

© В.А. ТАБАРИН, А.Ю. ПОТОЦКИЙ

Тюменский государственный университет
vtabarin@utmn.ru, ponab@yandex.ru

УДК 621.373.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В КЕРНАХ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

DETERMINATION OF BOUND WATER IN THE CORES AT MICROWAVE FREQUENCIES

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается одно из перспективных и экономически выгодных направлений в решении проблемы определения связанной воды с применением аппаратуры и методов оценки ее содержания по диэлектрическим свойствам геологического пласта с использованием электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн. Особый интерес вызывает использование СВЧ методов для оценки водонасыщенности kernового материала в тех случаях, когда традиционные электрические методы оказываются бессильными или ненадежными.

Очевидно, что наиболее полное представление о диэлектрических свойствах вещества можно получить из измерений его комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k . В работе представлена методика и технология определения содержания связанной воды в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0,03 м. По результатам измерения их диэлектрических характеристик на СВЧ осуществлена проверка разработанной методики на коллекции образцов различного состава с известными значениями коэффициентов пористости K_n и остаточной воды $K_{об}$. Значения K_n образцов керна варьировались от 3 до 24%, значения $K_{об}$ изменялись в пределах от 88.9 до 32.6%. Погрешность в определении связанной воды не превышала 10%.

SUMMARY. The paper considers one of the most promising and cost-effective ways to respond to the problem of determining bound water using equipment and methods of evaluation of its content by the dielectric properties of the geological formation using electromagnetic radiation of microwave (MW) range of wavelengths. Of particular interest is the use of microwave techniques for the assessment of water saturation of core material in the cases where conventional electrical methods are powerless or unreliable. Obviously, the most complete picture of the dielectric properties of matter can be obtained from the measurements of its complex permittivity ϵ_k . The paper presents the methodology and technology of determining the content of bound water in the cylindrical core samples with the diameter and height of 0.03 m. The developed technique for the collected samples of different composition with known values of porosity K_n and residual water $K_{об}$ was tested according to the results of measuring their dielectric characteristics at microwave frequencies. The values of K_n core samples ranged from 3 to 24%, the $K_{об}$ values ranged from 88.9 to 32.6%. Determination error of bound water does not exceed 10%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Керн, связанная вода, комплексная диэлектрическая проницаемость, сверхвысокие частоты, квазиоптический метод измерения.

KEY WORDS. Core, bound water, complex permittivity, microwave frequencies, quasi-optical measurement.

Введение. В настоящее время остро стоит проблема получения данных о содержании связанной воды в образцах керна, отбираемого при разведочном бурении скважин. Среди известных способов определения связанной воды в практике лабораторных исследований наибольшее распространение получил метод центрифугирования. Однако результаты измерений, полученные этим методом, зависят от технического совершенства используемой центрифуги и могут значительно отличаться для одних и тех же образцов.

Одним из перспективных и экономически выгодным направлением в решении проблемы определения связанной воды является применение методов оценки ее содержания по диэлектрическим свойствам геологического пласта с использованием электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн.

Наиболее полное представление о диэлектрических свойствах вещества можно получить из измерений его комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k : $\epsilon_k = \epsilon - j\sigma/\omega = \epsilon' - j\epsilon''$, где ω — угловая частота СВЧ электромагнитного излучения, σ — проводимость, ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества, ϵ' и ϵ'' — действительная и мнимая составляющие комплексной диэлектрической проницаемости вещества.

К достоинствам измерений ϵ на СВЧ следует отнести достаточно большую контрастность между значениями ϵ воды ($\epsilon = (40-80) \epsilon_0$, где ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума) и скелета породы ($\epsilon = (3-6) \epsilon_0$).

Целью настоящей работы является разработка методики и технологии определения содержания связанной воды в цилиндрических образцах керна диаметром и высотой 0,03 м по результатам измерения их диэлектрических характеристик на СВЧ и проверка разработанной методики на коллекции образцов различного состава с известными значениями коэффициентов пористости K_p и остаточной воды $K_{об}$.

Особенности определения содержания связанной воды на СВЧ.

Модель геологической породы можно представить в виде смеси нескольких компонент минералов, пластовой воды, нефти и газа. В группу электрических свойств входят электропроводность, диэлектрическая проницаемость и ряд других.

Имеются работы [1-3], в которых делаются попытки предсказать диэлектрические характеристики многокомпонентной модели геологической породы. В частности, в [3] рассматриваются эмпирические формулы, связывающие комплексную диэлектрическую проницаемость смеси с пористостью, нефте- и водонасыщенностью, а также с диэлектрической проницаемостью отдельных компонент.

Вода, благодаря своей высокой относительной диэлектрической проницаемости, наиболее сильно влияет на общие диэлектрические свойства геологического пласта по сравнению с другими его компонентами.

При полной и других видах влагоемкости на границах фаз породы протекают электрохимические реакции, и по обе их стороны создается двойной

электрический слой (ДЭС) — особое распределение электрических зарядов в приграничных областях [4-8]. Часть молекул воды ориентируется и удерживается в поровом пространстве около положительных и отрицательных зарядов на поверхности твердой фазы пород, образуя слой прочно связанной воды. Поле этого слоя и остаточные электростатические силы ориентируют дополнительные количества воды, которые создают рыхлосвязанный ее слой. Эти оба слоя образуют двойной электрический слой ориентационного вида — связанную воду. Свободная вода — это жидкость в центральных участках пор [4].

Таким образом, наиболее полное представление о диэлектрических свойствах геологической породы можно получить из измерений комплексной диэлектрической проницаемости. Из определения ϵ_k видно, что $\epsilon_k = \sigma/\omega$ доминирует на низких частотах. Вследствие этого, с помощью низкочастотных зондов можно точно измерять проводимость геологического пласта. Однако из-за большой степени влияния минерализации пластовой воды на величину проводимости пласта получить достоверные данные о водо- или нефтенасыщенности породы в этом случае затруднительно.

С другой стороны, на очень высоких или сверхвысоких частотах становится существенным значение вещественной части ϵ_k , т.е. $\epsilon_k \approx \epsilon^1$. Значение ϵ^1 находится между $40 \epsilon_0$ и $80 \epsilon_0$ для воды и между $3 \epsilon_0$ и ϵ_0 для нефти и газа. И, что очень важно, ϵ^1 не столь чувствительна к минерализации пластовой воды, как проводимость, определяемая по методу сопротивлений [2]. Вместе с тем установлено, что ϵ^1 скелета геологических пород составляет от 3 до $6 \epsilon_0$ [2]. Следовательно, определение диэлектрической проницаемости на ВЧ и СВЧ является хорошим методом оценки пласта, особенно его водонасыщенности, там, где традиционные электрические методы ненадежны.

Пусть вода в порах горной породы рассматривается как состоящая из 2-х фаз — общего объема поровой воды и воды, связанной с поверхностью горной породы. Тогда уровень водонасыщенности K_B^0 , при котором диэлектрическая постоянная становится менее чувствительной к водонасыщенности, будет служить признаком количества связанной воды в горной породе. Тот факт, что K_B^0 изменяется от образца к образцу, в [2] объясняется изменением количества связанной воды в разных породах. Следовательно, площадь внутренней поверхности порового пространства, которая определяет процент содержания связанной воды в горной породе, будет управлять положением точки K_B^0 на графике $\epsilon = \phi(K_B)$. Образцы с большим отношением площади к объему содержат больший процент связанной воды в порах и это отразится на положении K_B^0 .

Для реализации цели будем использовать квазиоптический метод, при котором образец располагается в свободном пространстве между излучающей и приемной антеннами. В процессе измерений регистрируются такие характеристики распространения электромагнитных волн через образец, как затухание α и фаза волны β .

С феноменологической точки зрения электрические свойства любого вещества могут быть охарактеризованы одной из нескольких пар значений величин, принятых за основные в той или иной формальной трактовке [9]. Так, например, в уравнения Максвелла входят диэлектрическая проницаемость ϵ и проводимость σ . В другом варианте формальной трактовки свойств диэлектрика в электромагнитном поле вводится комплексная диэлектрическая проницаемость:

$$\epsilon_k = \epsilon^1 - j \epsilon^{11}.$$

Из решения уравнений Максвелла следует, что, определив экспериментально одну из двух пар величин (ε, σ) или $(\varepsilon^I, \varepsilon^{II})$, можно вычислить другую пару величин, характеризующих диэлектрик.

Выбор измеряемых параметров произведем, используя плоскую монохроматическую волну, распространяющуюся вдоль оси Z :

$\vec{E}(z,t) = \vec{e}_0 E_0 \text{COS}(\omega t + \beta z)$. Число $\beta = 2\pi/\lambda$ (где λ — длина волны) носит название постоянной распространения волны (фаза волны).

Распространение волны в любой реальной среде неизбежно сопровождается уменьшением ее амплитуды за счет тепловых потерь. Закон затухания, очевидно, будет выглядеть следующим $E_0(z) \propto e^{-\alpha z}$.

Используя очевидные преобразования [9], получим связь вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости с непосредственно измеряемыми характеристиками волны α и β в виде:

$$\varepsilon^I = (\beta^2 - \alpha^2) / \omega^2 \mu_a, \quad \varepsilon^{II} = 2\alpha\beta / \omega^2 \mu_a. \quad (1)$$

Измеряется α в неперах или децибелах. Например, $\alpha = \ln E_1/E_2 = 1/2 \ln P_1/P_2$ (в неперах), $\alpha = 20 \lg E_1/E_2 = 10 \lg P_1/P_2$ (в децибелах). Здесь P_1, P_2 — мощности электромагнитного излучения в точках с координатами z_1 и z_2 . Как видно, величины ε^I и ε^{II} измеряются косвенно в результате расчета по формулам (1). В то же время каждый из непосредственно измеряемых параметров излучения α и β зависит от диэлектрических свойств исследуемого материала, а значит, и от водонасыщенности образца. Зависимости $\alpha = f(K_B)$ и $\beta = \varphi(K_B)$ должны иметь особенности в области значений K_B , близких к K_B^0 , определяющие содержание связанной воды в порах образца породы.

Измерения параметров α и β электромагнитной волны в зависимости от характеристик исследуемых образцов керна были произведены на установке, блок-схема которой представлена на рис. 1.

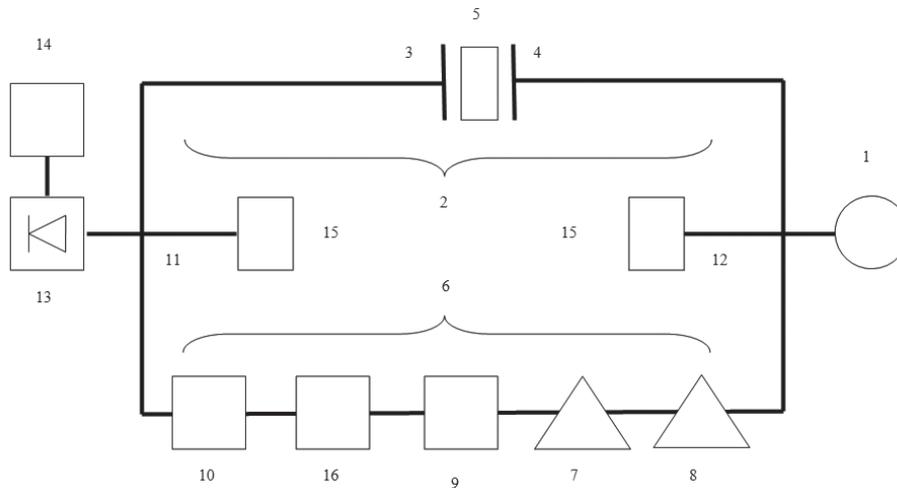


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 — генератор СВЧ; 2 — рабочий канал; 3, 4 — приемная и передающая антенны; 5 — исследуемый образец керна; 6 — измерительный канал; 7, 8 — измерительный и компенсационный аттенюаторы; 9, 16 — измерительный и компенсационный фазовращатели; 10 — вентиль; 11, 12 — двойные тройники; 13 — детекторная секция; 14 — регистрирующий прибор; 15 — согласованные нагрузки

Измерение зависимостей $\alpha = f(K_B)$ и $\beta = \varphi(K_B)$ проводилось на частоте 9 ГГц. Процесс измерения состоит в установлении минимальных показаний регистрирующего прибора 14 с помощью компенсационных аттенюатора 8 (величина α) и фазовращателя 9 (величина β). Используя результаты калибровки установки, по измеренным значениям α и β определяют водонасыщенность ядра.

Методика определения связанной воды.

Методика определения связанной воды разрабатывалась с использованием коллекции образцов ядра цилиндрической формы диаметром и высотой 0.03 м. Коллекция состояла из образцов с известными значениями коэффициента пористости K_p и остаточного водонасыщения K_{OB} . Значения K_p варьировались от 3 до 24%, значения K_{OB} изменялись в пределах от 88.9 до 32.6%.

В процессе измерений образцы насыщались дистиллированной водой и раствором NaCl различной концентрации (1.75, 8, 17.5 и 35 г/л). Образцы в растворе находились 24 часа под вакуумом. После этого в эксикатор подавался воздух и образцы были готовы к измерениям в СВЧ установке.

Контроль массы образца, извлеченного из СВЧ установки, осуществлялся с помощью аналитических весов, позволяющих проводить измерения с точностью до 0.001 г. Коэффициент водонасыщения вычислялся по формуле:

$$K_B = \frac{m_i - m_o}{m_1 - m_o} 100\%,$$

где m_o — масса сухого образца, m_i — масса полностью насыщенного образца в воздухе, m_1 — масса частично насыщенного образца. Изменение K_B образца проводилось методом капиллярной вытяжки. Как правило, одновременное измерение α и β происходило за 2-3 минуты. Весь процесс снятия зависимостей $\alpha = f(K_B)$ и $\beta = \varphi(K_B)$ требовал от 3 до 5 суток.

Величины α и β при фиксированных значениях K_B измерялись двумя способами, отличающимися выбором последовательности балансировки СВЧ схемы с помощью измерительных аттенюатора и фазовращателя. В первом способе баланс рабочего и измерительного каналов при наличии образца ядра достигался сначала с помощью аттенюатора, а затем — фазовращателя. Во втором способе последовательность достижения баланса была обратной. Эксперименты на коллекции образцов показали, что наибольшей информативностью обладает зависимость $\beta = \varphi(K_B)$ (полученная первым способом), содержащая либо несколько точек экстремума, либо точки перегиба. Типичная кривая представлена на рис. 2.

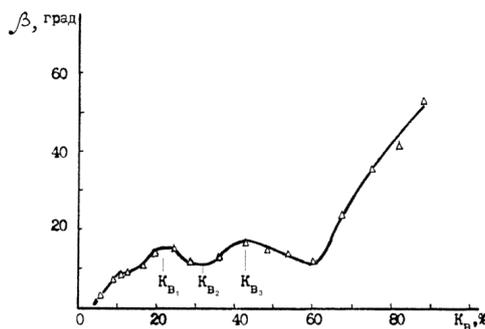


Рис. 2.

Выводы.

1. Разработана и апробирована на коллекции образцов керн СВЧ методика измерения содержания связанной воды.

2. Обнаружено, что зависимость $\beta = \varphi(K_B)$ содержит больше информации о диэлектрических свойствах вещества, чем затухание α , и может быть использована как для определения общего содержания связанной воды, так и отдельных ее видов, соответствующих представлению о двойном электрическом слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобранова В.Н. Петрофизика. М.: Недра, 1986. 386 с.
2. Nait, R., Nur, A. Dependence of dielectric permittivity of core samples at water saturation // Proc. of SPNLA, twenty-fifth annual logging symposium, June. 1984. Pp. 10-13.
3. Shen, L.C., Savre, W.C., Price, J.M., Athavale, K. Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies // Geophysics. V. 50. № 4. 1985. Pp. 692-704.
4. Зацепин Г.Н. Физические свойства и структура воды. М.: Изд-во МГУ, 1987. 171 с.
5. Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых группах / В сб.: Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 3 / Под ред. Киселева В.Д. М.: Изд-во МГУ, 1969. 286 с.
6. Танкеева Л.К. Исследование связанной воды в глинистых песчаниках / В сб.: Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 3 / Под ред. Киселева В.Д. М.: Изд-во МГУ, 1969. 286 с.
7. Liang, C. Shen. A laboratory technique for measuring dielectric properties of core samples at ultrahigh frequencies // Society of petroleum engineers journal. 1985. V. 25. № 4. Pp. 502-514.
8. Rau, R.N., Wharton, R.P. Measurement of core electrical parameters at ultrahigh and microwave frequencies // Journal of petroleum technology. 1982. November. Pp. 2689-2692.
9. Бранд А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Сов. радио, 1963. 403 с.

REFERENCES

1. Kobranova, V.N. *Petrofizika* [Petrophysics]. Moscow, 1986. 386 p. (in Russian).
2. Nait, R., Nur, A. Dependence of dielectric permittivity of core samples at water saturation // Proc. of SPNLA, twenty-fifth annual logging symposium, June. 1984. Pp. 10-13.
3. Shen, L.C., Savre, W.C., Price, J.M., Athavale, K. Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies // Geophysics. V. 50. № 4. 1985. Pp. 692-704.
4. Zatsepin, G.N. *Fizicheskie svoystva i struktura vody* [Physical properties and structure of water]. Moscow, 1987. 171 p. (in Russian).
5. Zlochevskaia, R.I. Bound water in clay groups / In: *Sviazannaia voda v dispersnykh sistemakh. Vyp. 3* [Bound water in disperse systems. Issue 3]. Moscow, 1969. 286 p. (in Russian).
6. Tankeeva, L. K. The study of bound water in clay sandstones / In: *Sviazannaia voda v dispersnykh sistemakh. Vyp. 3* [Bound water in disperse systems. Issue 3]. Moscow, 1969. 286 p. (in Russian).
7. Liang, C. Shen. A laboratory technique for measuring dielectric properties of core samples at ultrahigh frequencies. *Society of petroleum engineers journal*. 1985. V. 25. № 4. Pp. 502-514.
8. Rau, R.N., Wharton, R.P. Measurement of core electrical parameters at ultrahigh and microwave frequencies. *Journal of petroleum technology*. 1982. November. Pp. 2689-2692.
9. Brand, A.A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Study of dielectrics at microwave frequencies]. Moscow, 1963. 403 p. (in Russian).

Авторы публикации

Табарин Валерий Андреевич — профессор кафедры радиофизики Института математики и компьютерных наук Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Потоцкий Антон Юрьевич — аспирант кафедры радиофизики Тюменского государственного университета

Authors of the publication

Valery A. Tabarin — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Radio Physics Department, Institute of Physics and Chemistry, Tyumen State University

Anton Yu. Pototsky — Post-graduate student, Radio Physics Department, Institute of Physics and Chemistry, Tyumen State University