

3. Косолапов А. Ф., Скобочкин Ю. А., Гаранин В. А. Полевая станция для определения физико-механических свойств пород // Экспресс-информация. Изд. ВИЭМС, 1976. № 13.

*Рецензент доктор геол.-мин. наук, проф. Ю. И. Кузнецов*

УДК 550.822.2.013:389

*В. В. Вержбицкий, Н. Г. Козыряцкий  
ООО "Нефтегазгеофизика"*

*Е. Л. Датнов*

*Тверской государственный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СКВАЖИННОГО ИМИТАТОРА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КАРОТАЖА**

Изложен математический аппарат для расчета параметров имитаторов удельного электрического сопротивления для микрометодов каротажа, описана конструкция имитатора и приведены результаты расчетов воспроизводимых имитаторами параметров.

**Ключевые слова:** контрольная скважина, имитатор электрического сопротивления, микрометоды, имитационная колонна.

Контрольные скважины как средство проверки работоспособности, стандартизации и метрологического обеспечения скважинной геофизической аппаратуры, в том числе и при ее сертификации, находят достаточно широкое применение.

При этом наряду со скважинами, в которых для воспроизведения геологических и геофизических параметров горных пород используется естественный разрез, вскрытый контрольной скважиной, сооружаются также контрольные скважины, оснащенные искусственными имитаторами свойств горных пород (имитационными колоннами) [2–4, 6].

В настоящее время разработана, опробована и используется широкая гамма скважинных имитаторов для различных методов каротажа,

но для отдельных модификаций методов геофизических исследований скважин (ГИС) задачу создания скважинных имитаторов решенной считать нельзя. Сказанное относится и к имитаторам для микроэлектрических методов каротажа.

В настоящей статье изложены результаты экспериментальных исследований по разработке и созданию искусственного имитатора электрических свойств горных пород для микроэлектрических методов каротажа (в дальнейшем – имитатор МК).

В качестве основы имитатора МК используется асбоцементная труба с удельным электрическим сопротивлением ( $\rho_t$ ) (рис. 1). На различных локальных участках наружной поверхности асбоцементной трубы вплотную намотаны токопроводящие и токоизолирующие слои.

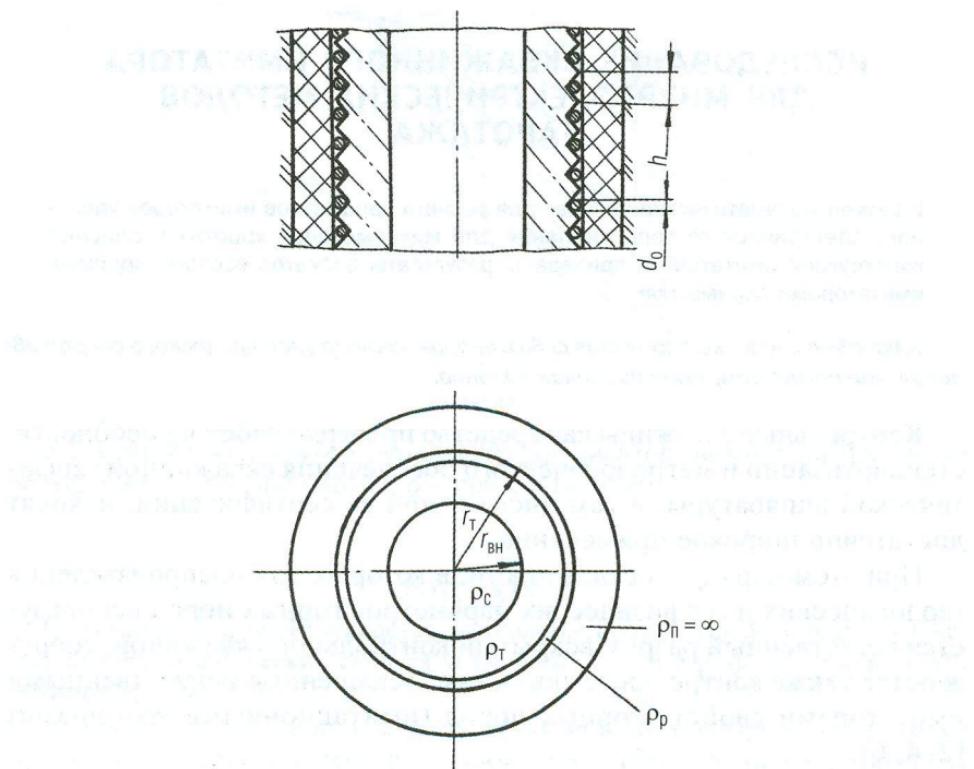


Рис. 1. Модель имитатора для микроэлектрических методов ЭК

На одном из локальных участков с токоизолирующим наружным слоем на наружную поверхность асбоцементной трубы нанесена треугольная спиральная канавка, в которую уложен круглый оголенный металлический проводник диаметром  $d_o$ . Имитатор заполнен электролитом (раствором NaCl), имеющим УЭС  $\rho_c$ .

Для такой конструкции имитатора значение внешнего диаметра асбоцементной трубы практически совпадает со значением внутреннего диаметра токоизолирующего слоя. За счет изменения расстояния  $h$  между канавками и диаметра  $d_o$  оголенного провода значение эффективного УЭС тонкого слоя на поверхности асбоцементной трубы  $\rho_p$  можно изменять существенным образом. Это позволяет получать различные значения УЭС, измеряемые зондами микроэлектрических методов каротажа  $\rho_k$  против локальных участков асбоцементной трубы с различными значениями  $d_o$  и  $h$ .

Как показали экспериментальные исследования образцов асбоцементных труб [7], насыщенных раствором NaCl с УЭС от 0,05 до 0,7  $\Omega \cdot m$ , значения отношения  $\rho_p/\rho_c$  находятся в диапазоне от 68 до 150.

Для практических целей представляет интерес оценка значений  $\rho_k/\rho_c$ , воспроизводимых имитатором для стандартных, наиболее распространенных зондов микрокаротажа и бокового микрокаротажа, на основе математического моделирования и последующего подтверждения полученных результатов экспериментальными исследованиями.

Разработанные к настоящему времени математический аппарат и программное обеспечение позволяют проводить моделирование градиент- и потенциал-микрозондов ЭК, а также фокусированных зондов БМК в среде с цилиндрическими границами [5]. Следует отметить, что из-за весьма сложной геометрии обратного токового электрода и второго измерительного электрода аппаратуры микрометодов погрешность этого моделирования может быть довольно высока и составлять до 10% от измеряемой величины. Поэтому речь может идти лишь о приближенной оценке показаний зондов.

Как видно из рис. 1, предлагаемый имитатор представляет собой цилиндрически-слоистую среду. При этом возникает вопрос о возможности замены слоя низкого сопротивления, включающего резьбу на поверхности асбоцементной трубы, и электролит, заполняющий участки, не занятые проводом, некоторым эквивалентным однородным слоем.

Этот атрибут является тонким слоем пониженного сопротивления, и если на него распространяется принцип А-эквивалентности [1], то замена неоднородного слоя на однородный с той же величиной электропроводности в вертикальном направлении будет правомерной.

Для проверки этого предположения были рассчитаны показания обычных микрозондов и фокусированного двухэлектродного микрозонда ЭК в ситуации, наименее благоприятной для проявления А-эквивалентности: максимальной (5 мм) толщиной слоя низкой проводимости, минимальной контрастностью его сопротивления по отношению к сопротивлению трубы ( $\rho_p = 0,5 \rho_t$ ), малой толщиной трубы (15 мм) и относительно низким ее сопротивлением ( $\rho_t = 10 \rho_c$ ), ( $r_{\text{вн}} = 75 \text{ мм}$ ). Затем значение  $\rho_p$  было уменьшено до  $0,25 \rho_t$ , а толщина высокопроводящего слоя уменьшена так, чтобы сохранялась величина избыточной проводимости этого слоя (до 1,64 мм).

Сравнение значений относительных показаний  $\rho_k/\rho_c$  микрозондов для этих двух случаев показало, что максимальное отличие наблюдается для показаний зонда  $\rho_k/\rho_c = 78,8$  и  $\rho_k/\rho_c = 76,9$  соответственно, но и в этом случае оно не превышает 2%, что значительно меньше возможной погрешности моделирования. Таким образом, замена неоднородного тонкого слоя повышенной проводимости на однородный слой с той же вертикальной проводимостью вполне допустима при моделировании показаний микрозондов ЭК в рассматриваемом имитаторе.

Эквивалентная величина  $\rho_p$  определяется двумя слагаемыми: средней вертикальной проводимостью асбоцементной трубы с канавкой, заполненной электролитом ( $\sigma_1$ ), и эквивалентной вертикальной проводимостью медного провода ( $\sigma_2$ ):

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_1 + \sigma_2}.$$

При этом

$$\sigma_1 = \frac{2}{(r_t - h) \cdot h} \int_{r_t - h}^{r_t} \sigma(r) \cdot r dr, \quad (1)$$

где

$$\sigma(r) = \frac{h}{\rho_c \cdot h + (\rho_t - \rho_c) \cdot (r_t - r)}.$$

Интеграл в формуле (1) берется аналитически. Тогда

$$\sigma_1 = \frac{2}{(\rho_t - \rho_c) \cdot (2r_t - h)} \left[ \frac{h + \left( \frac{\rho_t}{\rho_c} - 1 \right) \cdot r_t}{\left( \frac{\rho_t}{\rho_c} - 1 \right)} \ln \frac{\rho_t}{\rho_c} - h \right]. \quad (2)$$

Значение  $\sigma_2$  определяется по формуле

$$\sigma_2 = \frac{d_o^2}{4\rho_{Cu} \sqrt{h^2 + 4\pi^2 (r_t - h + 0,5\sqrt{5}d_o)^2} \cdot (2r_t - h)}, \quad (3)$$

где  $\rho_{Cu}$  – УЭС металлического проводника.

Для первоначальной оценки возможностей имитатора были рассчитаны значения относительных показаний стандартных градиент-зонда, потенциал-микрозонда и двухэлектродного зонда БМК (табл. 1–3, рис. 2–4) для ряда значений толщины асбокементной трубы  $t$  (15 и 25 мм), двух значений ее внутреннего диаметра  $d_{vn}$  (150 и 200 мм) и разными значениями отношения  $\rho_t/\rho_c$  (10 и 100). Для того чтобы оценить диапазон показаний микрозондов в имитаторе, были взяты два крайних случая – трубы с токопроводящими и токоизолирующими слоями ( $\rho_n = 0$  и  $\rho_n = \infty$ ).

Анализ результатов выполненных расчетов показал слабую зависимость показаний всех методов от внутреннего радиуса асбокементной трубы. Показания градиент- и потенциал-микрозонда слабо зависят и от проводимости наружных слоев. Диапазон изменения их показаний в наиболее благоприятном случае ( $t = 15$  мм,  $\rho_t = 10 \rho_c$ ) составляет (3,8–4,5)  $\rho_c$  для градиент-микрозонда и (3,4–8,3)  $\rho_c$  для потенциал-микрозонда. При увеличении значений  $t$ ,  $\rho_t/\rho_c$  и  $r_{vn}$  диапазон изменения показаний обычных микрозондов при фиксированном значении  $\rho_c$  сужается. Это означает, что предлагаемый имитатор недостаточно эффективен для обычных микрозондов, особенно градиент-зонда. Для создания имитатора с более широким диапазоном изменения показаний этих зондов необходима реализация тонкого слоя (10 мм и меньше) с низкой проводимостью ( $\rho_t/\rho_c$ ) и слоя с переменным сопротивлением, прилегающего к этому слою извне.

Таблица 1

Относительные показания градиент-микрозонда  $\rho_{\text{гз}}/\rho_c$

$\rho_n$	$\rho_T/\rho_c$	$d_{\text{вн}}, \text{мм}$			
		150		200	
		$t, \text{мм}$	15	25	15
0	10	3,79	4,02	3,80	4,02
0	100	5,93	6,00	5,87	5,94
$\infty$	10	4,51	4,28	4,49	4,27
$\infty$	100	6,12	6,08	6,05	6,01

Таблица 2

Относительные показания потенциал-микрозонда  $\rho_{\text{пз}}/\rho_c$

$\rho_n$	$\rho_T/\rho_c$	$d_{\text{вн}}, \text{мм}$			
		150		200	
		$t, \text{мм}$	15	25	15
0	10	3,38	4,41	3,40	4,43
0	100	9,88	10,5	9,65	10,2
$\infty$	10	8,26	7,27	8,11	7,16
$\infty$	100	11,7	11,5	11,3	11,1

Таблица 3

Относительные показания зонда БМК  $\rho_k/\rho_c$

$\rho_n$	$\rho_T/\rho_c$	$d_{\text{вн}}, \text{мм}$			
		150		200	
		$t, \text{мм}$	15	25	15
0	10	1,74	2,69	1,71	2,68
0	100	14,9	21,9	15,0	22,6
$\infty$	10	102	54,5	117	54,4
$\infty$	100	115	104	140	123

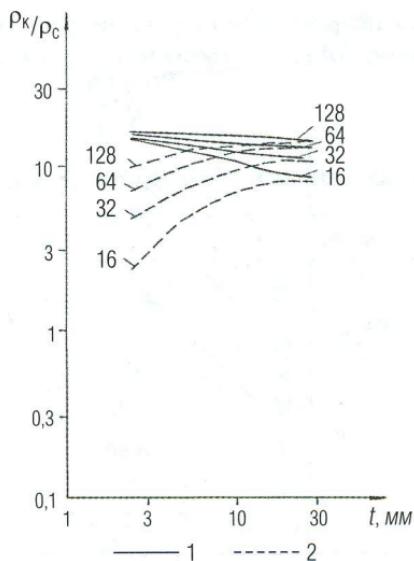


Рис. 2. Значения  $\rho_k/\rho_c = f(\rho_t/\rho_c, t)$  для градиент-микропонда ЭК А0,025М0,025Н в пористой трубе. Шифр кривых – значения  $\rho_t/\rho_c$ :  $\rho_n = \infty$  (1);  $\rho_n = 0$  (2)

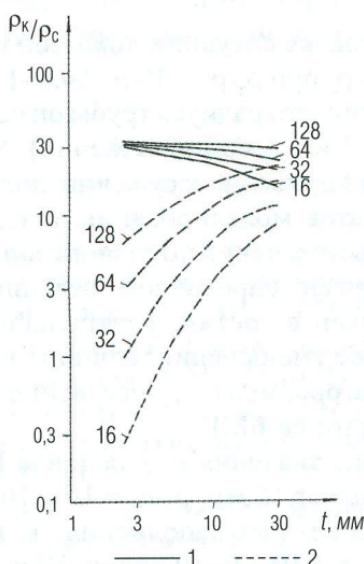


Рис. 3. Значения  $\rho_k/\rho_c = f(\rho_t/\rho_c, t)$  для потенциал-микропонда ЭК А0,5Н в пористой трубе. Шифр кривых – значения  $\rho_t/\rho_c$ :  $\rho_n = \infty$  (1);  $\rho_n = 0$  (2)

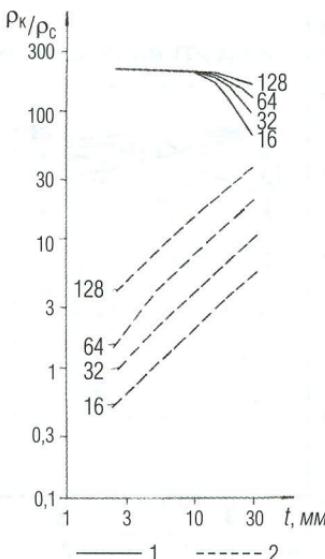


Рис. 4. Значения  $\rho_k/\rho_c = f(\rho_t/\rho_c, t)$  для двухэлектродного бокового микрозонда в пористой трубе. Шифр кривых – значения  $\rho_t/\rho_c$ :  $\rho_n = \infty$  (1);  $\rho_n = 0$  (2)

Для зонда БМК в той же ситуации диапазон изменения показаний составляет  $(1,74–102) \rho_c$  при  $\rho_t/\rho_c = 10$  и  $(14,9–115) \rho_c$  при  $\rho_t/\rho_c = 100$ . При увеличении внутреннего радиуса трубы он несколько расширяется ( $(1,71–117) \rho_c$  и  $(15,0–140) \rho_c$  соответственно). Увеличение толщины асбоцементной трубы  $t$  приводит к сужению диапазона. Как видно из приведенных результатов моделирования, предложенный имитатор позволяет реализовать изменения показаний зонда БМК в достаточно широком диапазоне при фиксированном значении  $\rho_c$  и, следовательно, может быть использован в составе контрольной скважины. Следует отметить, что некоторое уменьшение толщины асбоцементной трубы, используемой в имитаторе, может существенно расширить диапазон изменения показаний зонда БМК.

В табл. 4 приведены значения  $\rho_k$  для зонда БМК в случае, когда толщина трубы составляет  $15 \text{ мм}$ ,  $\rho_t/\rho_c = 10$  и  $100$ , а внутренний диаметр  $d_{\text{вн}} = 200 \text{ мм}$  для случаев заполнения скважины пресной ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) и соленой ( $\rho_c = 0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) водой. Шаг резьбы  $h$  составляет  $1$  и  $5 \text{ мм}$ , диаметр медного провода изменяется от  $0,1$  до  $1,0 \text{ мм}$ . Из данных, приведенных в табл. 3, видно, что использование резьбы

с различным шагом и провода различного диаметра позволяет получить достаточное число промежуточных точек по отношению к предельным.

Таблица 4  
Показания  $\rho_k$  зонда БМК в имитаторе, Ом·м

$\rho_c$ , Ом·м	$\rho_t/\rho_c$	$h, \text{мм}$			
		150		200	
		$d_o, \text{мм}$			
		15	25	15	25
1	10	55,6	5,42	14,3	2,34
1	100	55,8	2,07	24,0	13,9
0,05	10	5,12	2,45	3,00	0,237
0,05	100	6,47	2,50	4,20	0,821

Таким образом, комбинация участков с наружным токопроводящим и токоизолирующим слоями, дополненная участками с проводниками, позволяет создать имитатор с достаточно широким диапазоном воспроизводимых значений удельного электрического сопротивления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Альпин Л. М. К теории электрического каротажа нефтяных скважин. ОНТИ, НКПТ, 1938.
2. Вержбицкий В. В., Калистратов Г. А., Козыряцкий Н. Г. Математическое моделирование измерений градиент- и потенциал-зондами в контрольных скважинах // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3 (225). С. 137–151.
3. Блюменцев А. М., Калистратов Г. А. и др. Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин. М.: Недра, 1991. С. 54–65.
4. Блюменцев А. М., Абросимов М. Г., Козыряцкий Н. Г., Мельчук Б. Ю. Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин: Справочник. М.: ВНИИГеосистем, 2011. 134 с.
5. Датнов Е. Л., Пантиухин В. А., Чаадаев Е. В. Математическое моделирование зонда бокового микрокаротажа // Известия вузов. Геология и разведка. 1989. Вып. 6.
6. Калистратов Г. А. Унифицированная конструкция контрольной скважины с имитаторами электрических, акустических и радиоактивных свойств пластов

горных пород // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 10 (208). С. 69–76.

7. Разработка методики и технических средств метрологического контроля аппаратуры электрического, акустического, радиоактивного каротажа с применением искусственной контрольной скважины: Отчет о НИР. Калинин, 1986.

*Рецензент доктор техн. наук В. М. Лобанков*

УДК 550.832

*E. В. Громов, В. Г. Цейтлин, В. В. Первушин  
ООО “Газпром георесурс”*

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛОТНОСТНОГО И ЛИТОПЛОТНОСТНОГО ГАММА-ГАММА-КАРОТАЖА**

Проведены работы по сравнению основных зависимостей для приборов плотностного и литоплотностного гамма-гамма-каротажа, полученных на образцах с  $2\pi$ - и  $4\pi$ -конфигурацией.

*Ключевые слова:* стандартные образцы, плотностной гамма-гамма-каротаж, литоплотностной гамма-гамма-каротаж, калибровка, основная зависимость.

Основная деятельность Центра метрологии и сертификации (ЦМиС) ООО “Газпром георесурс” связана с метрологическим обеспечением скважинной геофизической аппаратуры в производственных филиалах (ПФ).

Структура метрологической службы ООО “Газпром георесурс” такова, что обеспечивается жесткая вертикаль при передаче размеров единиц измерения от первичных эталонов, находящихся в ЦМиС, к вторичным и рабочим средствам измерения, эксплуатируемым в ПФ.

Одной из последних разработок ЦМиС являются стандартные образцы для аппаратуры литоплотностного гамма-гамма-каротажа.

Наиболее распространенными средствами калибровки для аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма-каротажа до