности и разрыва. Ошибка измерения расстояния составила $\pm 0,5 \div 0,6$ м. При проведении экспериментальных работ в бухте «Экспедиция» предварительно была создана геодезическая основа, необходимая для привязки локационных и разведочных работ.

Результаты измерений длины с помощью РДГ в районе бухты приведены в табл. 15.

На основе пунктов триангуляции с помощью РДГ была произведена съемка буев, отмечающих разведочно-геофизические работы в бухте. При этом ведущую станцию устанавливали на моторной лодке, а ведо-

Таблица 15

Сторона	Горизонтальное продолжение	Ошибка измерения, см
П. Краббе — п. 6901	2589,18	± 3
П. 6901 — п. 6902	4597,44	± 7

мые — на базисных путях. Лодку ставили на якорь около буя и снимали отсчеты по экрану электронно-лучевой трубки ведущей станции на частотах A , B , CD и A . Расстояние до двух точек измерялось поочередно, оценка разрешения многозначности производилась на месте. Время, затрачиваемое на определение планового положения буя, составило в среднем 10—15 мин. Ориентирование антенны ведущей станции на ведомые производилось в пределах 20—30°, однако это не нарушало устойчивости измерительной окружности. Поскольку моторная лодка имела небольшие размеры, то крен достигал 20°, однако он не влиял на устойчивость определений измерительной окружности радиодальномера.

Для обработки результатов съемки буев была определена рабочая скорость распространения электромагнитных волн над морем, которая оказалась равной 0,1498428 м/Н·с. Максимальное отклонение частного значения скорости распространения от среднего не превышало $1 \cdot 10^{-6}$ м/Н·с, что привело к погрешности измерения расстояний до 10 км около $\pm 0,1$ м.

Таким образом, экспериментальными работами установлена возможность применения радиодальномера дециметрового диапазона для определения планового положения судна, удаленного от берега на расстояние до 5 км. Инструментальная погрешность измерения расстояний при этом не превышает ± 1 м. На устойчивость работы радиодальномера не оказывает влияния

волнение поверхности моря и рыскание судна в пределах 20—30°.

Чтобы осуществлять непрерывный контроль планового положения движущегося судна, одного комплекта РДГ недостаточно. При этом целесообразно применять радиогеодезические системы, работающие в диапазоне дециметровых волн, РДС, «Гидродист», «Автотет» и др. Эти системы обеспечивают определение планового положения перемещающегося объекта с ошибкой не более $\pm 1 \div 1,5$ м. Для обеспечения привязки геологоразведочных и горных работ при разработке месторождений дна моря на больших расстояниях может применяться фазовая радиогеодезическая система «Поиск», которая имеет дальность действия до 170 км и точность определения планового положения $\pm 10 \div 15$ м. Поскольку система работает в варианте фазового зонда, то возможно одновременное определение положения нескольких подвижных объектов.

§ 15. ЗВУКОЛОКАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ПРОКЛАДКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ДНУ ВОДОЕМА

В настоящее время в строительной технике все чаще возникает задача возведения подводных сооружений: хранилищ, отстойников, опор, магистральных трубопроводов и др. В связи с этим появляется необходимость автоматической с достаточной точностью фиксации этих подводных объектов. Наиболее эффективным методом в этом случае является звуколокационный (гидроакустический).

Рассмотрим применение звуколокации на примере прокладки магистральных трубопроводов по дну водоема. В настоящее время использование газового топлива в народном хозяйстве СССР занимает важное место. Магистральный газопровод большой протяженностью и значительного диаметра (от 500 до 3000 м), прокладываемый от месторождения к потребителю, пересекает многочисленные водные преграды — водохранилища, морские заливы, реки, озера, протоки, старицы и пр.

Основным мероприятием, предохраняющим подводный трубопровод (дюкер) от повреждения, является

достаточное его заглубление в дно водоема. Важное значение при этом имеет разработка траншей с оптимальными параметрами, удовлетворяющими требованиям надежности и экономичности. При этом соблюдение поперечных и продольных профилей траншей в пределах проектных норм обеспечивает высококачественное выполнение перехода, безопасность и надежность его эксплуатации.

В табл. 16 приведены характеристики поперечных сечений траншей, разработанных управлением подводно-технических и строительных работ.

Таблица 16

Размер	Ширина дна траншей, м	Ширина траншей по дну водоема, м	Глубина траншей, м	Угол откоса траншей в градусах
Минимальный	1,5	1,5	1	11
Максимальный	10	50	8	90

Контроль за геометрическими параметрами траншей в настоящее время осуществляется простыми промерами глубины с плавучих средств обычными лотами с тросами, мерными лентами, рейками, футштоками, металлическими трубами, а также водолазами. Иногда на земснарядах применяют измерители глубины отработки, кинематические связанные с механизмом опускания рабочей стрелы.

Однако приведенные выше способы имеют существенные недостатки: прогиб и снос мерного прибора под напором воды, неконтролируемое погружение прибора в грунт и соскальзывание с бортов траншей при большой их крутизне, непроизводительность замеров и связанная с этим практическая невозможность производства большого числа замеров по каждому профилю. Применение серийных ручных эхолотов для контроля геометрических характеристик траншей не дает положительных результатов вследствие малой направленности действия. Подводное телевидение позволяет производить лишь обозрение отдельных участков траншей и не дает представления о геометрических параметрах их.

Первая попытка применения ультразвукового лока-тора для съемки подводных траншей была предпринята кафедрой маркшейдерского дела ЛГИ в 1966 г. Тогда была произведена съемка траншей магистральных трубопроводов через реки Урал и Волгу карьерным звуколокатором (КЗЛ) с магнитострикционным излучателем на частоте 22 кГц. При малой ширине траншей, находящейся на большой глубине, на основной профиль накладывался ложный, что затрудняло чтение эхограммы. Борты же траншей регистрировались с большими искажениями и нечетко. Это связано с ошибкой аналогии, вызываемой недостаточной направленностью излучаемой акустической энергии. В результате анализа материалов съемки траншей, а также проведения экспериментальных исследований были определены оптимальные электроакустические параметры для создания специального траншейного звуколокационного профилографа (ТПЗ).

В 1968 г. был создан такой прибор и передан заказчику для эксплуатации (рис. 94). В комплект ТПЗ входят: центральный прибор 1, включающий самописец, усилитель, генератор и блок питания; блок преобразователя напряжения 2; акустическая система 3 и забортное устройство.

Пьезокерамическая акустическая система, рассчитанная на рабочую частоту 140 кГц, обеспечивает высокую направленность действия ($\Phi_{0,7} = 2^\circ 20'$). Акустическая система связана с забортным устройством шарнирно. Оси вращения шарниров расположены взаимно перпендикулярно, что позволяет значительно ослабить влияние бортовой и килевой качки на отклонение продольной оси приемонизлучателя от вертикали. Усиленный тракт звуколокатора был выполнен по схеме с преобразованием частоты, что дало возможность повысить усиление отраженных сигналов до $20 \cdot 10^6$ и производить записи контура при небольшой излучаемой мощности. Для записи профилей траншей применен стандартный самописец барабанного типа с диапазоном записываемых глубин 0—40 м в масштабе 1:100. Средняя ошибка измерения около 1,5%.

При испытаниях прибора в производственных условиях была произведена съемка траншей для перехода через реки Урал, Волгу, Каму, Неву, Оку и залив

Каспийского моря. Привязка поперечных сечений к осевому створу перехода осуществлялась при помощи теодолита. Для горизонтального масштабирования эхограмм и определения пространственного положения профилей на одном из берегов (на обоих берегах) реки разбивались три створа: один по оси траншеи и два

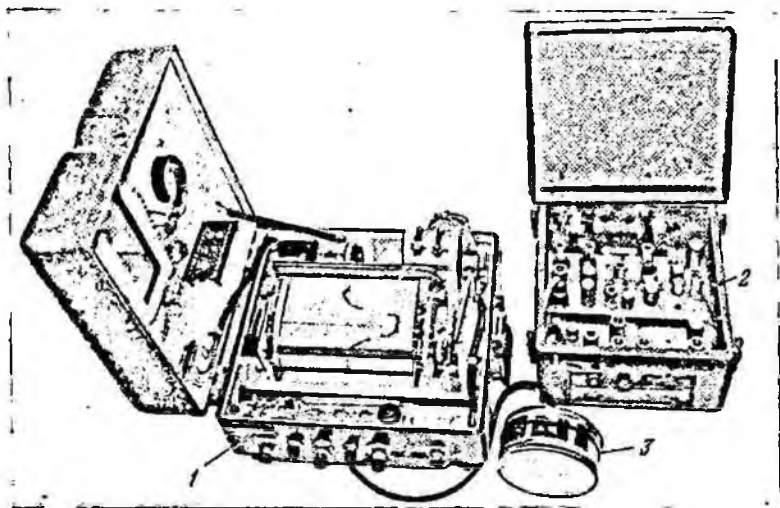


Рис. 94. Комплект траншейного эхолокатора профилографа ТПЗ

боковых на расстоянии 15 м от осевого. В местах съемки поперечных сечений траншеи выставлялись буйки, положение которых определялось методом прямых засечек теодолитом берегового базиса. Лодка с локатором, равномерно перемещаясь по течению, пересекала все три установленных створа. Моменты пересечения створов осью акустической системы фиксировались на эхограммах в виде вертикальных оперативных отметок. Если водная преграда не превышает 400—500 м, привязку профиля осуществляют тахеометрическим или мензульным способом с точек рабочего обоснования, расположенных на берегу. При этом определяют три точки профильной линии: начала и конца заезда (отстоящих на 15—20 м от оси траншеи), оси траншеи по рейке, совмещенной с осью акустической системы.

Связь берегового наблюдателя с судном осуществляется с помощью портативной радиостанции (радиостанции) или сигнальных флажков. При таком способе привязки предполагается равномерное движение плавучих средств по всему профилю. При производстве работ на больших акваториях (водохранилищах, морских заливах и т. д.) наиболее совершенным и перспективным способом горизонтальной привязки профилей является



Рис. 95. Эхограмма поперечных профилей траншеи, записанная ТПЗ

радиодальномерный. Эхограмма с образцом записи поперечных профилей траншеи ТПЗ приведена на рис. 95. На эхограммах четко зафиксировались: дно 4, контуры траншеи 1, нулевая линия 2 и линии оперативной отметки 3, что обеспечивает получение надежных данных о траншеях. Вертикальные размеры траншей легко получить по эхограммам измерением расстояний от поверхности воды до интересующих мест траншей и умножением полученных замеров на вертикальный масштаб. Отсчет показаний берут по внутренней кромке профиля.

Продольный профиль подводной траншеи строят графически в выбранном масштабе по отметкам траншеи, полученным по эхограмме поперечных профилей. Число записанных галсов выбирают, исходя из условий требуемой степени приближения построенного продольного профиля к натурному. Для его построения требуются лишь отметки дна траншеи, поэтому запись полных поперечных профилей не обязательна. Достаточно

произвести запись дна траншеи в местах пересечения галсов с осевым створом траншеи, что значительно сократит время записи.

На рис. 96 приведены продольные профили разработанной части траншеи — проектный и построенный по записанным поперечникам. Построение продольного профиля позволяет сравнить его с проектным и выявить реальные уклоны. Если плавучие средства с ло-

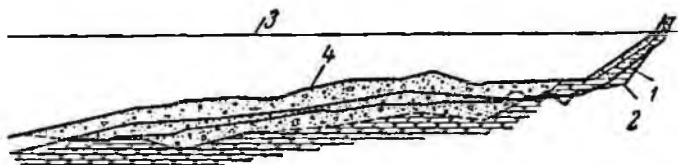


Рис. 96. Продольный профиль перехода:

1 — дно траншеи по проекту; 2 — дно траншеи по поперечникам, снятым ультразвуковым профилографом; 3 — уровень воды; 4 — дно водоема

котором могут проследовать непосредственно по линии продольной оси (между осевыми буйми, вдоль растянутого троса), то с помощью ТПЗ можно зафиксировать непрерывный продольный профиль траншеи.

Звуколокатор ТПЗ может быть использован как для съемки с целью общего контроля готовой траншеи, так и с целью технологического контроля в процессе разработки траншеи земснарядом (землечерпалкой). В последнем случае звуколокатор устанавливается на земснаряде, а его акустическая система должна равномерно перемещаться при помощи двигателя (вручную) за кормой над траншеей по направляющим или разворотом кормы. В результате могут быть записаны контрольные поперечные профили траншеи в процессе ее углубления и при необходимости подсчитан объем отработанного грунта для определения производительности земснаряда. Контроль за положением дюкера, уложенного в траншею до засыпки, может быть осуществлен аналогичным образом с записью на эхограмму контура поперечного сечения (рис. 97).

В заключение следует отметить, что применение ультразвукокации для контроля подводно-технических сооружений повышает качество подводных работ,

снижает их себестоимость, значительно упрощает точность проводимых измерений.

Для дальнейшего усовершенствования звуколокатора необходимо решить вопросы, связанные с продоль-

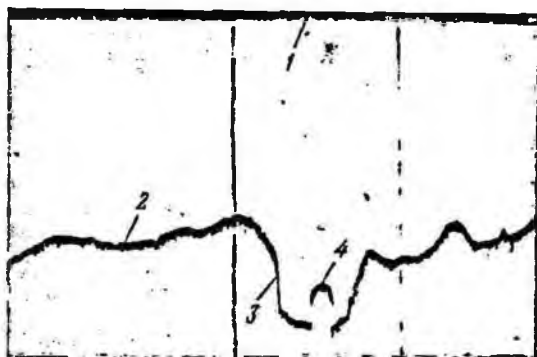


Рис. 97. Эхограмма фиксации дюкера в траншее:
1 — поверхность воды; 2 — дно водоема; 3 — траншея;
4 — дюкер

ным профилированием траншей, определением мощности слоя породы засыпки дюкера, автоматизацией привязки звуколокационных профилей (особенно на больших акваториях), необходимой для определения их пространственного положения и горизонтального масштабирования эхограмм. Над решением этих задач продолжает работать коллектив лаборатории ультразвука Ленинградского горного института Г. В. Плеханова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические ошибки звуколокационных измерений.— В кн.: Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых. Л., Госгортехиздат, 1963. («Записки ЛГИ им. Г. В. Плеханова», т. XLVI, вып. 2). Авт.: В. Б. Аранович, А. А. Гурич, Г. А. Кротов и др.
2. Аранович В. Б. Прибор для съемки подземных камер. Изв. вузов, «Горный журнал», 1965, № 9.
3. Аранович В. Б., Гурич А. А. К вопросу об ошибках звуколокационной аналогии. Изв. вузов, «Горный журнал», 1965, № 12.
4. Аранович В. Б., Гурич А. А., Чумаков В. К. О дальности действия звуколокатора для маркшейдерской съемки шахтных стволов и технических скважин. Изв. вузов, «Горный журнал», 1967, № 6.
5. Аранович В. Б., Чумаков В. К. Ультразвуковой локаатор «Донецк». Изв. вузов, «Горный журнал», 1970, № 11.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., Изд-во Иностран. лит., 1957.
7. Булатова Ж. М., Волкова Е. А., Дубров Е. Ф. Акустический каротаж. Л., «Недра», 1970.
8. Быков И. И. и др. Гидроакустический каверномер «Профиль-2», ультразвуковой гидроакустический каверномер «Контур», методика и техника разведки, ОНТИ ВНИИ, № 70, Л., 1970.
9. Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М., Изд-во иностран. лит., 1961.
10. Гулий В. М., Милкин А. В. Совершенствование системы разработки с бетонной и гидравлической закладкой на Текеллийском руднике.— «Горный журнал», 1966, № 8.
11. Гурич А. А., Чумаков В. К. Звуколокатор «Донецк» для съемки технических скважин.— «Цветная металлургия», 1968, № 21.
12. Гурич А. А. Маркшейдерский контроль формы и размеров подземных камер выщелачивания через буровые скважины с поверхности. В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Л., 1969. (Труды Всесоюз. науч.-исслед. маркшейдерского ин-та, сб. LXXII).
13. Гурич А. А. Учет рефракции при звуколокационных съемках горных выработок. — В кн.: Маркшейдерское дело, геодезия. Л., «Недра», 1969. («Записки ЛГИ им. Г. В. Плеханова», т. LIX, вып. 1).

14. Гурич А. А., Меркулова В. М. Расчет дальности и оптимальных частот при звуковой локации в маркшейдерских работах.— В кн.: Маркшейдерское дело, геодезия. Л., «Недра», 1969. («Записки ЛГИ им. Г. В. Плеханова», т. LIX, вып. 1).

15. Дубров Е. Ф. Звуковая геолокация. М., «Недра», 1967.

16. Иванцов О. М. Подземное хранилище углеводородных газов. М., Гостоптехиздат, 1961.

17. Иофе В. К., Ямпольский А. А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М., Госэнергоиздат, 1954.

18. Применение звуколокации в горном деле.— «Горный журнал», 1962, № 6. Авт.: Д. А. Казаковский и др.

19. Казаковский Д. А., Руднев Л. Н., Прудов Н. А. Звуколокационная съемка глубоких вертикальных рудоспусков и недоступных очистных камер. Изв. вузов, «Горный журнал», 1968, № 5.

20. Казаковский Д. А., Кротов Г. А., Ульянцев А. М. Применение звуколокации при разработке подводных залежей месторождений полезных ископаемых. Изв. вузов, «Горный журнал», 1968, № 4.

21. Казаковский Д. А., Руднев Л. Н., Прудов Н. А. Звуколокационная съемка недоступных горных выработок в воздушной среде.— В кн.: Вопросы маркшейдерского дела. Белгород, 1969 (ВНГОЕМ).

22. Казаковский Д. А., Кротов Г. А., Ульянцев А. М. Применение звуколокационной съемки при прокладке магистральных газопроводов по дну водоемов.— В кн.: Маркшейдерское дело. Л., «Недра», 1969. («Записки ЛГИ им. Г. В. Плеханова», т. LIX, вып. 1).

23. Маркшейдерское дело, ч. II, М., «Недра», 1970. Авт.: Д. А. Казаковский, Г. А. Кротов, В. Н. Лавров и др.

24. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны. М., Физматгиз, 1960.

25. Кротов Г. А. Использование результатов звуколокационной съемки для определения потерь при дражных разработках россыпей. Изв. вузов, «Горный журнал», 1963, № 3.

26. Кротов Г. А. Ультразвук и пути его применения в маркшейдерском деле.— В кн.: Маркшейдерское дело. Л., Углетехиздат, 1958. («Записки ЛГИ им. Г. В. Плеханова», т. XXXVII, вып. 1).

27. Кротов Г. А. Применение звуколокации при решении горномаркшейдерских задач. В кн.: Геоакустика. М., «Наука», 1966 (АН СССР, Ин-т физики Земли).

28. Кротов Г. А., Пацев Н. П. Накопление в глубоких дражных разрезах и его влияние на маркшейдерские замеры глубины отработки.— «Колыма», 1964, № 4.

29. Кротов Г. А. Применение звуколокации для съемки дражных полигонов. Л., 1966. (Всесоюз. науч.-исслед. маркшейдерский ин-т).

30. Кулле П. А. Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием. Л., Госхимиздат, 1949. («Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии, вып. XX).

31. Кулле П. А. Строительство скважин с гидровзрывом. Л., Госхимиздат, 1955. («Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии, вып. XXX).

32. Левин С. И. Проектирование и строительство подводных трубопроводов. М., Гостопиздат, 1961.

33. Лейбензон Б. И. Ультразвуковая локация в горном деле. М., «Недра», 1968.

34. Меркулова В. М., Васильев Е. А. Измерение акустического поглощения в горных породах способом изгибных колебаний. Изв. АН СССР, серия «Физика Земли», 1967, № 4.

35. Михайлов И. Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М.—Л., Изд-во научно-технической литературы, 1949.

36. Петров М. Е., Руднев Л. Н. К оценке дальности звуколокации в воздухе.—В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ, Л. «Наука», 1966. («Труды Всесоюзн. науч.-исслед. маркшейдерского ин-та, сб. 58).

37. Прудов И. А., Шеховцов Г. А. Звуколокационный профилограф ЗПР-2Н для съемки недоступных крутопадающих очистных камер.—Бюлл. «Цветная металлургия», 1966, № 8 (Ин-т Цветметинформация МЦМ СССР).

38. Прудов И. А. О выборе схемы коммутатора в одновибраторном звуколокаторе.—В кн.: Маркшейдерское дело, геодезия. Л., 1969. («Записки ЛГИ им. Г. В. Плеханова», т. LIX, вып. 1).

39. Прудов И. А. Звуколокационный профилограф ЗПР-О для маркшейдерского контроля глубоких вертикальных рудоспусков.—В кн.: Совершенствование геолого-маркшейдерской службы на предприятиях цветной металлургии. М., 1970 (Ин-т Цветметинформация МЦМ СССР).

40. Пятлин М. П., Аранович В. Б., Руднев Л. Н. О возможности контроля заполнения складов асбеста с помощью звуколокации. Изв. вузов, «Горный журнал», 1962, № 5.

41. Руднев Л. Н. Исследования ультразвукового профилографа УЗП-3 для шахтных стволов и пути его усовершенствования.—В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Л., 1963 (Всесоюзн. науч.-исслед. маркшейдерский ин-т, сб. 50).

42. Руднев Л. Н. Звуколокационная съемка рудоспусков Алтын-Топканского рудоуправления.—В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Л., 1963. (Всесоюзн. науч.-исслед. маркшейдерский ин-т, сб. 50).

43. Руднев Л. Н., Тимашев В. И. Причины разрушения стенок глубоких рудоспусков и выбор места их заложения.—«Горный журнал», 1964, № 5.

44. Руднев Л. Н., Шеховцов Г. А. Состояние и возможные пути развития маркшейдерских методов съемки недоступных очистных камер.—В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Л., 1966. (Всесоюзн. науч.-исслед. маркшейдерский ин-т, сб. 62).

45. Терентьев С. М., Прудов И. А., Пасюгин Н. И. Опыт применения новых приборов для съемки недоступных пустот на Текелийском руднике.—В кн.: Совершенствование геолого-маркшейдерской службы на предприятиях цветной металлургии. М., 1971. (Ин-т Цветметинформация МЦМ СССР).

46. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. М., «Судостроение», 1966.

47. Федоров И. И. Курс кораблевождения. Т. V. М., «Судостроение», 1960.

48. Федюкин В. А. Проходка шахтных стволов и скважин бурением. М., Углетехиздат, 1959.

49. Физические основы подводной акустики (пер. с англ.). М., «Советское радио», 1955.

50. Чумак В. К. Маркшейдерский контроль при бурении и креплении технических скважин и стволов. Изв. вузов, «Горный журнал», 1968, № 11.

51. Шишков Д. В. История развития и современное состояние техники бурения стволов шахт и скважин большого диаметра.— «Шахтное строительство», 1962, № 9.

52. Chisholm I. P. and Petterson G. D. Sonar Caliper Simplus L. P. G. Storage Surveys. The Petroleum Eng., v. 30. 1958, N 1 (v. 31, 1959, N 9).

53. Crosman M., Kokesh T., Majani P. A Sonis method for analyzing the quality of cementation of borehole casings of Petroleum Technology, v. 13, 1961, N 2.

54. Jahs D. F. Formation Strength in Salt Cavern. Storage. The Petroleum. Eng., v. 29, 1957, N 8.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Физические основы звуколокации	5
§ 1. Параметры звукового поля и принцип звуколокационных измерений	5
§ 2. Распространение звука в горных выработках	22
§ 3. Излучатели и приемники ультразвуковых сигналов	39
§ 4. Регистрация результатов измерений	52
§ 5. Приемопередающий тракт локатора	56
§ 6. Источники ошибок звуколокационных измерений	61
Глава II. Звуколокация в воздушной среде	73
§ 7. Съёмка глубоких вертикальных рудоспусков	73
§ 8. Звуколокационная съёмка очистных камер	99
§ 9. Съёмка подземных пустот через вертикальные буровые скважины	126
Глава III. Звуколокационные измерения в промышленных рассолах, глинистой пульпе и других жидкостях	136
§ 10. Съёмка камер выщелачивания соли через буровые скважины с поверхности	136
§ 11. Съёмка технических скважин большого диаметра и шахтных стволов, проходимых бурением	164
Глава IV. Звуколокационная съёмка и контроль за горными работами при разработке подводных залежей полезных ископаемых	183
§ 12. Съёмка и контроль за дражными разработками	184
§ 13. Звуколокационная съёмка при разработке подводных залежей карьерами	223
§ 14. Применение звуколокационной съёмки при разработке морских залежей	228
§ 15. Звуколокационный контроль при прокладке магистральных трубопроводов по дну водоема	235
Список литературы	242

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	18 сверху	развитем	развитнем
17	4 сверху	еще сложнее, чем индивидуальную катриксу. Можно дать только	ных сигналов от каждого участка. Рассчитать ее точно
58	1 снизу	(e_k) и (e) П	(e_k) и (e_k) П
76	3 сверху	навязкой	навивкой
163	6 снизу	32500	3250
202	10 снизу	проведена	припедена

К а з а к о в с к и й и др. Звуколокационная съемка горных выработок. Заказ 132/4236-9.

УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!

В издательстве «Недра» готовятся к печати новые книги

ВИЛЕСОВ Г. И., ИВЧЕНКО А. Н., ДИДЕНКО Н. М. Методика геометризации месторождений. 10 л. 4000 экз, 1 р. 01 к.

В книге отражены теоретические основы геометризации, вопросы моделирования рудников и месторождений полезных ископаемых, а также дана общая методика геометризации месторождений полезных ископаемых. Обобщен также практический опыт геометризации месторождений разных типов: угольных, россыпных, разрабатываемых открытым способом, медно-колчеданных, железорудных, золоторудных и нерудных полезных ископаемых.

Книга предназначена для работников геолого-маркшейдерских отделов горных предприятий, а также может быть полезна для преподавателей и студентов горных вузов и факультетов.

КАРТАШОВ Ю. М. Ускоренные методы определения реологических свойств горных пород. 6 л. 4000 экз. 61 к.

Книга посвящена одной из важных и сложных сторон исследования физико-механических свойств слабых горных пород — разработке ускоренных методов изучения реологических свойств этих пород, знание которых необходимо при проектировании, строительстве и эксплуатации капитальных горных выработок. В ней разработана методика отбора проб пород, позволяющая получать достаточно достоверные и надежные значения определяемых характеристик пород. Приведены схемы новых приборов и аппаратуры для исследования реологических свойств пород при статическом действии нагрузок и дан анализ результатов длительных испытаний. Описаны новые ускоренные методы испытаний, позволяющие определять важнейшие реологические характеристики пород (предел длительной прочности, показатели длительной объемной прочности, предел текучести, коэффициент вязкости) значительно (в 100—300 раз) быстрее, чем при длительных статических испытаниях.

Книга предназначена для работников угольной промышленности, проектных и научно-исследовательских институтов и вузов.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу или заказать через отдел «книга—почтой» магазинов:

№ 17 — 199178. Ленинград, В. О. Средний проспект, 61
№ 59 127412. Москва, И-412, Коровинское шоссе, 20.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

НЕДРА • 1973