

УДК 624:621.396.96

В.Б. БОЛТИНЦЕВ, канд. техн. наук, ЗАО НПФ «Геодизонд» (Санкт-Петербург)

Оценка наличия связанной воды в горной выработке по данным электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования

Приведено теоретическое и практическое обоснование возможности обнаружения связанной воды в горной выработке по данным электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования. На примере конкретного тоннеля представлено сравнение прогноза и фактического материала проходки.

Ключевые слова: связанная вода, межзеренная пропитка, комплексная диэлектрическая проницаемость.

Практически все горные породы, в том числе магматические и метаморфические, можно рассматривать как дисперсные системы. Твердые поверхности большинства минералов горных пород обладают гидрофильными свойствами, т. е. хорошо смачиваются водой. Это обуславливает ориентацию молекул воды, представляющих собой диполи. Экспериментально подтверждено, что вязкость связанной воды повышается при уменьшении толщины пленки <1 мкм. При толщине пленки 0,2–0,3 мкм ее вязкость повышена по сравнению со свободной водой в 1,1 раза, а при толщине всего в 10 нм – уже в 1,6 раза (прямые измерения вязкости воды в очень тонких кварцевых капиллярах и тонкопористых стеклах). Молекулы воды ориентированы по нормали к твердой поверхности под действием электростатического притяжения, что обуславливает некоторое повышение плотности воды и снижение тангенциальной, т. е. вдоль поверхности, подвижности ее молекул в слоях толщиной всего лишь в несколько нанометров. Это проявляется макроскопически в повышении вязкости горной породы.

В зависимости от наличия связанной воды определенного вида меняются практически все свойства горных пород. С инженерной точки зрения наиболее важно ее влияние на деформируемость и прочность дисперсных пород (глинистых и лессовых) как обладающих большой величиной удельной поверхности (суммарной площадью S_z поверхности единицы массы породы, $[dim]=m^2/g$). В некоторых глинах $S_z \approx 600-800 m^2/g$. Количество связанной воды в породе прямо пропорционально ее удельной поверхности, поэтому больше всего связанной воды содержится в глинах.

Наличие связанной воды сказывается на деформировании и прочности магматических, метаморфических и осадочных горных пород, ее присутствие в кристаллической решетке минерала снижает его упругость. Но в

еще большей степени на деформируемость и прочность таких пород влияет наличие в микротрещинах, на контактах зерен или кристаллов адсорбционных пленок связанной воды. В случае, если порода находится в напряженном состоянии, адсорбционные пленки связанной воды существенно понижают поверхностную энергию минералов горной породы, облегчая развитие в породе различных механических микронарушений, дислокаций, микротрещин и т. д.

Вследствие этого порода начинает «ползти», она деформируется с той или иной скоростью при прежнем напряженном состоянии. Это одна из форм проявления эффекта Ребиндера (эффект ускорения ползучести горных пород из-за облегчения пластической деформации тел различной природы и снижения их прочности за счет явления адсорбции).

Связанная вода в горных породах неоднородна. Она удерживается в породе за счет химических и физических сил связи (с энергией 0,1–800 кДж/моль), действующих со стороны поверхности минералов и изменяющих структуру и свой-

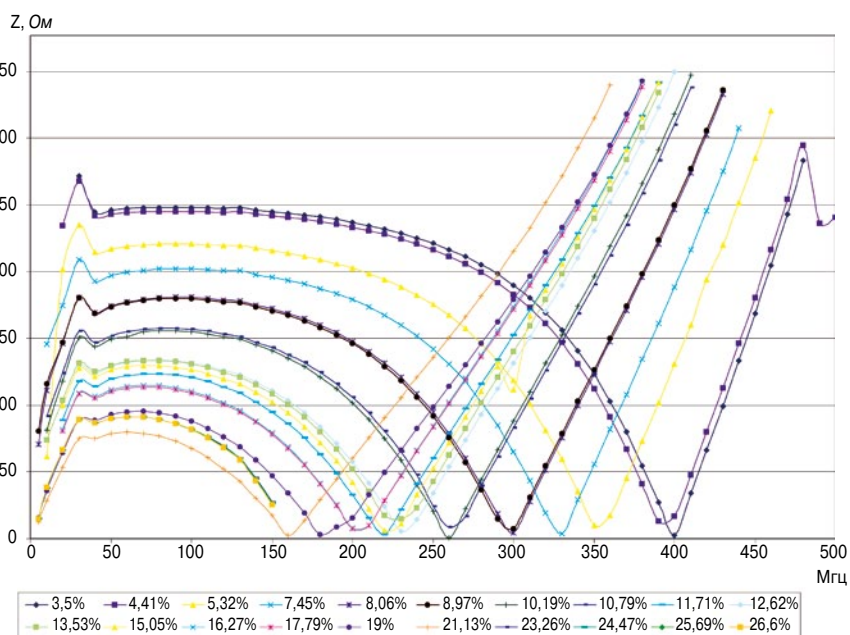


Рис. 1. Частотная зависимость импеданса суглинки при различных значениях объемной влажности

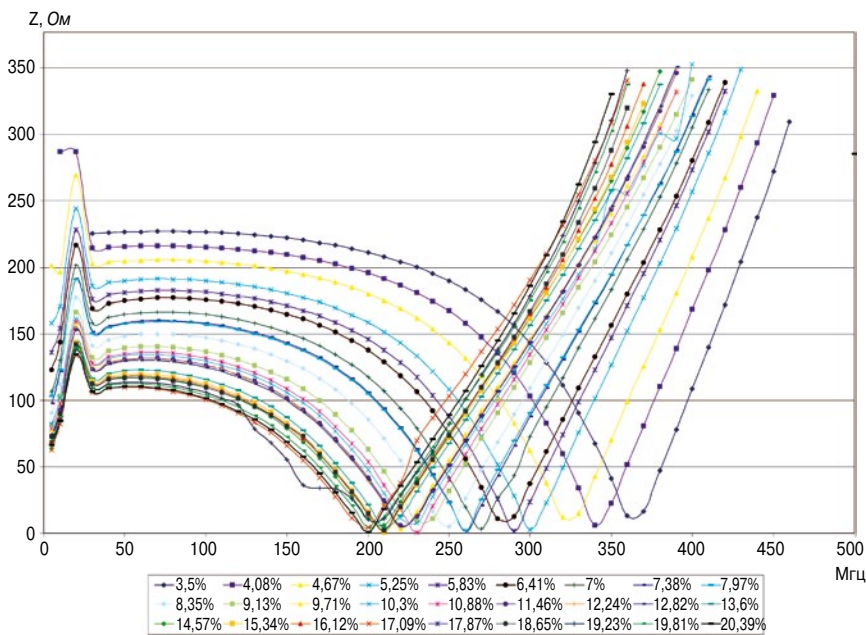


Рис. 2. Частотная зависимость импеданса корундового песка при различных значениях объемной влажности



Рис. 3. Антенна для обнаружения связанной воды

ства воды. Она бывает двух видов. К **первому** относится вода, входящая в состав кристаллических решеток различных минералов. Это так называемая конституционная, немоллекулярная форма воды типа ОН-групп, кристаллизационная вода различных кристаллогидратов (если они есть в данной горной породе), а также вода, «связанная» координационно-

ненасыщенными атомами и ионами кристаллической решетки минералов. Ко **второму** виду относится адсорбционная вода, образующаяся за счет адсорбционного «притяжения» молекул воды к активным адсорбционным центрам поверхности минералов. Среди нее выделяются две разновидности: а) с наибольшей энергией притяжения к поверхности

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА
ГЕОДИЗОНД
геофизическое дистанционное зондирование

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЗАО НПФ «Геодизонд», 196211, С.-Петербург
Пр. Гагарина, д. 14, корп. 6, оф. 8-н
Тел./факс: (812) 681-0230
E-Mail: geologspb@gmail.com, http://www.geodizond.ru

Научно-производственная фирма «Геодизонд» выполняет следующие виды геофизических изысканий:

- Оценка состояния грунтов в основаниях зданий и сооружений
- Проведение геофизических исследований при строительстве автодорожных и железнодорожных тоннелей, мостов, мостовых переходов, коллекторов и т. д.:
- геологическое картирование слоев; выявление карстовых полостей и пустот в породах, слагающих основания железнодорожных полотен; выявление водоносных слоев; опережающее геолого-геофизическое обследование горных пород впереди забоев тоннелей – выявление тектонических нарушений; выявление водонасыщенных структур; обследование состояния выработки за элементами обделки
- Обнаружение дефектов в сложных гидротехнических сооружениях (плотинах, пирсах, береговых укреплениях и т. п.), в фундаментах зданий и мостовых переходов, в сваях и других бетонных конструкциях:
- георадиолокационное обследование бетонных и железобетонных конструкций с целью обнаружения скрытых нарушений сплошности бетона (трещин и трещинных зон, рыхлых неоднородностей);
- определение мест возможного дренажа воды через бетонное или земляное тело плотины;
- георадиолокационное обследование придонных отложений и геологических разностей, слагающих дно водоемов, с плавательных средств
- Обнаружение и прослеживание трубопроводов, проложенных в грунтах или по дну водоемов
- Определение расположения подземных инженерных сооружений и коммуникаций
- Поиск археологических объектов
- Поиск месторождений полезных ископаемых (твердых, жидких, газообразных)
- Определение и оконтуривание зон загрязнения окружающей среды нефтью, нефтепродуктами и т. д.

(~40–120 кДж/моль) – вода мономолекулярной адсорбции; б) с меньшей энергией связи (<40 кДж/моль) – вода полимолекулярной адсорбции. Адсорбционные пленки [1], образованные связанной водой, толщиной в один или несколько молекулярных слоев заполняют поры горных пород или микротрещины размером менее 0,001 мкм. У этого типа воды физические свойства в наибольшей степени отличаются от свободной.

Установлено, что связанная вода может внедряться в поликристаллические скальные породы по этим сплошным межзерненным поверхностям раздела между различно ориентированными областями (зернами) поликристалла и межфазным границам и оставаться там неопределенно долгое время. Такая «межзерненная пропитка» наиболее вероятна в породах, у которых наблюдается полное смачивание свободной поверхности водой. С ростом температуры и напряжений круг пород, в которых проявляется данный эффект, еще больше расширяется.

Другое anomальное свойство связанной воды – понижение ее относительной диэлектрической проницаемости в несколько раз по сравнению со свободной водой. По последним данным [2], прослойки связанной воды толщиной 0,5–0,6 нм имеют диэлектрическую проницаемость равную 3–4. Сложность интерпретации диэлектрических спектров связанной воды обусловлена тем, что у некоторых содержащих воду объектов на частотах от 1 до $5 \cdot 10^{10}$ Гц может выявляться до 5 максимумов тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) и соответственно до 5 областей дисперсии диэлектрической проницаемости; выяснить природу каждого максимума $\text{tg}\delta$ удастся не всегда [3]. Резкое снижение величины диэлектрической проницаемости горной породы из-за появления в ней связанной воды приводит к скачку тангенса угла диэлектрических потерь. Покажем это. Введение комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) среды $\epsilon^*(\omega)$ [4] предполагает по определению экспоненциальное затухание сигнала и комплексность волнового числа:

$$k = \omega \cdot \sqrt{\mu_a \cdot \epsilon^*(\omega)} = \beta - j\alpha,$$

где $\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \epsilon'_3}{2} \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta} + 1)}$ – коэффициент фазы;

$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \epsilon'_3}{2} \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta} - 1)}$ – коэффициент затухания (поглощения); ϵ'_3 – измеряемая составляющая $\epsilon^*(\omega)$.

Легко показать, что модуль и аргумент импеданса среды связаны с α и β :

$$Z_{\text{среды}} = \frac{\omega \cdot \mu_a}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_3} \cdot (1 + \text{tg}^2\delta)^{1/4}};$$

$$\dim[Z_{\text{среды}}] = \text{Ом}, \psi_{\text{среды}} = \arctg \frac{\alpha}{\beta}.$$

Учитывая, что $\text{tg}^2\delta = \frac{\text{Sin}^2\delta}{\text{Cos}^2\delta}$ и $\text{Cos}^2\delta + \text{Sin}^2\delta = 1$, полу-

$$\text{чим } Z_{\text{среды}} = \frac{377 \cdot \sqrt{\text{Cos} \delta}}{\sqrt{\epsilon'_3}}, \text{ Ом}^1.$$

Таким образом, определение электрофизических величин позволяет определить электромагнитные свойства сре-

¹ Действительная и мнимая части КДП характеризуют соответственно плотности тока смещения $\delta_{\text{см}} = \epsilon_a \cdot j\omega \cdot \dot{E}$ и тока проводимости $\delta_{\text{пр}} = j \cdot \frac{\gamma_a}{\omega} \cdot j\omega \cdot \dot{E}$ в веществе. Их отношение определяет величину тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta = \frac{\epsilon_a''}{\epsilon_a'}$. В общем случае величину $\sqrt{\text{Cos} \delta}$ следует заменить на $P = \int_0^\delta \sqrt{\text{Cos}(x)} dx$, чтобы учесть все виды возникающих при становлении поля поляризаций, $P = \sqrt{2} \left\{ 2 \cdot E(\varphi, \frac{1}{\sqrt{2}}) - F(\varphi, \sqrt{2}) \right\}$, где $F(\dots)$, $E(\dots)$ – эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно; $\varphi = \arcsin \sqrt{1 - \text{Cos}(x)}$.

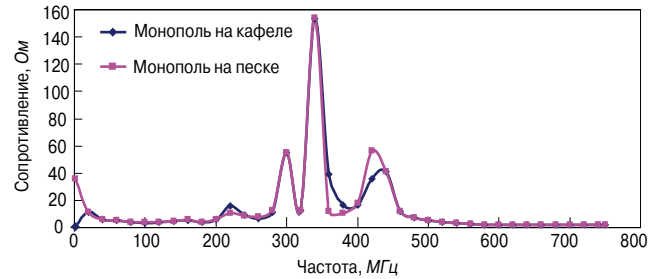


Рис. 4. Частотная зависимость реактивной составляющей импеданса антенны на различной подстилающей поверхности

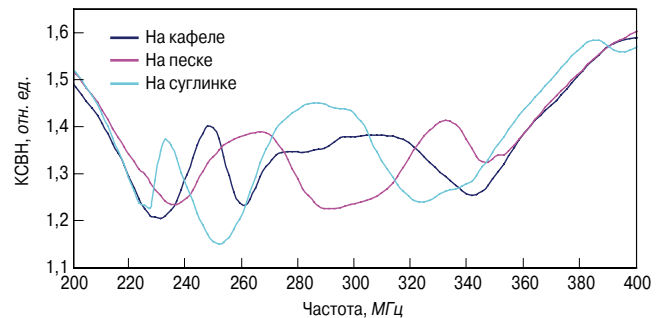


Рис. 5. Частотная зависимость КСВН на различной подстилающей поверхности

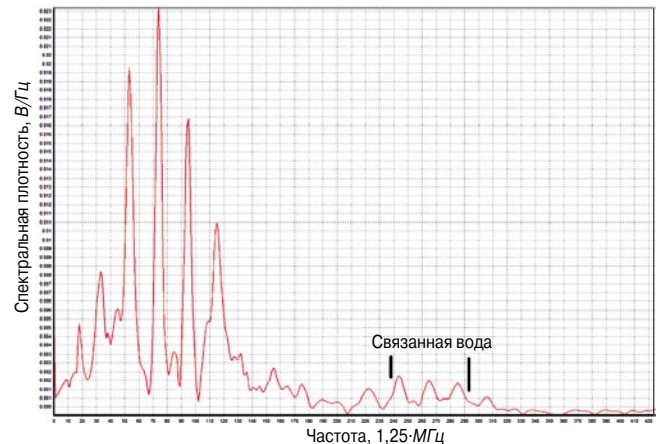


Рис. 6. Спектр отраженного сигнала, принятый монополярной антенной

ды. На рис. 1, 2 представлены частотные зависимости импедансов суглинка и корундового песка при различных значениях объемной влажности.

Смещение частоты минимума импеданса сорбента (суглинка, корундового песка) при повышении его влажности обусловлено повышением удельной электропроводности пленок. Причиной ее повышения может быть [5], во-первых, образование цепочек из молекул воды и функциональных групп сорбента (карбоксильных -COOH, гидроксильных -OH и т. п.) и возможность эстафетного механизма переноса протона вдоль таких цепочек. Во-вторых, переход с поверх-

ности твердого тела ионов примесей в пленку воды, в то время как первые адсорбционные слои воды ведут себя как чистая вода с низкой электропроводностью. Измеряемости импедансов и проявление связанной воды в виде их минимумов в диапазоне частот 350–400 МГц для суглинка (влажности 3,5–5,32%; $Z_{\min}=2,697$ Ом, 17,79 Ом, 8,928 Ом) и 325–370 МГц для корунда (влажности 3,5–4,67%; $Z_{\min}=12,943$ Ом, 6,253 Ом, 12,275 Ом) позволяют формализовать требования к антеннам, способным обнаруживать связанную воду.

На рис. 3 представлен внешний вид такой антенны – монополь с максимальной апертурой 36 см [6]. Реактивная составляющая импеданса такой антенны представлена на рис. 4. Характерной особенностью антенных измерений является возможность оценить качество согласования антенны с подстилающей средой. Например, последовательное соединение двух импедансов (антенна и среда) Z_a и $Z_{\text{среды}}$ оценивается определяемой величиной – коэффициентом отражения $|R|$:

$$|R| = \frac{Z_{\text{среды}} - Z_a}{Z_{\text{среды}} + Z_a}$$

и измеряемой величиной – коэффициентом стоячей волны по напряжению:

$$K_U = \frac{1 + |R|}{1 - |R|}$$

График частотной зависимости КСВН для инженерной подстилающей поверхности и грунтов представлен на рис. 5. Из него следует, что в случае отсутствия связанной воды (кафель, крупнозернистый песок с влажностью ~0%) графики близки друг к другу; график для суглинков с влажностью ~10% резко отличается от них в диапазоне частот 230–400 МГц.

На рис. 6 представлен спектр отраженного сигнала, принятый монопольной антенной (рис. 3) на ПК 150+86 в штоль-

не № 1 тоннельного комплекса № 1 09.10.2009 в Сочи. На нем в диапазоне частот 300–370 МГц виден спектр связанной воды.

Оперативное решение по оценке наличия связанной воды в горной выработке позволяет существенно корректировать скорость проходки. Это позволяет говорить об эффективности использования ЭМИ СШП зондирования в качестве метода, сопровождающего строительство горных выработок, при решении вопросов, связанных с прогнозной оценкой инженерно-геологических и гидрогеологических условий на трассах строящихся тоннелей, что способствует безопасному ведению горнопроходческих работ.

Список литературы

1. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во МГУ, 1988. 177 с.
2. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 79–85.
3. Потапов А.А. Диэлектрические свойства воды и протонно-активационный механизм поляризации // Журнал общей химии. Т. 63. Вып. 7. 1993. С. 1461–1471.
4. Болтинцев В.Б. Расширение возможностей мониторинга подземного пространства методом ЭМИ СШП зондирования // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 54–58.
5. Семихина Л. П. Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. Тюмень, 2005. 173 с.
6. METHOD OF ELECTROMAGNETIC PULSE ULTRA WIDEBAND PROBING OF THE UNDERLYING MEDIUM V.B. Boltintsev, B.N. Lyakhin, K.P. Bezrodnyi DOI: 10.1615/JRadioElectr.v1.i2.50 <http://www.begellhouse.com/journals/49791ac230bedeec>



АНКЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Винтовые анкера
АТЛАНТ







(495) 226-18-37
(342) 219-61-56

info@anker-system.ru
www.anker-system.ru