

Сравнение частотных зависимостей электрических свойств для различных пород, представленных на рис. 2, 3 (пески, кварцевые пудры, глины, суглинки и песчаники), позволяет сделать следующие обобщения:

1. Резкая частотная зависимость электрических свойств, наблюдаемая у некоторых типов водосодержащих пород в частотном диапазоне 10^3 — 10^9 Гц, связана с особенностями микроструктуры порового пространства. А именно с наличием квазиизолированных тонкослоистых или ячеистых структур с весьма небольшим содержанием твердого материала, который образует тонкие стенки, изолирующие один от другого смежные объемы хорошо проводящей жидкости («разделенная вода»). В наибольшей степени такое строение порового пространства характерно для глин и глиносодержащих пород.

2. Присутствие в породе даже небольшого количества глины («разделенной воды») может вызывать увеличение низкочастотных значений диэлектрической проницаемости до 1000 отн.ед. и более (в зависимости от минерализации), что намного превышает диэлектрические проницаемости отдельных породообразующих минералов.

3. Породы с изометричной формой частиц минерального скелета без глинистых или металличе-

ских примесей не подвержены частотной дисперсии ϵ и ρ вне зависимости от значения удельной поверхности твердой фазы (при обычных для естественных условий значениях минерализации и водосодержания).

4. При достаточно высоких частотах поля, когда начинает выполняться условие $\text{tg} \delta < 1$, микроструктура породы и ее глинистость не оказывают существенного влияния на эффективные электрические свойства породы, которые становятся аддитивно взаимосвязанными с ϵ и ρ породообразующих компонентов.

В заключение следует отметить, что анализ частотных зависимостей обеих составляющих полного сопротивления горных пород (ϵ и ρ) предоставляет широкие возможности для геологической и петрофизической интерпретации результатов геофизических исследований. Например, сопоставляя найденные значения структурных коэффициентов и крутизну дисперсионных кривых, можно судить об особенностях строения порового пространства пород, степени их глинистости и проводить количественную оценку ряда петрофизических характеристик.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 02-05-65079а, Минобразования РФ Е 00-8.0-3, проекта ФЦП «Интеграция» Б-0055.

ЛИТЕРАТУРА

1. А х а д о в Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов М.: Наука, 1987.
2. К у л ь ч и ц к и й Л.И., У с ь я р о в О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981.
3. Ч е л и д з е Т.Л., Д е р е в е н к о А.И., К у р и л е н к о О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наук. думка, 1977.
4. H a s l u n d, E. Dielectric dispersion of salt-water-saturated porous glass containing thin glass plates // Geophysics. 1996. № 6.
5. S t e w a r t, D.C., W.L. A n d e r s o n, G r o v e r T.P., L a b s o n V.F. Shallow subsurface mapping by electromagnetic sounding in the 300 kHz to 30 MHz range: model studies and prototype system assessment // Geophysics. 1994. 8.

Московский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — Д.С. Даев

УДК 550.3

О.Е. БОГДАНОВА

ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА ОБРАЗЦАХ ПОРОД КОЛЛЕКТОРОВ С УЧЕТОМ ПЛАСТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Приведены аппаратура и методика капиллярного вытеснения воды из образцов пород-коллекторов при пластовых температуре и давлении и метод определения граничной водонасыщенности.

Граничная водонасыщенность толщи нефтяного коллектора определяется на образцах керна коллектора по данным капиллярного вытеснения из них модели пластовой воды. Оно проводится индивидуально для каждого образца в специальных камерах с полупроницаемыми мембранами, на которые устанавливаются образцы [2]. Камеры герметично закрываются и в них при фиксированном давлении P_k подается воздух. Вода, вытесненная воздухом из капилляров образцов, проходит через мембраны, непроницаемые для воздуха, накапли-

вается в сборных сосудах на выходе из камер и взвешивается. Повышая давление воздуха и учитывая массу порций выходящей воды, в результате устанавливают зависимость текущей водонасыщенности K_g образцов от P_k :

$$K_g = f(P_k).$$

При обработке полученных данных по формулам Бурдайна рассчитывают относительные проницаемости образцов по нефти $K_{ДРН}$ и воде $K_{ДРв}$ при различных значениях водонасыщенности и

устанавливают зависимости $K_{ПРн}=f(K_0)$ и $K_{ПРв}=f(K_0)$ [3, 7].

В дальнейшем из соотношения

$$f=1/(1+K_{ПРн}/K_{ПРв} * \mu_0/\mu_n), \quad (1)$$

предложенного Д. Амиксом и др. [1], задавая значение f , равным 1% [3], и учитывая вязкости воды μ_0 и нефти μ_n в пластовых условиях, находят величину отношения $K_{ПРн}/K_{ПРв}$ и из кривых $K_{ПРн}=f(K_0)$ и $K_{ПРв}=f(K_0)$ значение K_0^* , при котором эта величина реализуется. K_0^* — граничная водонасыщенность нефтяного коллектора, разграничивающая водонасыщенность вышележащей продуктивной толщи, из которой отбирается безводная нефть, от водонасыщенности нижележащей, из которой получают нефть с водой.

Недостаток приведенной выше методики — определение исходной кривой $K_0=f(P_k)$ для вычисления параметров $K_{ПРн}$, $K_{ПРв}$ и K_0^* в нормальных условиях при комнатной температуре.

Автор приводит технологию учета температуры при капиллярном вытеснении воды из образцов пород. Сущность этой технологии состоит в определении текущей водонасыщенности K_0 образцов при пластовых температуре и давлении и фиксированных значениях капиллярного давления P_k . Получение нескольких пар значений K_0-P_k дает возможность скорректировать исходную кривую $K_0=f(P_k)$, полученную при измерениях в нормальных условиях.

Аппаратура. В [1] указана возможность использования центрифуги для осуществления капиллярного вытеснения воды из образцов пород. Известны эксперименты при определении остаточной водонасыщенности при нагреве образцов, помещаемых в центрифугу [4]. При этом стакан центрифуги оборудовался электрическим термостатом, что требовало реконструкции центрифуги и могло быть осуществлено только для крестообразного ротора с низкими оборотами.

В нашем решении для центрифуги типа ЦЛС-3 с гнездами в сплошном роторе одно или несколько гнезд оборудовалось внутри чехлом из теплоизоляционного материала и в него помещались нагретые до пластовой температуры камеры высокого давления с исследуемыми образцами (рис. 1). Предварительно в камере устанавливался насыщенный водой образец породы, свободное пространство внутри камеры заполнялось рабочей жидкостью (бензин, керосин) и создавалось давление в этой жидкости, равное пластовому в месте отбора зерна породы. Для получения жидкостного давления камера подсоединялась к источнику давления (ИД) (рис. 2). Внутренние полости источника предварительно заполняются рабочей жидкостью. Давление в системе камера—источник создается при заворачивании штока 8 внутрь корпуса и может достигать 60 МПа. Измерения проводятся в следующей последовательности.

1. Образец породы предварительно экстрагируется, высушивается при 105°C до постоянной массы G_1 , насыщается моделью пластовой воды и взвешивается (масса G_2).

2. Насыщенный водой образец помещается в камеру, заполненную рабочей жидкостью, камера подсоединяется к источнику давления.

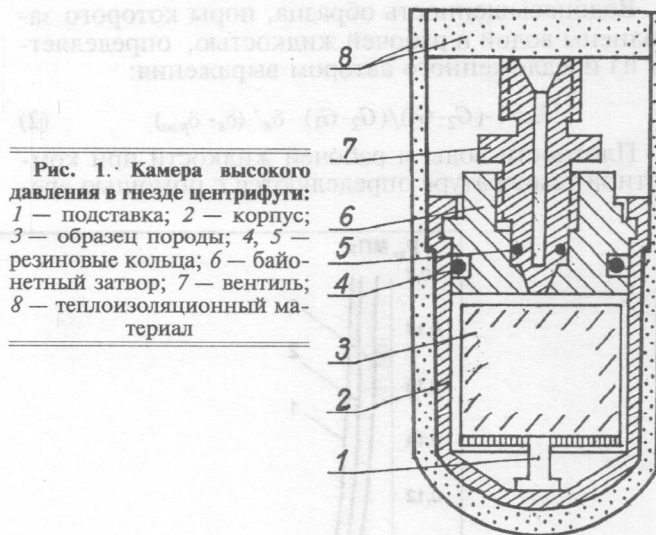


Рис. 1. Камера высокого давления в гнезде центрифуги: 1 — подставка; 2 — корпус; 3 — образец породы; 4, 5 — резиновые кольца; 6 — байонетный затвор; 7 — вентиль; 8 — теплоизоляционный материал

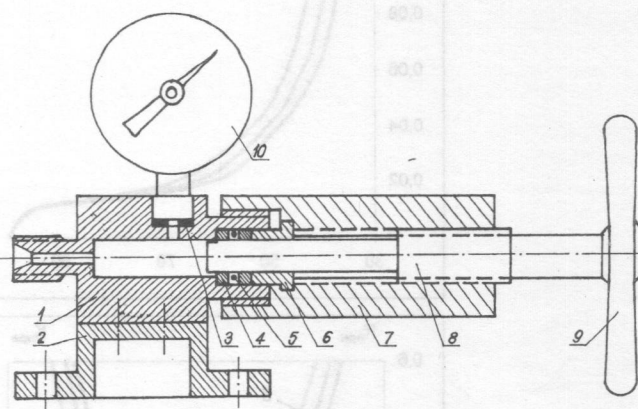


Рис. 2. Источник жидкостного давления: 1 — корпус; 2 — подставка; 3 — медная шайба; 4 — латунные шайбы; 5 — резиновое кольцо; 6 — нажимная втулка; 7 — нажимная гайка с внутренней резьбой; 8 — шток; 9 — рукоятка; 10 — манометр

3. В камере создается давление, равное пластовому, затем она помещается в воздушный термостат, где нагревается до пластовой температуры. Во время нагрева давление в камере поддерживается неизменным.

4. В камере закрывается вентиль 7 (рис. 1), давление в ИД сбрасывается до атмосферного, камера отсоединяется от ИД и переносится в гнездо центрифуги, оборудованное теплоизоляционным чехлом.

5. Проводится центрифугирование камеры с образцом при n оборотах в минуту. Время вращения определяется эмпирически для данной партии образцов. Критерием служит полный выход из образца той воды, которая вытесняется при данном количестве оборотов.

6. После остановки центрифуги камера подсоединяется к ИД, где создается исходное пластовое давление, после чего открывается вентиль 7 (рис. 1) в камере, она охлаждается, при этом давление в камере с помощью ИД поддерживается постоянным.

7. После охлаждения камеры до комнатной температуры давление в системе камера—источник давления сбрасывается до нормального, камера отсоединяется от ИД, из нее извлекается исследуемый образец и взвешивается в воздухе (масса G_3).

Водонасыщенность образца, поры которого заполнены водой и рабочей жидкостью, определяется из предложенного автором выражения:

$$K_e = 1 - (G_2 - G_3) / (G_2 - G_1) \cdot \delta_w / (\delta_w - \delta_{рж}) \quad (2)$$

Плотности воды и рабочей жидкости при комнатной температуре определяются с помощью аре-

ометров или пикнометров. Значение водонасыщенности исследуемого образца при пластовой температуре K_{et} :

$$K_{et} = K_e \cdot \delta_w / \delta_{wt} \quad (3)$$

где δ_{wt} — плотность модели пластовой воды при пластовых температуре и давления, которая может

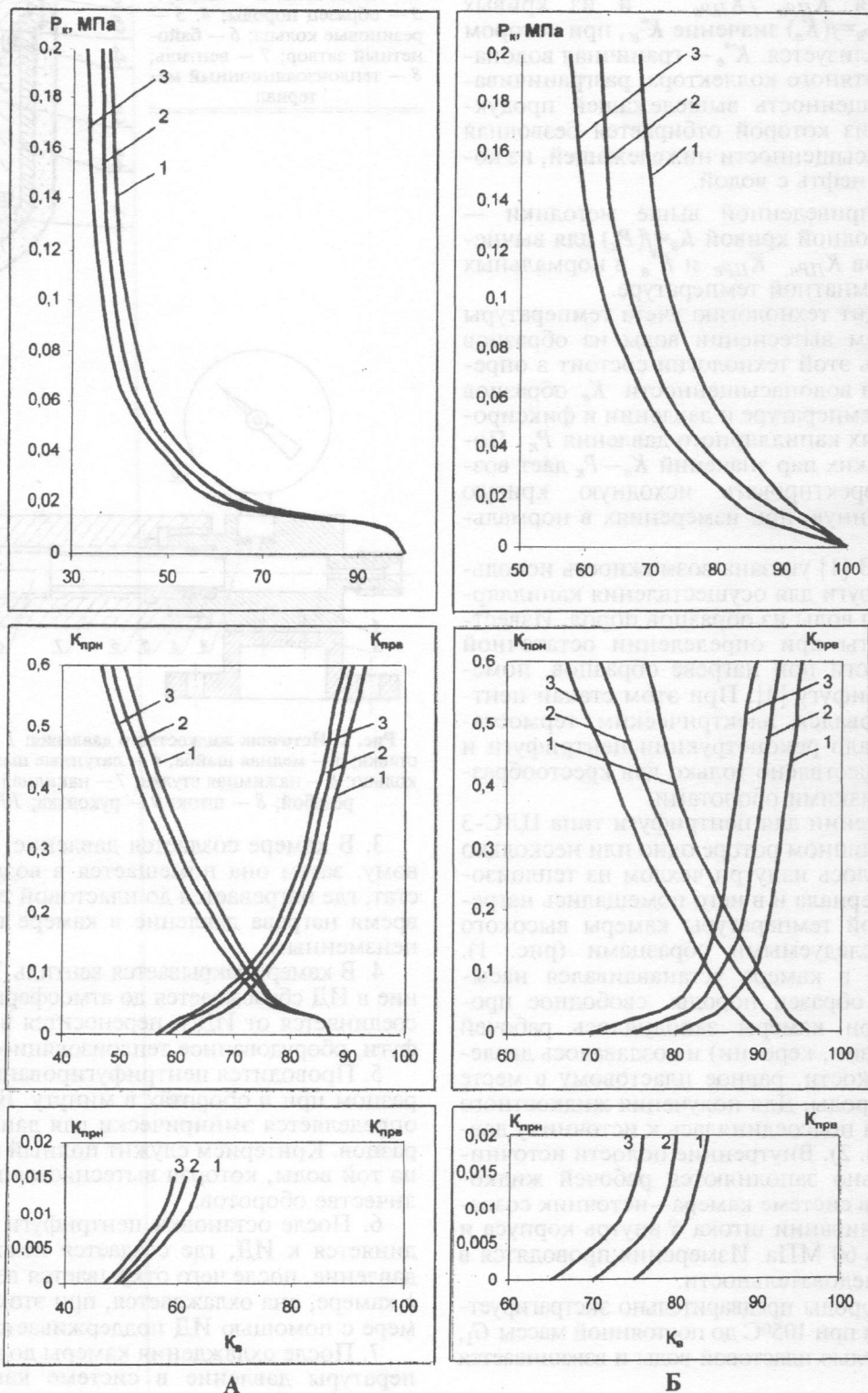


Рис. 3. Кривые зависимости водонасыщенности K_e от капиллярного давления P_k , относительных проницаемостей по нефти $K_{прн}$ и воде $K_{прв}$ от K_e и $K_{прв}$ от K_e : А — 1-я группа: 1 — 18 °С, 2 — 70 °С, 3 — 100 °С; Б — 2-я группа: 1 — 18 °С, 2 — 100 °С, 3 — 150 °С

быть найдена при известной минерализации по данным [5]. По формуле, предложенной А. Ханиным [6], рассчитывается давление (в МПа) в капиллярах образца для конкретной центрифуги и принятого числа оборотов n :

$$P_k = 1,11 \cdot 10^{-7} \cdot (\delta_{ст пл} - \delta_{рж пл}) \cdot n^2 \cdot r \cdot h, \quad (4)$$

где $\delta_{рж пл}$ — плотность рабочей жидкости при пластовых температуре и давлении; r — радиус вращения (см); h — высота образца (см).

По приведенной методике при пластовой температуре найдены значения водонасыщенности $K_{ст}$ и соответствующего давления P_k при 3–4 значениях числа оборотов центрифуги (рис. 3, таблица). Исследованы две группы образцов из нефтяных коллекторов Западной Сибири: образцы 1-й группы имели пористость $K_{пл} = 17–18\%$ и абсолютную проницаемость $K_{пр а} = (80–120) \cdot 10^{-3}$ мкм², образцы 2-й группы — $K_{пл} = 14–15\%$ и $K_{пр а} = (10–30) \cdot 10^{-3}$ мкм². Сначала на образцах, насыщенных водным раствором NaCl с концентрацией 20 г/л, проведено капиллярное вытеснение воды в индивидуальных камерах при комнатной температуре (18 °С). По результатам вытеснения построены исходные кривые зависимости $K_{ст} = f(P_k)$, рассчитаны величины $K_{пр н}$, $K_{пр в}$ при различных значениях $K_{ст}$ и построены зависимости $K_{пр н} = f(K_{ст})$ и $K_{пр в} = f(K_{ст})$. С учетом вязкостей нефти и воды определены по (1) величины граничной водонасыщенности $K_{ст}^*$. Затем по описанной выше технологии получены значения $K_{ст}$ образцов при соответствующих капиллярных давлениях и пластовой тем-

пературе, построены кривые $K_{ст} = f(P_k)$, $K_{пр н} = f(K_{ст})$, $K_{пр в} = f(K_{ст})$ и найдены значения $K_{ст}^*$.

Значения граничной водонасыщенности $K_{ст}^*$ (в %), при температуре пласта $t_{пл}$ и различных величинах отношения вязкостей воды μ_w и нефти μ_n

μ_w и μ_n	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$		
	18	70	100
1-я группа образцов			
40	61	59	57
80	58	56	54
100	57	54	53
2-я группа образцов			
40	82	77	73
80	80	75,5	72
100	79	74	71

Выводы

1. При одной и той же величине вытесняющего капиллярного давления воды из образцов породы выходит больше при увеличении температуры среды. Об этом свидетельствуют графики $K_{ст} = f(P_k)$, полученные при различных температурах.

2. Определенные по отношениям величин относительных проницаемостей по нефти и воде $K_{пр н}$ и $K_{пр в}$ и вязкости воды и нефти μ_w и μ_n из (1) величины граничной водонасыщенности нефтяного коллектора уменьшаются с увеличением пластовой температуры тем больше, чем меньше абсолютная проницаемость породы.

ЛИТЕРАТУРА

- Амикс Д., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта. М.: Гостоптехиздат, 1962.
- Богданова О.Е. Определение граничной водонасыщенности на основе капиллярного вытеснения пластовой воды углеводородами // Изв. вузов. Геология и разведка. 2002. № 3.
- Вендельштейн Б.Ю., Козяр В.Ф., Яценко Г.Г. Методические рекомендации по определению подсчетных параметров залежей нефти и газа по материалам геофизических исследований скважин с привлечением анализов керна, опробований и испытаний продуктивных пластов. Калинин, 1990.
- Комарова С.Г. Справочник геофизика. Геофизические методы исследования скважин. М.: Гостоптехиздат, 1961.
- Поляков Е.А. Методические рекомендации по определению электрических, акустических и коллекторских свойств осадочных горных пород. М., 1975.
- Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М.: Недра, 1969.
- Вудин Н. Relative permeability calculation from pore size distribution data // J. Petr. Techn. 1953. № 3.

ЗАО «Научно-технический центр ГеотехноКИН»
Рецензент — А.А. Никитин

