

- ления инженерной академии “Гипотезы, поиск, прогнозы”. Краснодар, 2001. Вып. 10. С. 161–168.
14. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. РД 153-39.0-072-01. М., 2001.
15. Эрлих Г. М. Исследование состояния обсадных труб, извлеченных из скважины // Нефтепромысловое дело. 1962. № 4. С. 46–48.
16. Oil & Gas Russia. 2013. № 3. С. 42–45.
17. Oil & Gas Russia. 2013. № 11. С. 66–70.
18. Oil & Gas Russia. 2013. № 5. С. 59–65.

*Рецензент канд. техн. наук В. Н. Даниленко*

УДК 550.832

Н. Г. Козыряцкий  
ООО “Нефтегазгеофизика”

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Описана методика проведения исследований по измерению удельного электрического сопротивления стандартных образцов открытой пористости, приведены результаты экспериментов.

*Ключевые слова:* петрофизика, метрология, удельное электрическое сопротивление, керн, стандартные образцы.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) является одной из важнейших характеристик пород-коллекторов. Теоретические и методические основы определения УЭС образцов горных пород, а также функциональная взаимосвязь УЭС с другими петрофизическими параметрами широко освещены в литературе [2, 5]. Измерения УЭС образцов горных пород, направленные, в первую очередь, для петрофизического обоснования количественной интерпретации ре-

зультатов электрических методов каротажа, носят массовый характер и выполняются практически во всех петрофизических лабораториях. В связи с этим требования к точности лабораторных измерений УЭС керна, также как и требования к системе метрологического обеспечения этих измерений, достаточно высоки. Однако отсутствие единых требований к петрофизической аппаратуре и точности определения искомых параметров, что особо характерно для УЭС, приводит к тому, что определения УЭС керна в производственных организациях выполняются на различных по конструкции установках, изготавливаемых зачастую собственными силами. На этих установках реализуются различные способы измерения УЭС, которые могут быть отнесены либо к методу сравнения в равновесном режиме, либо к методу непосредственной оценки.

Сложность определения УЭС образцов горных пород обусловлена необходимостью проводить измерения в строго определенных условиях, оказывающих влияние на результаты измерений (степень насыщения образцов, минерализация насыщающего раствора, усилие прижима и вид электродов, интенсивность испарения флюидов с боковой поверхности образца и т. д.), которые не всегда выполняются. Естественно, что измерения УЭС в лабораториях нередко проводятся со значительными погрешностями, а результаты, полученные в различных лабораториях на одних и тех же образцах, трудносопоставимы.

Одной из причин недостаточного качества измерений УЭС горных пород в лабораторных условиях является тот факт, что до настоящего времени в отрасли практически отсутствует единая система метрологического обеспечения (МО) измерения УЭС горных пород, не во всех петрофизических подразделениях внедрены нормативно-технические документы [1, 4], регламентирующие требования к аппаратуре и нормам точности измерений, отсутствует эталонная база для данного вида измерений.

В определенной мере существующие проблемы МО измерений УЭС могут быть решены путем разработки и изготовления стандартных образцов УЭС на основе стандартных образцов с известной открытой пористостью [3], насыщенных электролитом, применение которых может если не исключить, то, по крайней мере, свести к минимуму методические погрешности измерений.

В свое время во ВНИГИКе проводились экспериментальные исследования по измерению УЭС стандартных образцов открытой

пористости (СО-ОП), насыщенных раствором хлористого натрия, для оценки возможности использования СО-ОП в качестве стандартных образцов УЭС (СО-УЭС). В качестве основного критерия пригодности СО-ОП для использования их как СО-УЭС была принята стабильность УЭС во времени.

Экспериментальные исследования включали в себя две серии измерений:

серия 1: длительность испытаний – 16 дней (1–2 измерения в день), образцы № 1–7; концентрация раствора  $\text{NaCl}$  – 0,1Н;

серия 2: длительность испытаний – 30 дней (1 измерение в день), образцы № 8–15; концентрация раствора  $\text{NaCl}$  – 0,5Н.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов пористости  $k_p$  исследованных СО-ОП.

Таблица 1

Значения коэффициентов пористости испытываемых образцов

Серия 1							
Номера образцов	1	2	3	4	5	6	7
$k, \%$	3,44	9,88	10,54	17,74	17,97	28,43	29,44

Серия 2							
Номера образцов	8	9	10	11	12	13	14
$k, \%$	1,03	2,34	20,09	24,05	24,91	26,60	32,26

15
----

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 200–250 °С до постоянной массы, а затем покрывались kleem БФ по боковой поверхности и под вакуумом насыщались раствором хлористого натрия в дистиллированной воде. Образцы хранились в растворе в течение всего цикла измерений. Непосредственно перед измерением УЭС образца фиксировалась температура раствора. По известной температуре и концентрации раствора определялось его УЭС. Насыщенный образец помещался в кернодержатель; усилие прижима питающих электродов к торцам исследуемого образца поддерживалось постоянным и равным 0,5 МПа, питающий постоянный ток поддерживался в пределах 0,7–1,4 мА. Измерялось падение напряжения на образце  $\Delta U_x$  и на эталонном сопротивлении  $\Delta U_0$ .

УЭС образца  $\rho$  определялось по формуле

$$\rho = R_3 \frac{\Delta U_x}{\Delta U_3} \cdot \frac{S}{L}, \quad (1)$$

где  $R_3$  – значение эталонного сопротивления, во всех экспериментах оно устанавливалось равным  $10\ 000\ \Omega$ ;  $L$  и  $S$  – длина и площадь поперечного сечения образца соответственно.

Поскольку значение УЭС зависит от температуры, целесообразно пользоваться параметром пористости  $P$ :

$$P = \frac{\rho}{\rho_p}, \quad (2)$$

где  $\rho_p$  – УЭС насыщающего раствора при данной температуре, определяется по справочным таблицам для заданных температур и концентраций раствора.

Для удобства оценки стабильности стандартных образцов, имеющих УЭС, отличающиеся на 2–3 порядка, использовались параметры  $\bar{\rho}$  – относительное УЭС образца и  $\bar{P}$  – относительный параметр пористости:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{\max}}, \quad (3)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{P_{\max}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\max}$  и  $P_{\max}$  – максимальные значения  $\rho$  и  $P$  в серии измерений для данного образца.

На рис. 1, 2 полученные данные проиллюстрированы в графическом виде. Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Значения УЭС стандартных образцов коррелируются со значениями температуры – повышение температуры вызывает уменьшение УЭС. Так как обеспечить постоянство температуры практически невозможно, то использовать УЭС в качестве характеристики для оценки стабильности стандартных образцов не представляется возможным. Уменьшить влияние температуры для оценки стабильности стандартных образцов позволяет использование относительного параметра пористости  $\bar{P}$ .

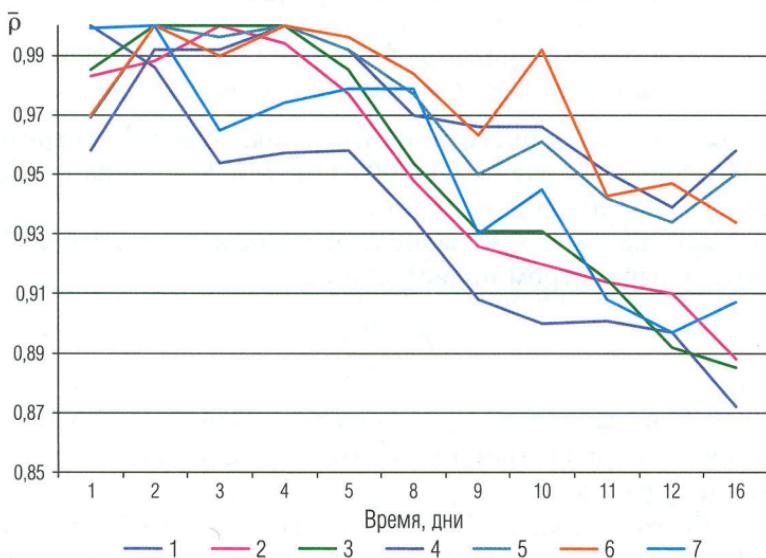
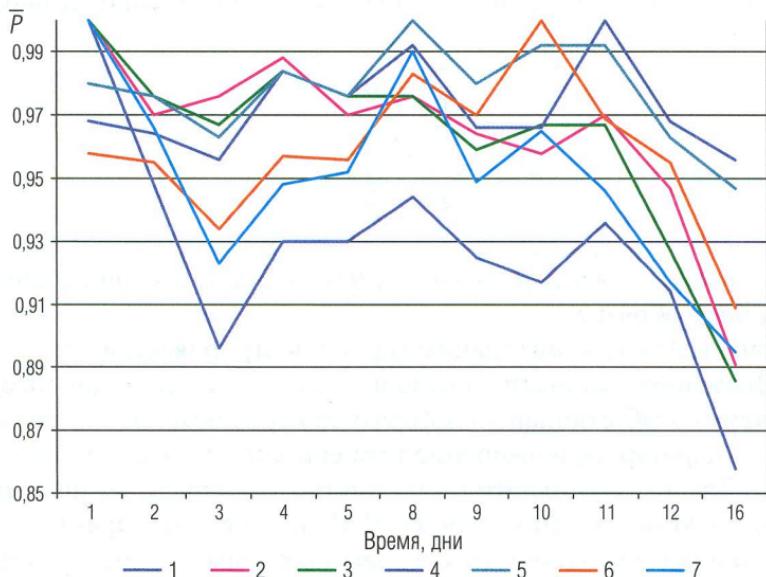
*a**b*

Рис. 1. Изменения относительного УЭС образцов  $\bar{\rho}$  (а) и относительного параметра пористости образцов  $\bar{P}$  (б) со временем для первой серии измерений

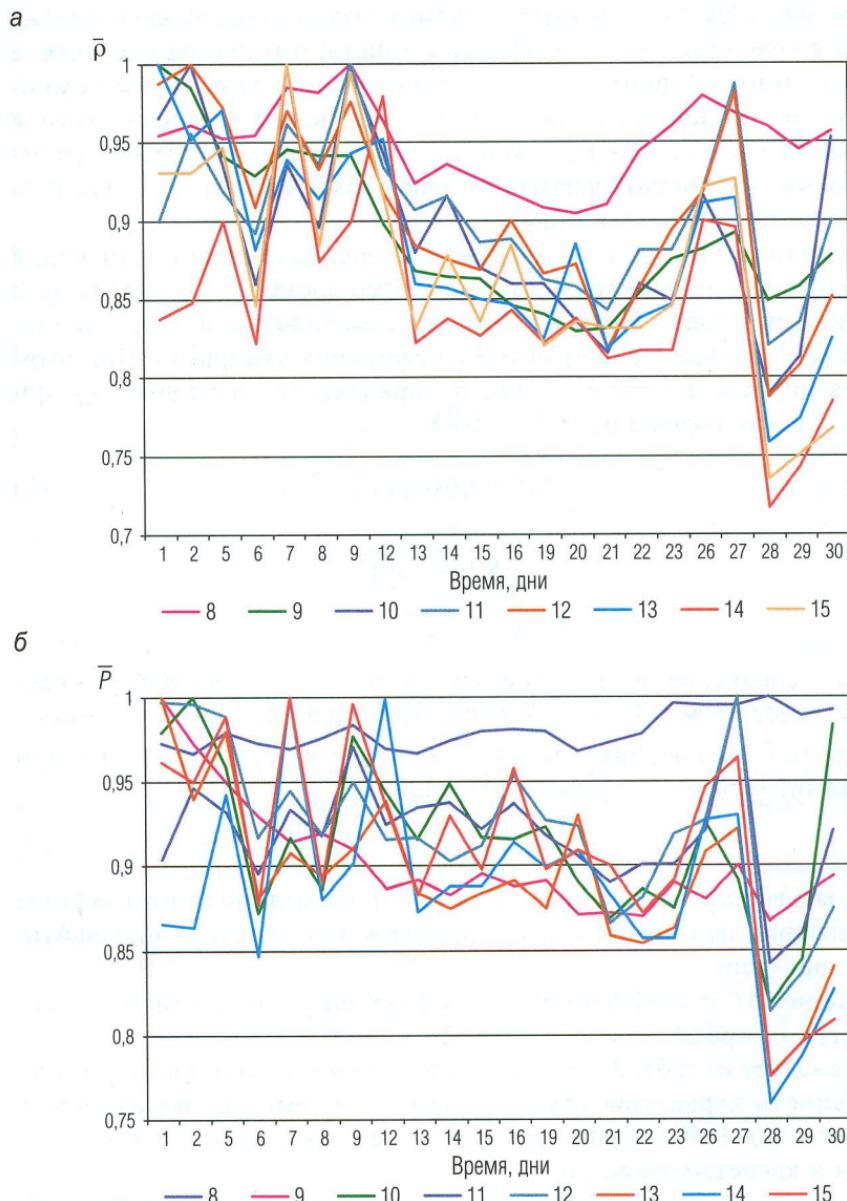


Рис. 2. Изменения относительного УЭС образцов  $\bar{r}$  (а) и относительного параметра пористости образцов  $\bar{P}$  (б) со временем для второй серии измерений

2. Значения УЭС стандартных образцов имеют тенденцию к снижению с течением времени. Несмотря на почти полное отсутствие корреляции относительного параметра пористости  $\bar{P}$  с температурой, тенденция снижения  $\bar{P}$  со временем осталась, хотя и менее выражена. Темп снижения все-таки слишком высок, чтобы использовать испытываемые образцы как средства передачи размера физической величины.

Представляет интерес количественная оценка тенденции снижения относительного параметра пористости  $\bar{P}$  со временем. Для простоты будем искать модель дрейфа  $\bar{P}$  в классе линейных функций, используя для построения модели метод наименьших квадратов. При этом ширина полосы неопределенности определяется по формуле (при доверительной вероятности  $P_d = 0,9$ )

$$\Delta \bar{P} = 1,6\sigma_{\Delta P}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P}_i - \hat{\bar{P}}_i)^2}{n}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\Delta P}$  – среднеквадратическое отклонение, характеризующее распределение измеренных значений  $\bar{P}$  относительно модели;  $n$  – число измерений;  $\bar{P}_i$  – значения  $\bar{P}$  при  $t = t_i$  ( $t$  – время);  $\hat{\bar{P}}_i$  – значения  $\bar{P}$  при  $t = t_i$ , вычисленные по принятой модели:

$$\hat{\bar{P}} = \bar{P}_0 + k \cdot t, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий наклон линейного графика;  $\bar{P}_0$  – значение относительного параметра пористости в начальный момент времени.

Значения  $\Delta \bar{P}$  и коэффициента  $k$ , характеризующего стабильность параметра  $\bar{P}$ , представлены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, часть образцов имеют неприемлемо низкую стабильность характеристики  $\Delta \bar{P}$ , при этом темп снижения может составлять 0,3–0,5% в день, что исключает возможность их использования в качестве эталонов.

Сказанное, однако, не означает, что разработка стандартных образцов УЭС для петрофизических исследований – тупиковый путь. Необходимы поиски новых конструктивных решений, например

использование монолитных образцов на основе проводящих полимеров, создание имитаторов образцов керна с заданными значениями УЭС и др.

Значения  $\Delta\bar{P}$  и  $k$  для серий измерений

Серия 1							
Номера образцов	1	2	3	4	5	6	7
$k$ , % в день	-0,098	-0,492	-0,530	0,032	-0,067	-0,005	-0,256
$\Delta\bar{P}$	0,045	0,021	0,023	0,021	0,020	0,035	0,40
Серия 2							
Номера образцов	8	9	10	11	12	13	14
$k$ , % в день	0,081	-0,290	-0,300	-0,098	-0,290	-0,340	-0,032
$\Delta\bar{P}$	0,012	0,034	0,051	0,030	0,013	0,050	0,071
							0,060

### ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 25494-82. Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления.
- Дахнов В. Н. Определение петрофизических характеристик по образцам. М.: Недра, 1977.
- Козыряцкий Н. Г. Стандартные образцы для метрологического обеспечения измерений открытой пористости керна // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 3 (180). С. 59–66.
- ОСТ 41-03-219-83. Горная порода-коллектор. Методика определения УЭС образцов горных пород нефти и газа.
- Поляков Е. А. Методика изучения физических свойств коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1981.

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. В. Малинин