

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саранчук В.И. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля / В.И. Саранчук, А.Т. Айруни, К.Е. Ковалев. – К.: Наукова думка, 1988. – 190 с.
2. Эттингер И.Л. Газоёмкость ископаемых углей / И.Л. Эттингер. – М.: Недра, 1966. – 222 с.
3. Бобин В.А. Сорбционные процессы в природном угле и его структура / В.А. Бобин. – М.: Институт проблем комплексного освоения недр, 1987. – 136 с.
4. Алексеев А.Д. Прогноз и управление состоянием горного массива / А.Д. Алексеев, Н.С. Сургай. – К.: Наукова думка, 1994. – 200 с.
5. Минеев С.П. Активация десорбции метана в угольных пласта / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов. – Днепропетровск: Вебер (Днепропетровское отделение), 2007. – 252 с.
6. Черемской П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
7. Gregg, S.J. Surface Area and Porosity / S.J. Gregg, K.S. W. Sing. – London and New York: Academic Press, 1967. – 371 p.
8. Эттингер И.Л. Распределение метана в порах ископаемых углей / И.Л. Эттингер. – М. Наука, 1975. – 112 с.
9. Дубинин М.М. Микропористые структуры углеродных сорбентов / М.М. Дубинин // Адсорбция в микропорах. – М.: Наука, 1983. – С. 186 – 192.
10. Zhou L.A. Simple Isotherm Equation for Modeling the Adsorption Equilibria on Porous Solids over Wide Temperature Ranges [Text] / L. Zhou, J. Zhang // Langmuir, 2001, Vol. 17. – P. 5503 – 5507.
11. Okambawa R. Gas-Solid Interaction and the Virial Description of the Adsorption of Methane on Steam-Activated Carbon / R. Okambawa, H. Benaddi, J.-M. St-Arnaud, Tapan K. Bose // Langmuir №16, 2000. – P. 1163 – 1166.
12. Myers A. L. Characterization of adsorbents by energy profile of adsorbed molecules / A.L. Myers, F. Siperstein // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2001. – P. 73 –81.
13. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. – К.: Наукова думка, 1989. – 862 с.
14. Бобин В.А. Оценка энергии межмолекулярного отталкивания молекул сорбата в микропорах угля / В.А. Бобин, В.Н. Зимаков, В.Н. Одинцев // ФТПРПИ. – 1989.– № 5. – С. 48 – 56.
15. Гаркаленко И.А. Методика геофизических исследований скважин Донбасса / И.А. Гаркаленко, В.Ю. Зайченко, А.Ф. Михедько, Н.П. Развалов. – К.: Наукова думка, 1971. – 156 с.
16. Ходот В.В. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах / В.В. Ходот, М.Ф. Яновская, Ю.С. Премыслер и др. – М.: Наука. – 1973. – 140 с.

УДК 622.831.322: 537.531

Канд. техн. наук С.Ю. Макеев, канд. техн. наук С.Ю. Андреев,
канд. техн. наук В.И. Лойк, ведущий инженер Г.А. Рыжов
(ИГТМ НАН Украины)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Як доповнення до стандартних геофізичних методів пропонується з метою розширення їх інформативності застосовувати електромагнітне зондування масиву. Приведений математичний опис поширення випромінювання в тришаровому середовищі, що моделює гірський масив. Отримані залежності напруженості поля від діелектричних властивостей порід для хвиль, що проходять та відбиваються.

ESTIMATION OF THE ROCKS ARRAY STATE BY THE ELECTROMAGNETIC SOUNDING METHOD

To apply the array electromagnetic sounding is offered as adding to the standard geophysical methods with the purpose of their informing expansion. Mathematical description of radiation distribution in an environment with three layers, which designing a mountain range is resulted. Dependences of the field tension on rock dielectric properties for the terms of the reflected and passing waves are got.

В процессе добычи полезных ископаемых и воздействия на вмещающие породы происходят повсеместные, и часто неуправляемые, изменения напряженно-деформированного состояния горного массива, наделенного определенными физико-механическими свойствами. Последние играют разнонаправленную роль с учетом многогранности горной науки и в зависимости от того, какую цель преследуют исследовательские изыскания. Квинтэссенция этих исследований – повышение безопасности и эффективности ведения добычных работ. Это требует осуществления непрерывной и всесторонней оценки физического состояния массива. И здесь не обойтись без тщательного контроля целого ряда параметров, среди которых не всем уделяется должное внимание, но которые не менее весомы на практике и часто необходимы для более тонких исследований. В частности, к ним относятся электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, величина намагничивания угля и пород.

Грамотное использование перечисленных свойств позволяет на нужном этапе расширить область, к примеру, геофизических методов исследований и акцентировать внимание на составляющих их элементах. Это необходимо для устранения недостатков вышеназванных методов, к которым можно отнести не всегда корректные результаты измерения параметров физических полей, обусловленные неявно выраженным напряженным состоянием, и связанная с ними многозначность решения конкретной задачи. Перечисленные пробелы в определенной мере компенсируются за счет оригинальных вариантов расширения спектра регистрируемых характеристик горного массива в рамках общепринятых геофизических подходов. Характеристики должны быть получены в результате бесконтактного и безинерционного взаимодействия электромагнитных полей со слоистой гетерогенной средой, выстроены в рациональной последовательности их измерения и максимально информативны. Пределы указанного взаимодействия устанавливаются путем исследования реакции среды на конкретное электромагнитное поле.

В результате проникновения электромагнитных полей в горный массив изменяются их параметры, зависящие от типа, свойств и состояния пород. К примеру, данные электрических характеристик слоистых структур [1] показывают, что значения диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ связаны с частотой и амплитудой проходящей в массиве волны. Это, в свою очередь, позволяет исследовать потери мощности поля в среде, коэффициент поглощаемости излучения α и связанную с ним глубину проникновения поля L .

Ослабление напряженности E_2 электрической составляющей поля E_0 представляется в виде [1]

$$E_2 = E_0 \exp(-\alpha \cdot x). \quad (1)$$

Расстояние x , на котором амплитуда волны E_0 падает в 2,7 раза по сравнению с ее начальным значением, совпадает с глубиной проникновения L . При этом удовлетворяется соотношение $L \cdot x = 1$.

Значение $L = \frac{1}{\alpha}$ обратно по величине коэффициенту поглощаемости и определяется следующим образом:

$$L = \frac{2}{q \cdot \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}}, \quad (2)$$

где $q = \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'$ – электропроводность породы, см/м;

$\omega = 2\pi \cdot f$ – угловая частота колебаний, Гц;

$\varepsilon_a = \varepsilon' \cdot \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м;

$\mu_a = \mu' \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ – магнитная постоянная, Г/м;

μ' – магнитная проницаемость породы.

Рассчитав по (2) глубину проникновения L , и подставив в (1) значение коэффициента поглощаемости $\alpha = 1/L$, получим для песчаника $E_2 = 0,62 \cdot E_0$, то есть величина ослабления поля средой невелика.

Поскольку горный массив представляет собой сложнапряженную трещиновато-пористую структуру и состоит, по меньшей мере, из породы и газовых включений, то его свойства должны подчиняться формуле [2]

$$\varepsilon'_m = \varepsilon'_2 \cdot \left(\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} \right)^V, \quad (3)$$

где $V = V_1 / V_{\text{об}}$ – отношение объема газонасыщенных пор к общему объему;

ε'_m , ε'_1 и ε'_2 – соответственно, диэлектрические проницаемости массива, газа и породы.

Учитывая, что для газа $\varepsilon'_1 = 1$, получим из (3)

$$\varepsilon'_m = \varepsilon'_2^{1-V}. \quad (4)$$

Из выражений (1) и (2) можно получить зависимость параметров волны E_2 , прошедшей ограниченный объем массива, от пористости, влияющей на деформационные свойства пород.

На рисунке 1 представлена схема процесса прохождения в гетерогенной среде электромагнитной волны, выступающей в роли фактора, позволяющего расширить диапазон регистрации полезных характеристик дополнительно к геофизическим исследованиям. В этой схеме плоская волна E_0 от излучателя передается на трёхслойную симметричную диэлектрическую систему и распадается на отраженную волну E_1 и проходящую – E_2 , регистрируемую приемным устройством.

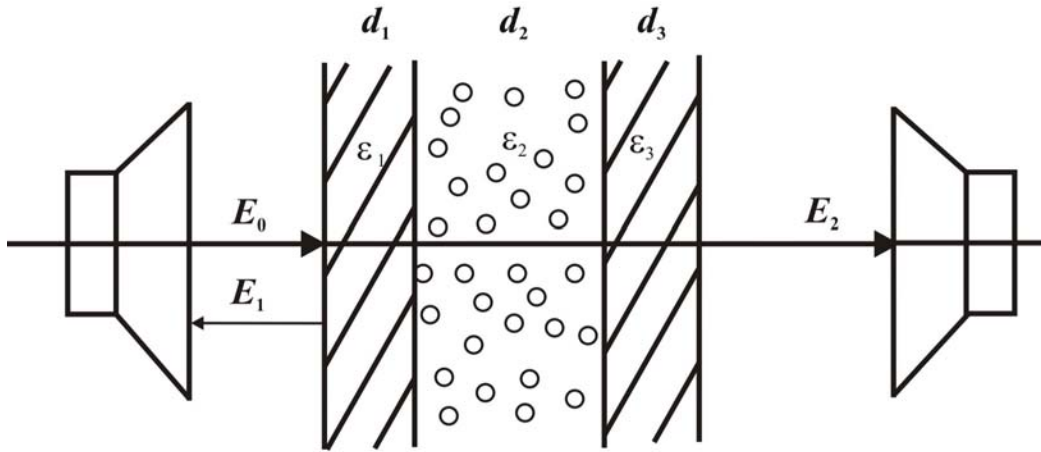


Рис. 1 – Схема воздействия на трехслойный диэлектрический объект

Плоскопараллельные воздушные слои 1 и 3 ограничивают с двух сторон слой 2 (углепородный массив). Состояние слоя 2 при электромагнитном воздействии определяются, прежде всего, диэлектрической проницаемостью ε'_M , которая зависит от свойств массива.

Последующий анализ процесса поглощения массивом волны позволит вносить коррективы в приемо-передающую систему, но уже с учетом вида поляризации, сдвига фазы, амплитуды и длины волны, а также расстояния между излучателем и слоями.

Как показано в [1], распределение электромагнитного поля на облучаемой поверхности зависит лишь от двух координат и определяется соотношением

$$p(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(U_1) \cdot \exp(iz\sqrt{K^2 - U^2}) \cdot \exp(iU_1 \cdot x) \cdot dU, \quad (5)$$

где K – волновой вектор, модуль которого равен $2\pi/\lambda$;

$g(U_1) = E_0 \int_0^a \sin Ax \cdot \exp(-iU_1 \cdot x) dx$ – комплексная функция, описывающая амплитуду

и фазу отдельной плоской волны;

a – ширина излучателя;

A – амплитуда волны.

Коэффициенты отражения и прохождения волны определяются соответственно по известным формулам

$$R = \frac{E_1}{E_0}, \quad T = \frac{E_2}{E_0} \quad (6)$$

Для определения амплитуд для волн E_1 и E_2 достаточно получить значения R и T и, соответственно, умножить на них подинтегральное выражение (5).

Задача, таким образом, сводится к определению амплитудных характеристик системы

$$|R|^2 = f_1(\theta) \quad \text{и} \quad |T|^2 = f_2(\theta) \quad (7)$$

при падении волны длиной λ под углом θ .

Для симметричной трёхслойной диэлектрической системы [3]:

$$\left. \begin{aligned} |R|^2 &= \frac{4P_1^2}{P^2 + Q^2} \\ |T|^2 &= \frac{(1 - r_{01}^2)^2 \cdot (1 - r_{12}^2)^2}{P^2 + Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где r_{01}, r_{12} – координаты межслоевых границ;

$$P = (1 - r_{01}^2) \cdot [\cos(2\psi_1 + \psi_2) - r_{12}^2 \cdot \cos(2\psi_1 - \psi_2)] \quad (9)$$

$$P_1 = r_{01} \cdot \sin(2\psi_1 + \psi_2) - r_{01} \cdot r_{12}^2 \cdot \sin(2\psi_1 - \psi_2) + r_{12} \cdot (1 + r_{01}^2) \cdot \sin\psi_2; \quad (10)$$

$$Q = (1 + r_{01}^2) \cdot \sin(2\psi_1 + \psi_2) - r_{12}^2 \cdot (1 + r_{01}^2) \cdot \sin(2\psi_1 - \psi_2) + 4r_{01} \cdot r_{12} \cdot \sin\psi_2; \quad (11)$$

Здесь ψ_n – толщина n -го слоя системы:

$$\psi_n = \frac{2n}{\lambda} d_n \sqrt{\varepsilon_n - \sin^2\theta}, \quad (12)$$

где ε_n – диэлектрическая проницаемость n -го слоя;

d_n – геометрическая толщина n -го слоя.

При падении волны на первый слой из воздуха в выражении для r_{01} значение $\varepsilon_n = 1$.

Относительная простота выражений (8) объясняется тем, что в симметричной трёхслойной системе первый и третий слои идентичны. Корректность решения (8) легко проверить для случая, когда диэлектрические проницаемости всех трёх слоев равны. При этом трёхслойная система превращается в один слой толщиной $d = d_1 + d_2 + d_3$, а проходящая волна характеризуется выражением [4]:

$$E_2 = \frac{E_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \exp(-\alpha \cdot d) \cdot \exp(-j \cdot \beta \cdot d)}{1 - R_1 \cdot R_2 \cdot \exp(-2\alpha \cdot d) \cdot \exp(-j \cdot 2\beta \cdot d)} = E_0 \cdot T, \quad (13)$$

где j – комплексная составляющая;

$$\beta = K \sqrt{\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon};$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \beta \cdot \operatorname{tg} \delta;$$

ε – диэлектрическая проницаемость;

R_1, T_1 – коэффициенты отражения и преломления плоской волны при нормальном ее падении из воздуха на границу однородного диэлектрика

$$R_1 = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}}, \quad T_1 = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon}}, \quad (14)$$

R_2, T_2 – те же коэффициенты при падении волны из слоя диэлектрика в воздух

$$R_2 = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1}; \quad T_2 = \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}}. \quad (15)$$

Единственным параметром, отличающим основной и проверочный варианты, является отсутствие в первом из них $tg\delta$ – фактора потерь, который для хороших диэлектриков можно принять равным 10^{-3} .

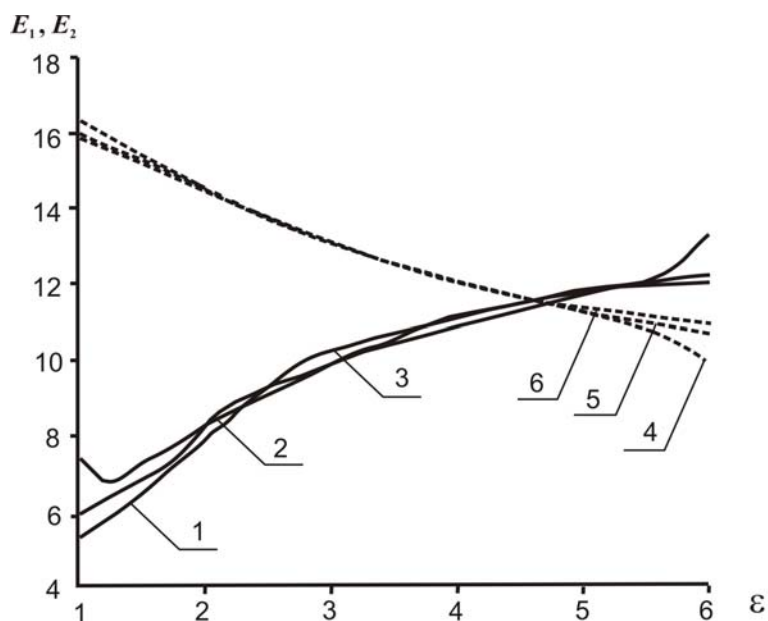
Диэлектрическая постоянная ε_m' второго слоя системы – углепородного массива определяется выражением (3). При этом $\varepsilon_2' = \varepsilon_m' = f(V)$, и в общих решениях:

$$|R|^2 = f(V) \text{ и } |T|^2 = f(V). \quad (16)$$

Отсюда выведены зависимости напряжённости электрической составляющей поля E от диэлектрических параметров углепородного массива. Здесь в первую очередь вызывает интерес влияние размера слоев на эффективность распространения электромагнитной волны (рис. 2), что взаимосвязано с такими параметрами как длина волны, угол ее падения, размеры излучателя, расстояние между излучателем и слоями. Их учет позволяет вносить дополнительные уточняющие характеристики к полученным с помощью геофизического контроля результатам при неблагоприятных для прохождения сейсмоакустических сигналов горно-геологических условиях. Это необходимо потому, что указанные сигналы из нарушенных зон не обладают достаточной информативностью для более правильной интерпретации сложнонапряженного состояния в нередко встречающихся аномальных и неоднородных областях углепородного массива.

Симметричное расположение обоих семейств кривых на рисунке 2 говорит о возможности одинаково хорошо контролировать изменение состояния пористой структуры массива, как посредством отраженных, так и проходящих электромагнитных волн [5]. В расчётах параметры электромагнитного поля и исследуемого объекта варьировались в следующих пределах: $\lambda - 0,2-0,9$ м; $a - 0,1-0,5$ м; $z - 0,0-1,0$ м; $\varepsilon' - 1-6$; $d_1 - 0,05-0,1$ м; $d_2 - 50-150$ м.

Не менее важным параметром, как и размеры слоя d_2 , является расстояние от излучателя до исследуемого объекта, способное влиять на распределение в нем электромагнитной волны. Учитывая мощность излучения и получая при этом амплитудные значения поля, можно установить конкретный параметр, например, величину E , которая дополнительно к геофизическим измерениям будет характеризовать напряженно-деформированное состояние массива и особенности трещинообразования в нем под влиянием горных работ.



1, 2, 3 – отражённые волны; 4, 5, 6 – проходящие волны;
1 и 6 – $d_2 = 50$ м; 2 и 4 – $d_2 = 100$ м; 3 и 5 – $d_2 = 150$ м

Рис. 2 – Напряжённость поля E проходящей и отражённой волн в зависимости от диэлектрической проницаемости углеродного массива при различных значениях размеров слоя d_2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арш Э.И. Применение токов высокой частоты в горном деле. – М.: Недра, 1967. – 312 с.
2. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. – М.: Наука. – 1965. – 280 с.
3. Каплун В.А. Обтекатели антенн. – М.: Советское радио. – 1974. – 240 с.
4. Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В.А. Кутев. – М.: Советское радио, 1977. – 174 с.
5. Викторов В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лонки, А.С. Совлупов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.

УДК 622.411:533.16

Д-р техн. наук Г.А. Шевелев,
д-р техн. наук В.Г. Перепелица
(ИГТМ НАН Украины)

МЕТАН В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ШАХТЫ

Представлено експериментальні дані про розподіл метану і витоків повітря у вироблених просторах шахт.

THE METHAN IN THE GOAF OF MINE

Are presented experimental data about distribution the methane and leakages air in the goaf of the mine.

Выработанное пространство добычных участков представляет собой трехмерное пространство, через которое движутся два ортогонально направленных потока воздуха и метана. Знание закономерностей их течения необходимо для понимания физической сущности происходящих процессов и при расчетах потокораспределения.