Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова
т. XXXVII, вып. 1, 1958

УЛЬТРАЗВУК И ПУТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МАРКШЕЙДЕРСКОМ ДЕЛЕ

Г. А. Кротов

За последнее десятилетие ультразвук благодаря его особенным свойствам нашел широкое применение в ряде отраслей науки и техники. Ультразвуковые волны используются при испытании материалов (дефектоскопия), обработке материалов, сигнализации, определении расстояний и направлений (звуколокация — эхолот), в медицине, пищевой промышленности и т. д. В настоящее время почти нет отрасли народного хозяйства, где бы не применялись ультразвуковые волны.

Такие свойства ультразвука, как направленность, отражаемость и проницаемость в различные среды (твердые, жидкие и газообразные), открывают широкую перспективу применения его и в практике маркшейдерских измерений. В частности, он может быть использован при съемке и профилировании горных выработок, съемке дражных полигонов, определении положения и объема недоступных пустот, обнаружении нарушений и инородных включений впереди забоя и др.

Но переносить механически достижения в использовании ультразвуковых волн из других отраслей техники в маркшейдерскую было бы ошибкой. Для того чтобы ее избежать, необходимо исходя из специфической горногеологической обстановки и из требований точности маркшейдерских измерений провести дополнительные исследования, которые позволят познать проницаемость ультразвуковых волн различного диапазона и силы импульса через различные горные породы и полезные ископаемые. При этом необходимо иметь в виду, что горные породы не являются однородной, сплошной средой, а имеют нарушения, трещиноватость, структурные изменения и отдельные включения. Следует также выяснить характер и дальность распространения ультразвуковых волн в различных средах, в том числе в рудничной атмосфере, степень точности маркшейдерских измерений с помощью ультразвуковых волн и т. д.

Понятие об ультразвуке. Ультразвук — это упругие волны, имеющие частоту выше 20 *кгц* (тысяч колебаний в 1 сек.), т. е. выше частоты звука, слышимого человеком. В настоящее время удается получить упругие колебания с частотой более 500 *мгц*. Таким образом, ультразвуковые колебания имеют огромный диапазон частот.

Для маркшейдерских целей наиболее пригодным диапазоном частот является частота от 15 до 50 *кгц*.

Для того чтобы излучение ультразвука обладало направленностью, т. е. волны распространялись острым пучком лучей, необходимо, чтобы между размерами колеблющейся поверхности D и частотой (а следовательно, и длиной волны λ) существовало определенное соотношение, т. е. $D \gg \lambda$.

Скорость распределения ультразвуковых волн в различных средах может быть приближенно выражена формулой

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль упругости — величина, обратная сжимаемости среды;
ρ — плотность среды.

Величина скорости распространения ультразвука в твердых телах (в кварце) примерно равна 5750 *м/сек*, в воде 1440 *м/сек* (при 8° С) и в воздухе 331,5 *м/сек*. Скорость звука, помимо других факторов, зависит от температуры. При изменении температуры воздуха на $\pm 1°$ скорость звука изменяется на $\pm 0{,}5$ *м/сек*.

Дальность распространения ультразвука зависит от удельного акустического сопротивления среды, мощности и частоты его излучения (см. табл.).

Таблица

Среда	Дальность распространения ультразвука при частоте (*кгц*)					
	10	20	30	100	500	1000
Воздух	320 *м*	55 *м*	24 *м*	220 *см*	8,8 *см*	2,2 *см*
Вода	400 *км*	100 *км*	44 *км*	4 *км*	160 *м*	40 *см*

Ультразвук имеет способность легко отражаться от любого препятствия и при переходе из одной среды в другую.

Так, например, при падении волны из воздуха на твердые тела (сталь, песчаник и т. д.) практически отражается 100% энергии. Коэффициент отражения составит 0,9999. Коэффициент отражения от воды составляет 0,9993.

Существует несколько способов получения ультразвуковых волн: механический, пьезоэлектрический и магнитострикционный.

К генераторам механического типа относятся: камертоны, свистки Гальтона, газоструйные генераторы (компрессорные сирены), возбуждение колебания стеклянного или металлического стержня посредством трения.

Пьезоэлектрические излучатели ультразвука основаны на так называемом пьезоэффекте, который состоит в том, что пластинки некоторых кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.), заключенные в оправу (рис. 1), периодически изменяют свои размеры, если к их поверхности приложить переменное напряжение. При этом они излучают ультразвуковые волны. Если же пластинки этих кристаллов привести в механическое колебание, то на их гранях появится временное электрическое напряжение.

В отраслях техники, смежных по задачам с маркшейдерией, чаще всего применяются магнитострикционные вибраторы. Сущность магнитострикционного вибратора заключается в следующем: если металлический стержень поместить в обмотку с постоянным магнитным

полем и к обмотке приложить переменное напряжение, то стержень будет вибрировать с частотой приложенного напряжения, излучая при этом ультразвук.

Магнитострикционные вибраторы могут быть самой разнообразной формы: стержневые, кольцевые, диофрагменные. Наиболее широко рас-

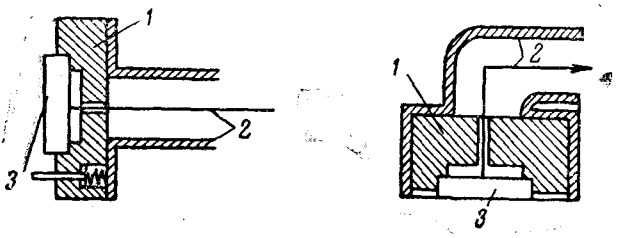


Рис. 1. Кристалл в оправе с держателем:
1 — оправа; *2* — кабель; *3* — кристалл

пространены вибраторы, состоящие из пакета металлических пластин с электрообмоткой (рис. 2). Такого рода вибраторы выпускаются в настоящее время на частоты 15—200 *кгц*.

Частота излучения определяется профилем вибратора и константами его материала. Для вибратора-пакета основная частота может быть получена по формуле

$$f = \frac{1}{2h}\sqrt{\frac{E}{1+\frac{b}{2h}}},$$

где b и h — размеры вибратора;
E — модуль упругости материала.

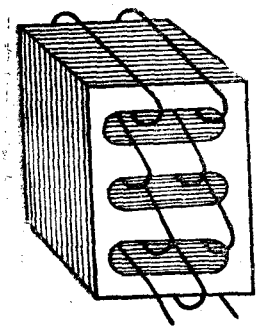


Рис. 2. Вибратор — пакет

Импульсные ультразвуковые системы. Импульсные системы излучения и приема ультразвука являются наиболее пригодными для использования ультразвуковых волн в решении различных маркшейдерских задач. Они широко применяются в различных областях техники, особенно в гидроакустике.

Импульсная ультразвуковая система работает по тому же принципу, что и радиолокационная. Через короткие промежутки времени посылаются ультразвуковые сигналы (импульсы), которые, отразившись от цели (препятствия), принимаются этой же установкой. Одновременно точно фиксируются промежутки времени между излучением и возвращением сигнала. Таким образом может быть определено расстояние от излучателя до цели (рис. 3). Для определения направления используются излучатели с острой характеристикой направленности.

При работе вибратора-излучателя используется прямой магнитострикционный эффект (или пьезоэффект), а при работе вибратора-приемника используется обратный магнитострикционный эффект.

Поскольку применение ультразвуковых волн при маркшейдерских съемках (съемка дражных полигонов, профилирование горных выработок, съемка горных пустот и т. д.) основано на использовании в том или ином виде импульсных систем типа «эхолот», то для общего знакомства с ними дадим краткое описание принципа действия навига-

ционного эхолота НЭЛ-4 (ПШС № 18), предназначенного для звукового измерения глубин в пределах от 1 до 500 *м*.

Принцип действия эхолота изображен на рис. 4. Электродвигатель *М*, вращающийся с постоянным числом оборотов, приводит во

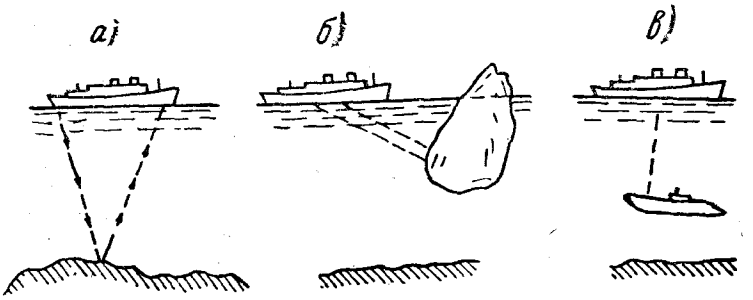


Рис. 3. Принцип действия импульсных звуколокаторов (эхолотов):
а — определение глубины; *б* — обнаружение препятствий; *в* — обнаружение подводных лодок

вращение кулачок *К* и диск *Д* с неоновой лампой *Л*. В тот момент, когда лампа находится против нулевого деления шкалы *Ш*, кулачок *К* размыкает контакт *КТ*, вследствие чего питание на реле *Р* прекра-

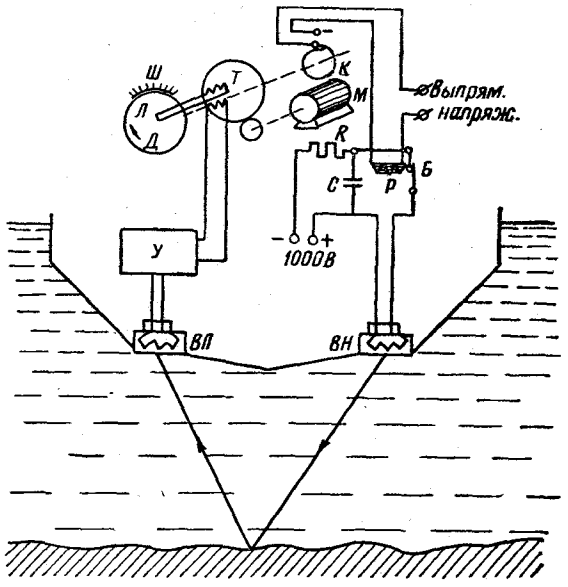


Рис. 4. Принципиальная схема действия навигационного эхолота НЭЛ-4

щается и контакт под действием пружины замыкается. В этот момент заряженный до высокого напряжения конденсатор *С* разряжается на обмотку вибратора-излучателя *ВИ*. Разрядка конденсатора вызывает в обмотке и вибраторе-излучателе электрические, быстро затухающие колебания, под действием которых в свою очередь вызываются упругие колебания воды. Эти колебания, распространяясь со скоростью в среднем 1500 *м/сек*, достигают дна и, отразившись от него, возвращаются к вибратору-приемнику *ВП*, который заставляют также совершать

колебания, изменяя его линейные размеры и магнитное состояние. Переменное магнитное поле индуктирует в обмотку приемника электродвижущую силу, которая поступает на усилитель *У*. Усиленная электродвижущая сила эхосигнала через трансформатор *Т* с вращающейся катушкой поступает на неоновую лампу *Л* указателя глубины. В момент прихода импульса напряжение на электродах неоновой лампы достигает примерно 500 *в*, и она вспыхивает на короткий промежуток времени.

Между моментом посылки и приема отраженного импульса проходит некоторое время, за которое диск поворачивается равномерно вращающимся электродвигателем на угол, соответствующий измеренной глубине. Перед диском помещена шкала глубин *Ш* с делением в метрах, по которой и производится отсчет.

В период между посылками импульсов происходит заряд конденсатора *С* от постоянного напряжения 1 000 *в* через зарядное сопротивление *R*.

Более совершенными являются эхолоты с самописцами, которые беспрерывно записывают профиль дна водоема. Принцип действия такого эхолота описан ниже.

Наиболее подходящими для маркшейдерских целей с точки зрения точности, компактности и веса являются речные эхолоты типа ПЭЛ-2, РЭЛ-1 и особенно РЭЛ-1М, впервые разработанный и изготовленный коллективом инженерно-технических работников Ленгипроречтранса под руководством Г. Е. Гальченко.

Возможность применения эхолота для съемки дражных полигонов. Все возрастающий объем открытых горных работ на россыпных месторождениях, широкая их механизация и увеличение дражных разработок требуют более быстрого, точного и совершенного маркшейдерского обслуживания. Существующие примитивные, мало производительные способы съемок и замеров дражных полигонов не всегда удовлетворяют современные требования горного производства. Необходимо изыскать такие методы и инструменты, которые отвечали бы современному уровню развития техники и существенно облегчили и усовершенствовали труд маркшейдера.

Одним из таких методов съемки, по нашему мнению, может быть ультразвуковой метод. Преимущества его перед ручным методом состоит в том, что измерение глубины дражного полигона может производиться с лодки или драги во время их хода; глубины измеряются через малые промежутки времени (до 500 промеров в минуту); отсутствует влияние подводных и поверхностных течений, а также движения лодки, что при ручных способах измерения является источником ошибок; в результате промера получается профиль дна водоема, а также может быть определен профиль плотика; обеспечивается объективность результатов промера глубин и др.

Ультразвуковой эхолот может быть с успехом применен на следующих стадиях съемки и замеров дражных полигонов:

1) при контрольном профилировании после подтопа дражного полигона с целью проверки мест, где глубина от уровня воды до плотика будет меньше минимальной или больше максимальной глубины черпанья драги;

2) предупреждение подэфеливания драги, которое происходит тогда, когда высота эфельного отвала равна или будет больше глубины черпания;

3) при маркшейдерском учете работы драги — определении границ отработанной площади, глубины черпания, величины задирки плотика, мощности забоя, добытой и промытой горной массы;

4) при текущем контроле за полнотой отработки промышленного полигона и внеконтурных и промышленных частей россыпи, установленных в процессе разработки или до разведки. Чтобы выполнить перечисленные задачи, маркшейдеру приходится пользоваться неточными и трудоемкими способами съемки, причем замеры (рейкой, стержнем и т. д.) производятся иногда чаще чем раз в декаду и через 5—10 *м* с лодки, с трапов, драги, понтонов и т. д.

Применение ультразвукового способа особенно удобно при массовой контрольной съемке всего полигона как до начала работы, так и после отработки полигона.

За последнее время успешно экспериментируется определение мощности слоев горных пород, составляющих дно водоемов при помощи ультразвука. Это открывает возможность параллельно с измерением глубины отбивать плотик с фиксацией его профиля и определением мощности пород (песков) над ним.

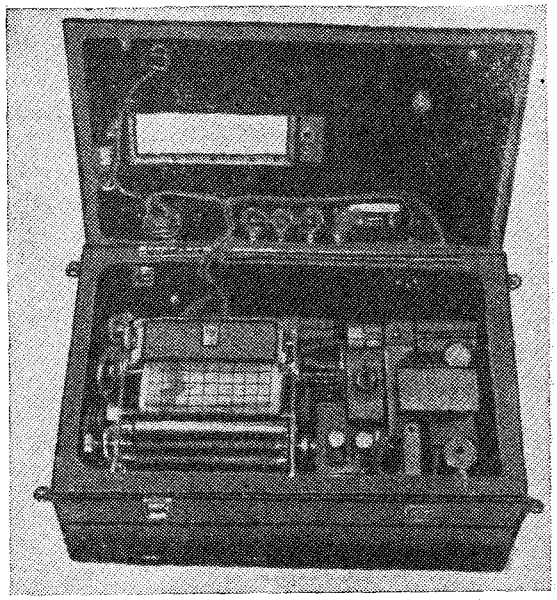


Рис. 5. Основной аппарат для записи РЭЛ-1М

Рассмотрим кратко особенности устройства и работы речного эхолота РЭЛ-1М конструкции Ленгипроречтранса и возможность его применения для съемки дражных полигонов.

Речной эхолот РЭЛ-1М является магнитострикционным с автоматической записью ультразвуковым прибором, предназначенным для измерения глубин водоемов до 20 *м* с точностью ± 5 *см*.

В основной комплект прибора входит.

1. Аппарат для записи с блоком питания и усилителем, смонтированные в одном футляре размером $565 \times 370 \times 250$ *мм*. Общий вес 27,3 *кг* (рис. 5).

2. Магнитострикционные вибраторы «пакеты» (излучатель и приемник) одинакового устройства, общим весом 14 *кг*. Для питания всех схем эхолота электроэнергией используется 6-вольтовый аккумулятор с силой тока до 14 *а*. Тип аккумулятора принимается щелочной 5НКН-100 или кислотный ЭСТ-112-144. К комплекту относится также ящик с запасными частями и инструментами. Кроме того, придается забортное устройство с креплением, в которое монтируются оба вибратора. Принцип действия РЭЛ-1М тот же, что и вышеописанных эхолотов, но в РЭЛ-1М используется несколько иной метод записи глубин, а именно электроискровой, такой же, как в эхолотах РЭЛ-1 и ПЭЛ-2 (рис. 6). Здесь электродвигатель *М* с постоянным числом оборотов вращает барабан *Б*, на котором натянута стальная спираль, выступающая на 0,3 *мм* над поверхностью барабана. Шаг спирали равен ширине рабочей части специальной бумажной ленты (165 *мм*). Следовательно, за один оборот барабана спираль пройдет по всей ширине бумаги слева направо, создавая в местах соприкосновения с печатной планкой

бегущий контакт. На оси барабана сидит кулачок *Д*, который замыкается со своим контактом за один оборот барабана только один раз, в момент совпадения спирального проводника с начальной линией отсчета, нанесенной на бумаге. В результате замыкания кулачка *Д* конденсатор *С*, заряженный до этого момента через сопротивление R_2 напряжением 450 *в*, разряжается через обмотку вибратора-излучателя *ВИ*. Возникшие ультразвуковые импульсы, отраженные от дна, воздействуют на вибратор-приемник *ВП*, в обмотке которого индуктируется э. д. с. Слабое напряжение сигнала усилитель усиливает до 200—300 *в*. Пришедший с усилителя электрический импульс поступает на печатную пленку *Пл*, далее через электрометрическую бумагу переходит на спираль барабана *Б* и обратно в исходную точку усилителя *У*.

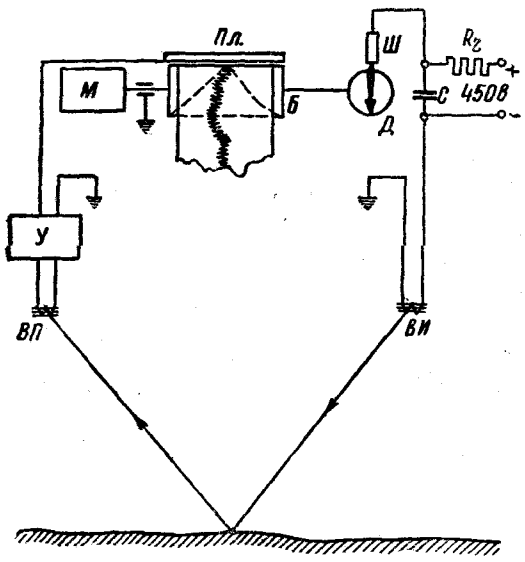


Рис. 6. Схема записи глубин эхолота типа РЭЛ-1 и РЭЛ-1М

Электрометрическая бумага, находящаяся между планкой и барабаном *Б*, обладает проводимостью и только ее верхний слой (тонкий слой сульфата свинца) является изоляцией. При возникающем в месте контакта искровом разряде сопротивление верхнего слоя преодолевается и на бумагу наносится черная точка. Так как бумага на барабане перемещается медленно, со скоростью 2,5—8 *см/мин*, то ряд последовательных точек вырисовывает сплошную линию измеряемого времени Δt между посылкой и приемкой ультразвукового сигнала. Скорость вращения барабана подбирается равной скорости прохождения ультразвука в воде, и поэтому отрезок прямой на бумаге, полученный между начальной линией отсчета (нулем) и нанесенной черной точкой, будет пропорционален измеряемой глубине. Таким образом, на бумаге, которая разбита на 50 параллельных линий, с ценой деления, равного 40 *см* глубины, по существу будет изображен профиль дна водоема (рис. 7). При этом вертикальное масштабирование профиля более определенное и устойчивое, чем горизонтальное, так как оно зависит от скорости распространения ультразвуковых волн в воде. Учитывая, что скорость прохождения ультразвука в различных водоемах различна (в зависимости от температуры и насыщенности воды минеральными и механическими веществами), то перед началом замеров необходимо, регулируя эхолот, добиться соответствия его показаний глубины водоема, показаниям ручных промеров.

Горизонтальный же масштаб в основном зависит от скорости протягивания бумажной ленты и скорости движения вибраторов, поэтому он менее устойчив, чем вертикальный.

Рассмотрим кратко порядок производства замеров глубин с помощью РЭЛ-1М. Эхолот с батареями устанавливается на судне (моторной или весельной лодке) и прочно закрепляется в горизонтальном положении. За бортом судна, на расстоянии 300—350 *мм* от борта,

устанавливается с прочным креплением забортное устройство (обтекатель с приемно-отправительным вибратором) (рис. 8). При этом нижняя плоскость вибратора должна быть параллельна поверхности воды с точностью до 3°. Глубина погружения вибратора в воду должна быть

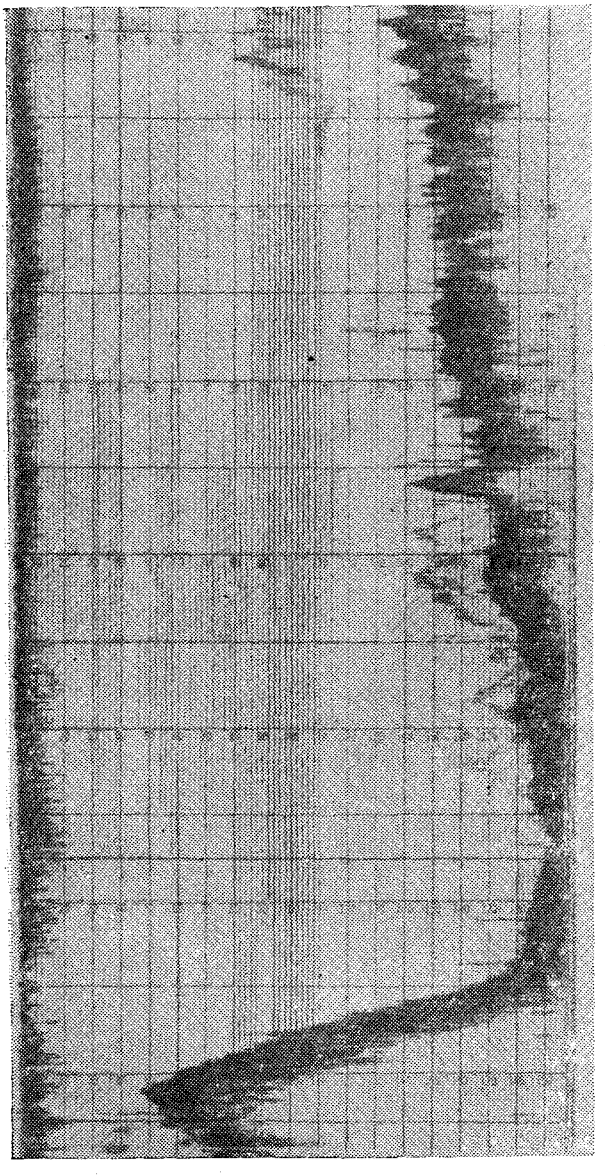


Рис. 7. Батиграмма

не менее 200—300 *мм*. На весельной лодке вибраторы могут быть установлены и за кормой лодки. При съемке дражных полигонов рациональней и удобней устанавливать вибраторы не на лодках, а на поплавках-обтекателях, изготовленных из дерева или алюминия, и с помощью лебедок с проволокой (установленных на противоположных бортах водоема) протягивать их вдоль профилей с постоянной скоростью (рис. 9).

Этот дистанционный способ будет иметь ряд следующих преимуществ: 1) основная аппаратура устанавливается на борту полигона или на драге; 2) створы могут быть легко привязаны к геодезической основе; 3) обеспечивается высокая точность движения вибраторов по створам (профильным линиям); 4) выдерживается постоянная скорость движения вибраторов, чем повышается точность определения положения точек замера глубин на профиле без инструментальных засечек и упрощается камеральная обработка; 5) увеличивается проходимость вибраторов и оперативность съемки.

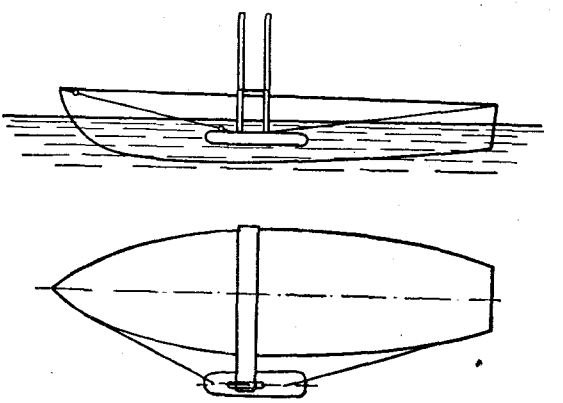


Рис. 8. Установка забортного устройства в плане

Таким образом, упрощается процесс съемки и увеличивается ее производительность и точность.

Перед измерениями же глубин с лодки предварительно должны быть намечены профильные линии и произведена их привязка. Профильная линия в натуре должна отмечаться на бровках бортов водоема реперами, а на поверхности его при большой длине линии и на поворотах — буями (поплавками). Положение реперов и буев должно определяться геодезическими засечками или промерами расстояний. При подготовке эхолота к работе помещается рулон чистой бумаги в исходное положение и в установленной последовательности включают узлы схемы прибора. После погружения на определенную глубину от поверхности воды приемно-отправительного устройства включается эхолот и промеряется глубина, которая затем контролируется ручным способом, чтобы убедиться в правильности показаний эхолота. Сличение показаний эхолота с ручными измерениями следует производить 2—3 раза на участках с разными глубинами и на ровном плотном дне.

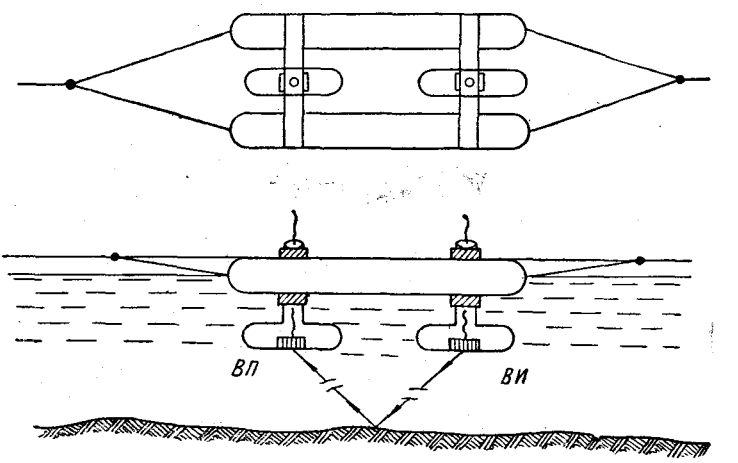


Рис. 9. Установка вибратора на поплавках-обтекателях

После регулировки эхолота следует выйти на исходную точку, включить эхолот в работу и двигаться в необходимом направлении с примерно одинаковой скоростью. В начальной и конечной точках, а также при необходимости и в промежуточных точках на бумажной ленте нажимом специальной оперативной кнопки производят сплошные засечки. Во время работы эхолота следует внимательно наблюдать за правильностью положения ленты бумаги (отсутствие перекоса, постоянство натяжения, прижим бумаги планкой к валику с пружиной и т. д.), так как от этого зависит четкость и правильность записи глубин. Уход за эхолотом должен быть тщательным как при работе, транспортировке, так и при его хранении.

Объем камеральной обработки результатов измерений глубин эхолотом будет зависеть от степени дальнейшего их использования. Для контроля за глубиной черпания драги и полноты отработки залежи в пределах одного забоя и всего полигона достаточно обработать батиграммы (профиль дна водоема).

Для учета движения запасов и потерь необходимо при нанесении результатов замеров на план и при дальнейшем их использовании проводить полный цикл камеральной обработки в следующем порядке: 1) обработать материалы привязки профилей и засечек и нанести их на план; 2) обработать батиграммы; 3) перенести измеренные глубины на план и нарисовать рельеф; 4) подсчитать объемы вынутой породы.

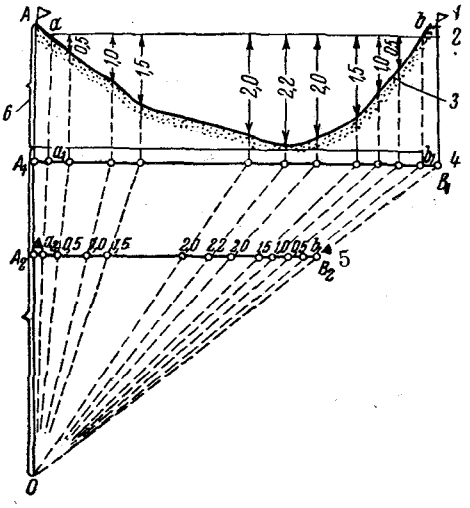


Рис. 10. Графический способ переноса отметок с батиграммы на план:

1 — рабочий уровень; *2* — срезочный уровень; *3* — линия глубин; *4* — вспомогательная линия; *5* — линия галса в масштабе плана; *6* — батиграмма

При инструментальной привязке профилей в натуре вычислительная обработка материалов полевых наблюдений и нанесение профильных линий на эксплуатационный план выполняется обычным способом — графически или по координатам с требуемой точностью. При обработке батиграмм вначале четко фиксируется линия глубин водоема, уточняется ее горизонтальный и вертикальный масштабы, устанавливается исходный горизонт (срезочный) и точки характерных глубин с помощью линейки или палетки сносятся на вспомогательную линию, расположенную ниже батиграммы. На линии сноса надписываются или значения глубин, или абсолютные отметки снесенных точек.

При перенесении измеренных глубин или отметок на план применяют графический или механический способ. При графическом способе поступают следующим образом (рис. 10).

На листе бумаги, подложенном под нижний край батиграммы, проводится вертикальная линия AO через крайнюю точку уреза A. Точка O соединяется тонкими линиями со всеми точками глубин, расположенными на вспомогательной линии A_1B_1. Затем на полоске бумаги (лучше на миллиметровой) по плану отмечается линия профиля, соответствующая батиграмме, и полоска бумаги перемещается параллельно вспомогательной линии A_1B_1 до тех пор, пока концы профильной линии не совпадут с лучами OA_2 и OB_2. На полоску бумаги в этом положении наносят пересечение всех лучей, соответствующих точкам снесенных

глубин. После этого полоска бумаги переносится на план и совмещается соответствующим образом с профильной линией, на которой отмечаются все точки глубины.

При механическом перенесении значений глубин с батиграмм на план используется прибор Ф. М. Александрова, представляющий собой пересечение двух линеек со скошенными внутренними краями, на которых нанесены одинаковые деления. Для закрепления прибора на бумаге на одной из линеек (по краям и в центре) имеются иголочки.

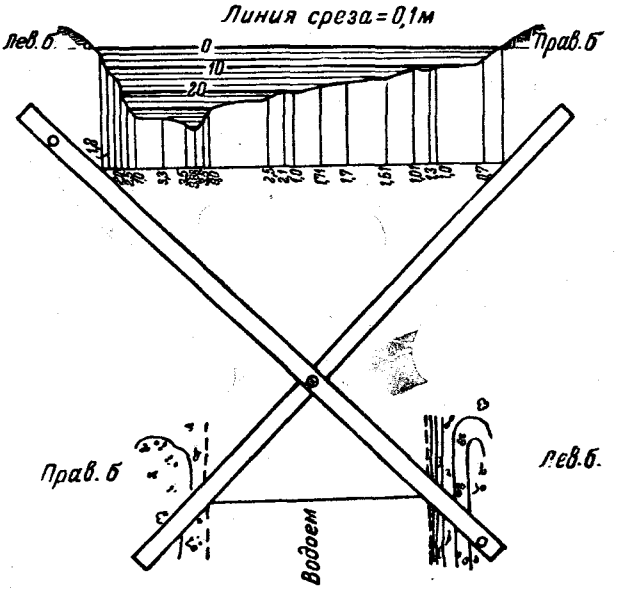


Рис. 11. Механический способ переноса отметок с батиграммы на план с помощью прибора Ф. М. Александрова

Перенесение значений глубин с батиграммы на план при помощи прибора Ф. М. Александрова производится следующим путем. После обработки батиграмма при помощи прибора укладывается на план таким образом, чтобы вспомогательная линия была параллельна профильной линии, нанесенной на план (рис. 11). В таком положении одна линейка прибора с помощью иголочек закрепляется, а конец другой линейки перемещается по вспомогательной линии последовательно, совмещаясь с точками глубин. По второму концу, который перемещается по линии профиля, на план наносят точки положения соответствующих глубин. После перенесения всех профилей приступают к рисовке рельефа или использованию профилей для других целей.

При использовании ультразвуковой установки типа РЭЛ-1М для съемки дражных полигонов необходимо: 1) усовершенствовать горизонтальное масштабирование батиграмм (для этого следует синхронизировать движение ленты бумаги в приборе, на которой записываются батиграммы, с движением вибраторов); 2) освоить измерение глубины до твердого основания дна через взмученный слой (хотя опыт ряда организаций — Ленгидеп, Ленречтранс и др. — указывает на возможность таких измерений без потери в точности, дополнительные исследования в условиях работы драги все же надо провести); 3) уменьшить вес самого прибора и агрегатов энергоснабжения; 4) добиться

определения при помощи ультразвука профиля плотика параллельно с фиксацией профиля дна водоема; 5) исследовать дистанционность установки основного прибора относительно вибраторов.

Применение ультразвука для профилирования шахтных стволов. Профилирование шахтных стволов является одним из трудоемких и ответственных видов работ маркшейдера шахты. Применяемые в настоящее время способы профилирования стволов весьма несовершенны, недостаточно точны и связаны с опасностью для исполнителей. Часто измерение расстояний от отвесов до стенок стволов приходится выполнять из проходческой бадьи или стоя на крыше клети в условиях обильного капежа и сильной воздушной струи.

Все это требует от работников маркшейдерской службы изыскания более совершенных способов профилирования, основанных на автоматизации процессов замеров. Одним из таких способов может явиться ультразвуковой.

Измерение расстояний звуколокационным способом в воздушной среде имеет положительные и отрицательные стороны. Положительным является то, что ультразвуковые волны в воздухе распространяются со значительно меньшей скоростью, чем в воде, т. е. 342 *м/сек* при 18° С, что дает возможность повысить точность измерения расстояний. Недостатком является то, что ультразвуковые волны в воздушной среде быстро затухают из-за большой поглощающей способности воздуха, которая связана с его вязкостью. При этом потеря энергии звуковых волн прямо пропорциональна квадрату частоты звука и обратно пропорциональна квадрату длины волн. Таким образом, распространение ультразвука в воздухе ограничено и при измерении расстояний, по данным Гипроречтранса (с помощью РЭЛ-1М и УЗУР-3), находится в пределах 5—8 *м*. Практика же показала, что передача сигналов по воздуху ультразвуком возможна на несколько сот метров (см. таблицу). С другой стороны, при снижении частоты и увеличении длины волн теряется острота их направленности, что может привести к снижению точности измерений.

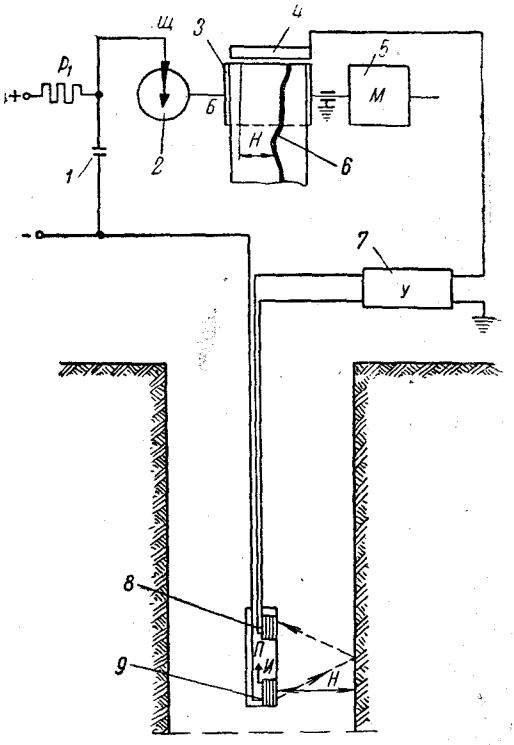


Рис. 12. Принципиальная схема УЗУР-3:

1 — конденсатор; *2* — диск; *3* — барабан; *4* — печатная планка; *5* — электродвигатель; *6* — диаграммная бумага; *7* — усилитель; *8* — вибратор-приемник; *9* — вибратор-излучатель

Опыт применения ультразвука для профилирования шахтных стволов. В июле 1956 г. на Всесоюзном совещании по маркшейдерскому делу в Ленинграде инженером Б. И. Лейбензоном был прочитан доклад о проведении экспериментальных работ по применению ультразвука для профилирования шахт в Подмосковном угольном бассейне. Здесь был использован ультразвуковой указатель расстояния типа УЗУР-3, разработанный Институтом гипрошахтстроя Министерства строитель-

ства предприятий угольной промышленности совместно с институтом Ленгипроречтранса Министерства речного флота. Продемонстрированная ультразвуковая установка УЗУР-3 имеет в основном такую же принципиальную схему работы, что и РЭЛ-1М (рис. 12).

Сущность профилирования шахтного ствола с помощью УЗУР-3 состоит в том, что в ствол шахты с постоянной скоростью опускаются излучающий ультразвуковые волны *И* и принимающий *П* отражение волны магнитострикционные вибраторы. Передвигающиеся по стволу вибраторы соединены с аппаратом записи *Б*, находящимся на поверхности шахты, который управляет посылкой звуковых сигналов вибратором *И* и фиксирует время прохождения отраженного от стенки ствола сигнала до вибратора *П*. В результате на специальной бумаге записывается электроискровым способом нулевая линия и кривая отрезков времени Δt, выраженная в единицах длин определенного масштаба. Отрезки между нулевой линией и кривой на бумаге будут соответствовать расстояниям от стенки ствола шахты до вибратора в заданном масштабе. При записи профиля ствола принимались масштабы 1 : 100 и 1 : 50.

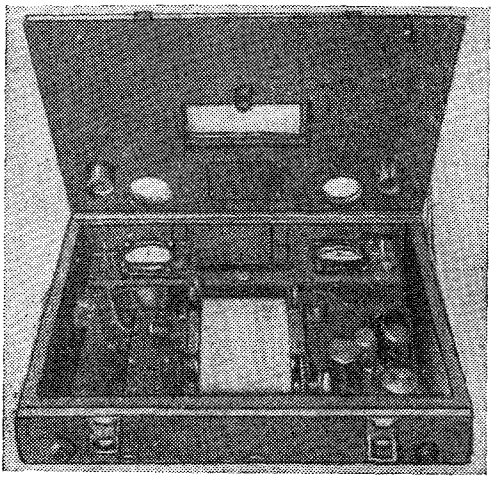


Рис. 13. Аппарат записи УЗУР-3

Ультразвуковой указатель расстояний УЗУР-3 состоит из аппарата записи (рис. 13), генератора напряжения, излучающего и приемного

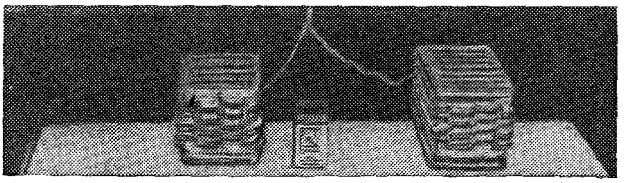


Рис. 14. Излучающий и приемный вибраторы

вибраторов (рис. 14), источника электропитания аккумуляторной батареи, блоков-лебедок и другого вспомогательного оборудования для перемещения в стволе вибратора, запасных частей.

Комплект УЗУР-3 укладывается в три ящика-чемодана. Детали его имеют вес: аппарат записи — 26,7 *кг*; генератор — 17,0 *кг*; ящик с запасными частями — 6,0 *кг*.

Частота излучаемого ультразвука 21,3 *кгц*, расстояние между вибраторами — база 250 *мм;* способ записи электроискровой; максимальная скорость спуска приемно-излучающего устройства 3024 *м/час*, минимальная 416 *м/час*; максимальное измеряемое расстояние по воздуху 3,5 *м*; глубина профилирующей шахты 400 *м;* погрешность измерения расстояний $\pm$ 12,5 *мм*.

Установка УЗУР-3 была испытана в лабораторных и производ-

ственных условиях. В Подмосковном угольном бассейне на шахте № 9, с глубиной ствола 53 *м* (при диаметре ствола 5 *м*), закрепленного бетоном, а с глубиной ствола 22 *м*, закрепленного деревом, было промерено более двадцати профилей при различных скоростях движения вибраторов. Для контроля было произведено профилирование тех же стенок обычным способом 5 раз.

В результате испытаний было установлено, что: 1) наиболее четкая запись профиля прибором была при скорости спуска вибраторов 0,15 и 0,2 *м/сек* при скорости подачи бумаги в приборе до 90 *мм/мин*; 2) при различных скоростях спуска запись производится беспрерывно; 3) средняя квадратичная ошибка записи ультразвуковой установки составила ± 14 *мм*; 4) скорость движения вентиляционной струи существенного влияния не оказывает; 5) капеж в стволе не создает искаженной записи.

При профилировании шахтного ствола на диаграмме записывается не только профиль стенок ствола, но и пространственное положение элементов армировки (расстрелы, рама и т. д.), а также сочленяющиеся со стволом выработки (рис. 15).

Таким образом, промышленными испытаниями была доказана полная возможность использования ультразвука для профилирования стволов шахт, а также горных выработок вообще.

В результате этих испытаний были намечены пути дальнейшего совершенствования установки, а также решено весь комплект ее с агрегатом питания разместить в специальной бадье, в которой будет находиться оператор. В настоящее время производятся окончательные испытания всей установки на шахтах Донбасса.

Возможность использования ультразвука при контроле сечения и профилирования горизонтальных и наклонных горных выработок. Систематический контроль сечения во вновь пройденных и старых горных выработках занимает значительное место в деятельности

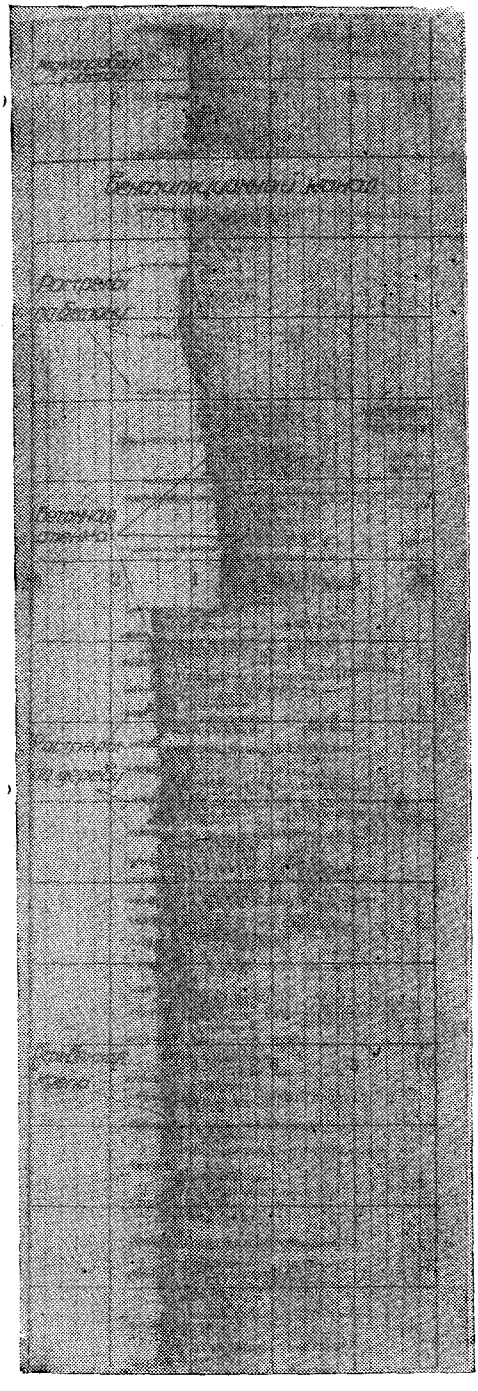


Рис. 15. Ультразвуковой профиль шахтного ствола

маркшейдера и работников горного надзора. Частые нарушения выработок под влиянием оседания кровли, поддувания почвы, давления боковых пород вынуждают производить повторные замеры габаритов выработок. По тем же причинам полезно повторять нивелировку (профилирование почвы и кровли). Во всех этих случаях может быть использован опыт ультразвукового профилирования шахтных стволов. Точность же нивелировки 1—1,5 *см* вполне достаточна для контроля и решения текущих горно-маркшейдерских задач.

Принципиальная схема работы установки при профилировании одной стенки (кровли, почвы) та же, что и в предыдущих случаях. При одновременном профилировании двух или нескольких плоскостей необходимо иметь такое же количество установок. Для того чтобы производить комбинированную запись на одной бумажной ленте, необходимо исследовать возможность изменения схемы работы прибора. Вариантами такого изменения могут быть установка на одном валу двух контактных пружин или чередование импульсов от различных приемно-излучающих устройств и записи смещенных относительно друг друга кривых. Порядок производства профилирования может быть следующий: электровоз или шахтная вагонетка, на которых устанавливается весь комплект ультразвуковой установки, начинает движение с постоянной скоростью от исходной точки. С началом движения включенная ультразвуковая установка записывает один или два профиля (рис. 16). Все маркшейдерские точки, заложенные в кровле или почве, фиксируются на диаграмме сплошной чертой нажатием оперативной кнопки, что дает возможность точнее определить горизонтальный масштаб записи. Размещение на электровозе или вагонетке аппарата регистрации позволяет легче установить синхронность движения бумажной ленты и приемно-излучающего устройства.

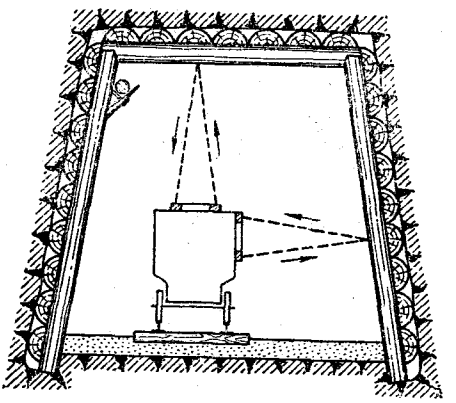


Рис. 16. Ультразвуковое профилирование горной выработки

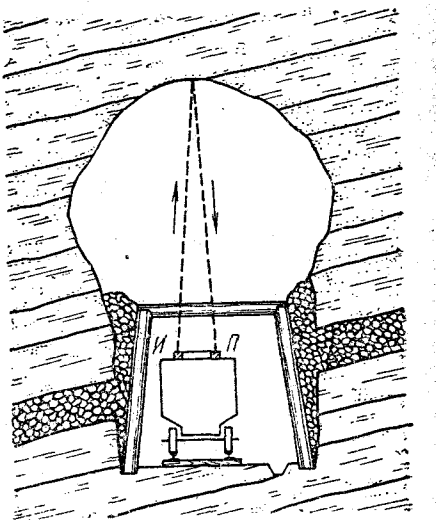


Рис. 17. Профилирование купола (вывола) в горной выработке

При образовании в кровле выработок куполов, недоступных или опасных для измерения обычным способом, замер может быть произведен при помощи ультразвука (рис. 17).

Вибраторы, размещенные на одной равномерно вращающейся оси при движении агрегата позволяют беспрерывно фиксировать сечение выработки.

Если вместе с ультразвуковой установкой, фиксирующей стенки выработки, установить малогабаритный гироскоп с самописцем, то при прокатывании всего агрегата по выработке может быть получен план ее с достаточной графической точностью. Таким образом, использование ультразвука для съемки горных выработок в сочетании с другими передовыми техническими средствами (гироскоп, фотоэлемент и др.) открывает реальные возможности создания универсальной установки для автоматической и быстрой съемки горных выработок, т. е. «маркшейдерского комбайна».

Возможности применения ультразвука при съемке камер и недоступных подземных пустот. Съемка камер и недоступных подземных пустот является до сих пор не разрешенной полностью задачей маркшейдерской практики. Даже камеры, к которым имеются подходы из подэтажных выработок, не всегда могут быть засняты с необходимой точностью имеющимися у маркшейдеров техническими средствами. Наиболее совершенные дальномерные приборы с базисом при инструменте, как «телеметр» ВНИМИ, маркшейдерский инструмент с дальномером — МИД, предложенный Г. Т. Нестеренко, и др., не всегда могут обеспечить необходимую полноту и точность съемки камер. В то же время быстрый рост добычи и применение совершенных систем при разработке мощных залежей полезного ископаемого создают необходимость более частых и точных съемок больших пустот. Все это требует изыскания новейших, более совершенных методов съемки пустот и камер. И в этом случае может быть использован ультразвук.

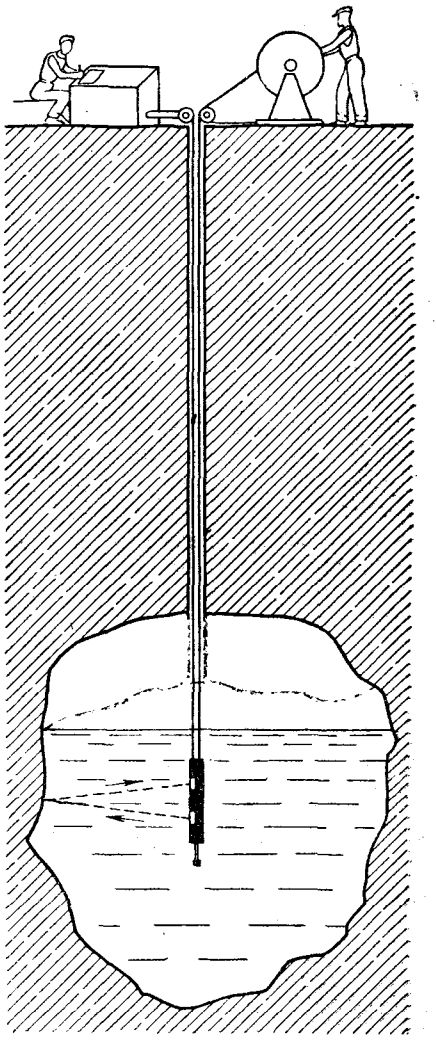


Рис. 18. Ультразвуковая съемка пустот

Для съемки подземной пустоты или камеры с помощью ультразвука достаточно иметь скважину диаметром не менее 10 *см*, пробуренную в камеру (желательно ближе к ее середине) через потолочину любой из выработок, чтобы приступить к профилированию стенок камеры в различных сечениях. Порядок работы при этом может быть следующий.

На поверхности шахты или на верхнем горизонте около скважины (выработки) располагается ультразвуковая установка. Через скважину при помощи блоков и специальной лебедки в камеру на тросах опускается приемно-излучающее устройство, имеющее заданную ориентировку плоскости излучения. По мере спуска вибраторов в камеру ультразвук, излучаемый импульсами и отражаемый от стенки камеры,

зафиксирует на бумажной ленте регистрационного аппарата профиль стенки, расстояние до которой измеряется. Постоянство скорости движения вибраторов в камере и глубина погружения могут определяться и контролироваться при помощи счетчиков, установленных на лебедке. После профилирования одной стенки по заданному сечению излучающая плоскость вибраторов поворачивается на 180° или на другой, заранее установленный угол, и вибраторы вновь перемещаются сверху вниз или снизу вверх, фиксируя расстояния в новом сечении. Таким способом могут быть зафиксированы профили стенок камеры в любом числе сечений. Имея профили стенок камеры, а следовательно, и расстояние от оси скважины до стенок, легко можно определить контур камеры в нужном вертикальном и горизонтальном сечениях, подсчитать кубатуру камеры и определить ее пространственное положение.

При спуске приемно-излучающего устройства в камеру будет возникать вращательное движение его вокруг оси троса, что может вызвать искажение результатов измерений. С целью уменьшения вращательного момента приемно-излучающее устройство следует спускать не на одном, а на двух-трех тросах (проволоках, проводах), расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Для контроля за положением плоскости приемно-излучающего устройства может быть использована сильсинная система, применяемая при автоматическом управлении на расстоянии посредством синхронного повторения движения (поворот на один и тот же угол) ротора приемника относительно ротора датчика. Съемка камер может быть произведена также получением горизонтальных сечений путем вращения приемно-излучающей плоскости вокруг оси скважины (на 360°) на различных расстояниях по высоте.

Съемку камер возможно иногда проводить и из подготовительных горных выработок, подходящих к камере, и из уступов заходок. При большой остроте направленности ультразвуковых лучей измерение расстояний может быть осуществлено радиально в пределах поля зрения, тем более, что стенки камеры обычно не являются прямолинейной плоскостью. Учитывая, что ширина обычных камер находится в пределах 6—10 *м*, здесь может быть использована ультразвуковая установка типа УЗУР-3, но с меньшей частотой и большей точностью излучения.

Погрешность определения расстояний с помощью УЗУР-3, как это следует из результатов профилирования шахтных стволов, находится в пределах 15 *мм*. Камеральная обработка звукограмм (профиля) производится так же, как и в предыдущих случаях. Расстояние от приемно-излучающего устройства и до любой точки съемки может быть определено по звукограмме или по формуле

$$l = \sqrt{\left(\frac{C\Delta t}{2}\right)^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2},$$

где l — расстояние от плоскости вибратора до снимаемой точки;
S — база — расстояние между центрами вибраторов;
C — скорость распространения ультразвуковых колебаний в воздухе;
Δt — время, необходимое для прохождения ультразвукового импульса от плоскости вибратора излучателя и обратно к плоскости вибратора приемщика.

Эхолот может быть особенно полезен, а иногда и незаменим при съемке естественных недоступных подземных пустот, с которыми при-

ходится часто иметь дело при разведке месторождений в закарстованных районах. Карсты встречаются как в боковых породах, так и в теле полезного ископаемого. Они часто заполнены водой, а поэтому при разработке месторождений угрожают опасностью затопления горных выработок. Наличие пустот в теле полезного ископаемого должно учитываться при подсчете запасов. Все это требует оконтуривания пустот при разведке, что связано с большими затратами времени и средств на бурение дополнительных скважин.

Наличие карстов весьма осложняет бурение пород, лежащих ниже карста, так как во избежание большой потери бурового (глинистого) раствора требуется закрепление карста цементом, что при незнании размеров карста приводит к громадному, часто бесполезному расходованию цемента. В таких случаях при определении формы и объема карста, как и при съемке камер, может быть использована ультразвуковая установка (рис. 18).

То же относится и к недоступным (переваленным) горным пустотам, образовавшимся в результате горных работ, но не имеющих доступа через подготовительные выработки. Такие переваленные подземные пустоты в целях безопасности подлежат ликвидации, для чего необходимо определить их пространственное положение. В этом случае также может прийти на помощь эхолот.

Важнейшей проблемой является использование ультразвука для определения геологических и структурных нарушений впереди очистного забоя как в залежи полезного ископаемого, так и в боковых породах. Последние зачастую создают много неожиданных неприятностей и непреодолимых затруднений при разработке. Это особенно относится к Подмосковному угольному бассейну.

Таким образом, применение ультразвука в маркшейдерском деле имеет широкую перспективу, поэтому перед научными работниками и маркшейдерами-новаторами производства стоит актуальная задача решения ряда вопросов, связанных: с увеличением расстояний распространения ультразвука в воздухе; с вводом и распространением ультразвука в различных горных породах; с синхронизацией движения вибраторов и бумажной ленты на регистрационном приборе; с уменьшением габаритов и облегчением всего комплекта ультразвуковой установки с агрегатом питания; с возможностью записи профилей 2—3 плоскостей одновременно одним прибором; с дистанционной работой основного прибора относительно приемно-излучающего устройства; с точностью работы ультразвуковых установок в различных средах и др.

Изучение и решение этих и других вопросов откроет путь к широкому использованию ультразвука в маркшейдерской практике.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бергман Л. Ультразвук. ИЛ, 1956.
2. Долгополов Н. Эхо под землей. «Знание — сила», № 9, 1956.
3. Кэрлин Б. Ультразвук. ИЛ, 1950.
4. Константинов В. П. Эксплуатация навигационных эхолотов на речном флоте. Речтранс., 1956.
5. Сергеев Л. А., Алшатов М. Г. Наставление по промеру эхолотом. ГУВМС, 1952.
6. Правила штурманской службы № 18. Изд. Речное пароходство, 1949.
7. Инструкция по эксплуатации и уходу за РЭЛ-1М. Ленгипроречтранс., 1955.
8. Эхолот РЭЛ-1М. Техническое описание. Ленгипроречтранс., 1955.
9. Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании по маркшейдерскому делу. Углетехиздат, 1956.