

Моделирование электрического зондирования околоскважинной зоны в процессе бурения нефтегазовых скважин

Ю.И. Стеблев

д.т.н., профессор кафедры АУТП

С.В. Сусарев

к.т.н., доцент кафедры АУТП

А.Ю. Лапина

магистр кафедры АУТП

alena08071@rambler.ru

Т.Ю. Попова

магистр кафедры АУТП

tanyu.popova2011@yandex.ru

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Одним из актуальных вопросов бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин с применением забойных телеметрических систем с электромагнитным каналом связи является использование электрического разделителя. Он входит в состав передающей системы в качестве конструктивной основы для проведения электрического и электромагнитного каротажа скважины в процессе бурения. Для решения данной проблемы необходимо оценивать радиальную дальность действия электрического зондирования околоскважинной зоны с целью определения информативности получаемых данных. В работе проведен качественный анализ структуры зондирующего электрического поля схемы и расчетной модели каротажа.

Схема электрического и электромагнитного каротажа скважин с использованием электрического разделителя (скважинного «диполя») забойной телеметрической системы (далее — ЗТС) с беспроводным электромагнитным каналом связи приведена на рис. 1.

Структура электромагнитного поля и радиальная дальность действия системы каротажа будет определяться электрической структурой среды, частотой питающего напряжения и длиной l изоляционного покрытия 4 корпуса ЗТС.

Радиальную дальность действия, глубину скважиной электрометрии (каротажа) оценим с помощью приближенной расчетной модели (рис. 2).

Скважина диаметром $2a$ заполнена воздухом, то есть является непроводящей средой. Околоскважинная среда 3 — однородная с удельной электрической проводимостью σ . Электроды-зонды 1 — кольца шириной 2Δ , l — расстояние между электродами, соответствующее длине изоляционного покрытия 4 по рис. 1.

Качественный анализ показывает, что структура зондирующего электрического поля схемы (рис. 1) и расчетной модели (рис. 2) каротажа будут идентичны. Структура при этом — радиально-неоднородная по электропроводности околоскважинная среда (рис. 1) — может моделироваться однородной проводящей средой с эквивалентной электропроводностью σ_3 (рис. 2).

При анализе расчетной модели используем результаты работы [1], в которой рассчитано распределение тока в околоскважинной среде при запитывании электродов-зондов от источника постоянного тока I_0 .

При обработке геофизической каротажной информации необходимо знать глубину электромагнитного зондирования, то есть насколько глубоко проникает зондирующее электрическое поле за пределы скважины, какому объему геологической среды следует приписывать рассчитываемое по измеренному напряжению между электродами кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_k или электропроводность σ_k .

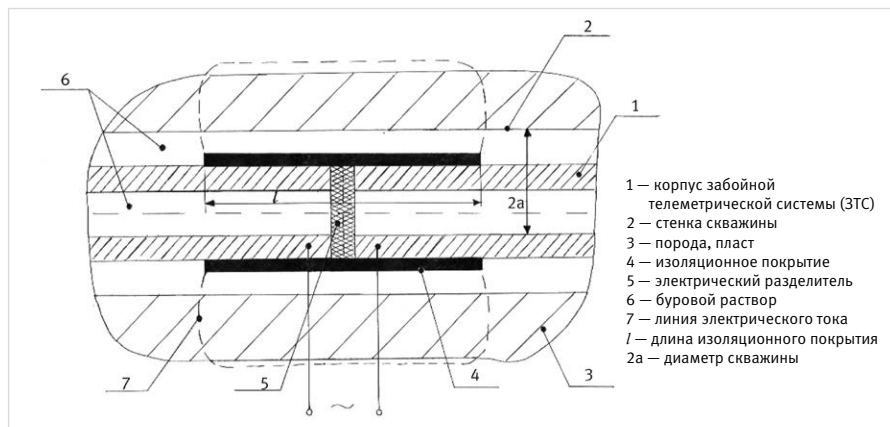


Рис. 1 — Схема электрического и электромагнитного каротажа скважин с использованием скважинного «диполя»
Fig. 1 — Diagram of electric and electromagnetic logging of wells using downhole "dipole"

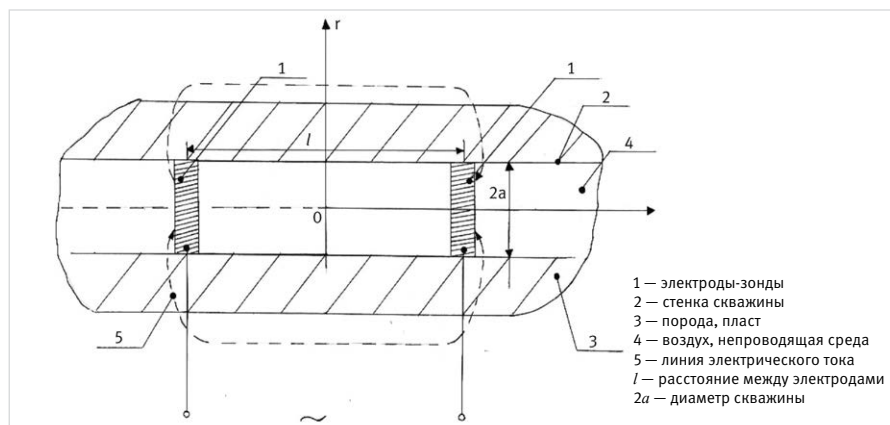


Рис. 2 — Расчетная модель электромагнитного каротажа с использованием скважинного «диполя»
Fig. 2 — The analysis model of electromagnetic logging with a borehole "dipole"

Материалы и методы

Структура электромагнитного поля и радиальная дальность действия системы каротажа будут определяться электрической структурой среды, частотой питающего напряжения и длиной изоляционного покрытия корпуса забойной телеметрической системы. Для количественной оценки радиальной глубины проникновения электрического тока вводится функция «глубинности». Применение теории бокового электрического каротажа скважин двухполюсными зондами при многослойной структуре околоскважинной геологической среды.

Ключевые слова

электрический и электромагнитный каротаж, забойная телеметрическая система, электрический разделитель, электропроводность, глубинность электрического зондирования, радиальная дальность, скважина, бурение

Зондирование околоскважинной среды постоянным или низкочастотным электрическим полем позволяет дать оценку сверху радиальной дальности действия системы электромагнитного каротажа.

Решение задачи о распределении электрического потенциала в проводящем полупространстве со скважиной от двух кольцевых электродов (рис. 3) получено в виде [1]:

$$\varphi(r, z) = -\frac{2I_0}{\pi^2 a \Delta \sigma} \int_0^\infty \frac{K_0(xr)}{x^2 K_1(xa)} \lambda(x, z) dx. \quad (1)$$

где K_0 и K_1 - функции Макдональда нулевого и первого порядка соответственно;

σ — удельная электрическая проводимость породы;
 I_0 — ток, поступающий в геологический массив от электродов-зондов;

2Δ — ширина кольцевых электродов;

a — радиус скважины;

z_0 — расстояние от середины базы l двухэлектродного зонда до поверхности полупространства.

$$\lambda(x, z) = \sin(\Delta x) \sin \frac{x}{2} (z_1 + z_2) \sin \frac{x}{2} (z_2 - z_1) \cos(xz).$$

Преобразуем функцию $\lambda(x, z)$, учитывая соотношения:

$$\begin{aligned} z_2 - z_1 &= l, \quad z_1 = z_0 - \frac{l}{2}, \\ z_2 &= z_0 + \frac{l}{2}, \quad \frac{1}{2}(z_2 + z_1) = z_0, \\ z_0 &> \frac{l}{2}. \end{aligned}$$

В результате получим:

$$\lambda(x, z) = \sin(\Delta x) \sin \left(\frac{x}{2} l\right) \sin(x - z_0) \cos(xz). \quad (2)$$

Компоненты напряженности зондирующего электрического поля $E(r, z)$ в цилиндрических координатах (r, z, a) , учитывая его асимметричность ($\partial/\partial a=0$), равны [2].

$$E_r(r, z) = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad E_z(r, z) = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (3)$$

Учитывая соотношения (1) и (3), получим:

$$E_z(r, z) = -\frac{2I_0}{\pi^2 a \Delta \sigma} \int_0^\infty \frac{K_0(xr)}{x^2 K_1(xa)} \theta(x, z) dx, \quad (4)$$

$$E_r(r, z) = -\frac{2I_0}{\pi^2 a \Delta \sigma} \int_0^\infty \frac{K_0(xr)}{x K_1(xa)} \lambda(x, z) dx. \quad (5)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} \theta(x, z) &= \frac{\partial}{\partial z} \lambda(x, z) = -x \cdot \sin(\Delta \cdot x) \\ &\sin \left(\frac{x}{2} l\right) \cdot \sin(x \cdot z_0) \cdot \sin(x \cdot z), \\ \frac{\partial}{\partial r} K_0(x \cdot r) &= -x K_1(x \cdot r). \end{aligned}$$

Компоненты плотности токов в околоскважинной среде:

$$\delta_z(r, z) = \sigma E_z(r, z), \quad \delta_r(r, z) = \sigma E_r(r, z). \quad (6)$$

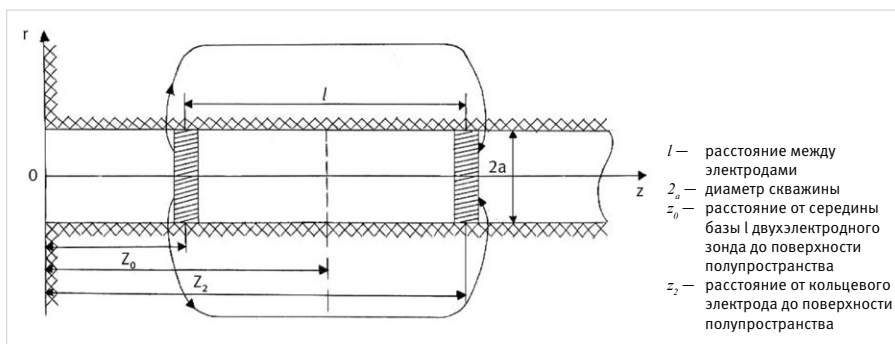


Рис. 3 — Электрический каротаж скважины в проводящем полупространстве с помощью кольцевых электродов
Fig. 3 — Electric logs of wells in a conducting half-space by means of ring electrodes

За глубину проникновения тока при электрическом каротаже — каротаже сопротивлений — принимается величина внешнего радиуса кольцевой площадки, ограниченной изнутри окружностью с радиусом скважины в середине между питающими электродами, и через которую проходит 80% от полного тока I_0 , питающего электроды [1].

Для количественной оценки радиальной глубины проникновения электрического тока вводится функция «глубинности» [1]:

$$\eta = \frac{I(r)}{I_0}. \quad (7)$$

$I(r)$ — ток через кольцевую поверхность $S(r) = \pi(r^2 - a^2)$.

Функция $\eta(r)$ определяет относительную долю общего тока I_0 , протекающего через поверхность $S(r)$.

$$\eta(r) = \begin{cases} 0, & \text{при } r = a \\ 1, & \text{при } r \rightarrow \infty \end{cases}. \quad (8)$$

В предельном случае, когда зонд расположен достаточно далеко от границы полупространства, т.е. $z_0 \gg l/2$, а также $\Delta \rightarrow 0$ и $a \rightarrow 0$, то есть в случае точечных источников тока и скважины нулевого диаметра, получено приближенное выражение для $\eta(r)$ [1]:

$$\begin{aligned} \eta(r) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^2}}, \\ \gamma &= \frac{2r}{l}. \end{aligned} \quad (9)$$

База зонда l может принимать значения в диапазоне 1,0 м ÷ 2,0 м. Диаметры скважин — 76, 105 и 200 мм.

Для определения глубины проникновения тока необходимо найти такое значение r при фиксированных параметрах электрометрического зонда и скважины, при котором левая часть уравнения (9) обращалась бы в 0,8, т.е. глубина проникновения тока в околоскважинную среду соответствует значению функции глубинности $\eta(r) = 0,8$.

В результате решения уравнения получим:

$$r_0 = 2,45 \cdot l. \quad (10)$$

То есть, глубинность электрического зондирования r_0 пропорциональна базе зонда l с коэффициентом пропорциональности 2,45. Используя функцию глубинности (9), определим, на каком расстоянии от оси скважины плотность тока максимальна. При этом плотность тока $\delta(r)$ определим как отношение приращения нормированной величины тока



Рис. 4 — К определению плотности зондирования тока в околоскважинной среде
Fig. 4 — To the determination of the density of the sensing current in the borehole environment

$\Delta\eta(r)$ в кольце радиуса r , толщиной Δr (рис. 4) к элементарному приращению площади ΔS :

$$\delta(r) = \frac{\Delta\eta}{\Delta S}, \text{ при } \Delta S \rightarrow 0. \Delta S = 2\pi r \cdot \Delta r.$$

Таким образом, плотность тока:

$$\delta(r) = \frac{1}{2\pi r} \cdot \frac{\partial\eta}{\partial r}, \quad (11)$$

$$\eta(r) = 1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4r^2}}.$$

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$\frac{\partial\eta}{\partial r} = \frac{4rl}{(l^2 + 4r^2)\sqrt{l^2 + 4r^2}}, \quad (12)$$

$$\delta(r) = \frac{2l}{\pi(l^2 + 4r^2)\sqrt{l^2 + 4r^2}}.$$

Из уравнения (12) следует, что плотность $\delta(r)$ — монотонно убывающая функция r .

Более точное численное исследование функции глубинности [1] показало, что варианты с конечной шириной кольцевых электродов 2–10 см практически не отличаются от случая электродов нулевой ширины ($2\Delta=0$).

Изменение диаметра скважины от 0 до 105 мм при базе зонда l от 1 до 2 м мало влияет на глубину проникновения тока, что проявляется в слабом увеличении глубинности. Абсолютная величина электросопротивления для однородной среды не влияет на глубину проникновения тока.

Отсюда следует важный вывод, что математическое моделирование электрического каротажа скважины в процессе бурения (рис. 1) возможно с использованием точечных моделей электродов-зондов, расположенных

в скважине «нулевого» диаметра. При таком подходе возможно применение хорошо развитой теории бокового электрического каротажа скважин двухполюсными зондами при многослойной структуре околоскважинной геологической среды [3]. Кроме того, модель проводящего полупространства с вертикальной скважиной (рис. 3) позволяет моделировать прохождение ЗТС с модулем электромагнитного каротажа водонефтяного контакта (далее — ВНК), если полагать, что при $z \geq 0$ находится водонасыщенная порода, а при $z < 0$ — нефтенасыщенная.

Такая модель ВНК вполне обоснована, поскольку электропроводность водонасыщенной породы значительно больше электропроводности породы нефтенасыщенной. При этом функция $\eta(r)$ [1], определяющая распределение зондирующего электрического поля в околоскважинной среде вблизи границы раздела ($z \geq l/2$), после преобразований имеет вид:

$$\eta(r) = 1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4r^2}} - \frac{1}{2} \left[\frac{4z_0 - l}{\sqrt{4r^2 + (4z_0 - l)^2}} - \frac{4z_0 + l}{\sqrt{4r^2 + (4z_0 + l)^2}} \right], \quad (13)$$

$$z_0 \geq \frac{l}{2}.$$

Функция распределения тока (13) может быть записана через безразмерные обобщенные параметры:

$$\gamma = \frac{2r}{l}, \quad \varsigma = \frac{z_0}{l}, \quad \varsigma \geq 0,5,$$

$$\eta(\gamma, \varsigma) = 1 - \frac{l}{\sqrt{1 + \gamma^2}} - \frac{1}{2} \left[\frac{4\varsigma - 1}{\sqrt{\gamma^2 + (4\varsigma - 1)^2}} - \frac{4\varsigma + 1}{\sqrt{\gamma^2 + 1}} \right] \quad (14)$$

Итоги

Приведенные соотношения и расчетные модели позволяют более обоснованно подойти к оценке дальности действия реальных систем электрического и электромагнитного каротажа, используемых в составе ЗТС, при бурении наклонных и горизонтально направленных нефтегазовых скважин.

Выводы

1. Структура зондирующего электрического поля схемы и расчетной модели каротажа идентичны.
2. Математическое моделирование электрического каротажа скважины в процессе бурения возможно с использованием точечных моделей электродов-зондов, расположенных в скважине «нулевого» диаметра.

Список литературы

1. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. Новосибирск: Наука, 1999. 335 с.
2. Арфкен Г. Математические методы в физике. М.: Атомиздат, 1970. 712 с.
3. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1981. 344 с.

Simulation of electrical sounding of the wellbore zone in the process of drilling oil and gas wells

Authors:

Yuriy I. Steblev — Sc.D. of technical sciences, professor of the department automation and control of technological processes
Sergey V. Susarev — Ph.D., associate professor of the department automation and control of technological processes
Alena Yu. Lapshina — master of the department automation and control of technological processes; alena08071@rambler.ru
Tat'yana Yu. Popova — master of the department automation and control of technological processes; tanyu.popova2011@yandex.ru

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

Abstract

One of the topical issues of drilling directional and horizontal wells with the use of downhole telemetry systems with an electromagnetic communication channel is the use of an electrical delimiter. It is part of the transmission system as a constructive basis for conducting electric and electromagnetic well logging while drilling. To solve this problem, it is necessary to evaluate the radial range of electrical probing near the well zone in order to determine the informativeness of the received data. A qualitative analysis of the structure of the probing electric field of the circuit and the calculation model of the logging is performed.

Materials and methods

The structure of the electromagnetic field and

the radial range of the logging system will be determined by the electrical structure of the medium, the frequency of the supply voltage and the length of the insulation coating of the housing of the bottom hole telemetry system. To quantify the radial depth of penetration of electric current, a function of "depth" is introduced.

Application of the theory of lateral electric well logging with bipolar probes with a multilayer structure near the wellbore geological environment.

Results

The relationships and design models are presented that allow to more reasonably approach the evaluation of the range of the real electric and electromagnetic logging systems

used for drilling inclined and horizontally directed oil and gas wells.

Conclusions

1. Structure of the probing electric field of the circuit and the calculation model logging are identical.
2. Mathematical modeling of electric well logging during drilling is possible using point models of probe electrodes located in a well of "zero" diameter.

Keywords

electrical and electromagnetic logging, bottom hole telemetry system, electric delimiter, electrical conductivity, depth of electrical sounding, radial range, well, drilling

References

1. Kurlynya M.V., Oparin V.N. *Skvazhinnye geofizicheskie metody diagnostiki i kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massivov gornyx porod* [Downhole geophysical methods of diagnostics and control of the stress-strain state of rock massifs]. Novosibirsk: Nauka, 1999, 238 p.
2. Arfken G. *Matematicheskie metody v fizike* [Mathematical methods in physics]. Moscow: Atomizdat, 1970, 712 p.
3. Dakhnov V.N. *Elektricheskie i magnitnye metody issledovaniya skvazhin* [Electrical and magnetic methods of well investigation]. Moscow: Nedra, 1981, 343 p.