

Н. Л. Миронцов

## Пример эффективного решения обратной задачи многозондового индукционного каротажа

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

*Запропоновано спосіб підвищення точності розв'язання оберненої задачі геоелектрики для багатозондових комплексів. На прикладі моделювання семизондового індукційного каротажу та каротажу комплексом БК-БКЗ-ІК в умовах Дніпровсько-Донецької западини показано, що описаний спосіб є більш точним, ніж той, що використовується. Представлено приклади розв'язків оберненої задачі для продуктивних пластів, отриманих різними методами.*

Основная задача количественной интерпретации при геофизическом исследовании скважин (ГИС), в том числе данных индукционного каротажа (ИК), — определение параметров модели (максимально адекватной) пласта, вскрытого скважиной [1–3], которые необходимы для достоверной оценки запасов углеводородов. Параметры такой модели в задачах геоэлектрики зависят от предполагаемого типа пласта (плотный, с проникновением, трехмерный, с непрерывным распределением удельного электрического сопротивления (УЭС) по нормали к оси скважины и т. д.). Так как каротаж является по определению косвенным измерением, то по его данным (для ИК результат измерения — кажущаяся проводимость (КП)) необходимо восстанавливать истинные параметры проводимости пласта. В настоящее время при решении обратной задачи используют модель пласта с зоной проникновения, которая описывается тремя параметрами: УЭС нетронутой части пласта, УЭС зоны проникновения,  $D/d$  — отношение диаметра зоны проникновения к номинальному диаметру скважины (положения границ пластов и УЭС бурового раствора считается известным) [1–4].

Для решения обратной задачи, в том числе ИК, принято использовать минимизацию функционала:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\delta_i \rho_i^T} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $n$  — количество зондов аппаратуры;  $\rho_i^T$  — рассчитанные теоретические значения кажущегося сопротивления (КС) для рассматриваемой модели;  $\rho_i^P$  — фактически полученные при измерении КС;  $\delta_i$  — величина погрешности  $i$ -го зонда [4–7].

Следовательно, значения параметров модели, которым соответствуют рассчитываемые  $\rho_i^T$  на каждом шаге итерационного процесса минимизации функционала (1) и будут решением обратной задачи.

Однако, как и любое измерение, данные каротажа содержат погрешность, и его результатом (для каждого зонда комплекса, в каждой точке его положения) является не одно значение, а некий доверительный интервал. Таким образом, повсеместно используемый в настоящее время подход к решению обратной задачи не является, по нашему мнению, корректным, так как он позволяет определять только конкретные величины параметров

модели и никак не учитывает погрешность измерения (во-первых, ее влияние должно быть учтено, потому что абсолютная величина погрешности измерения разными зондами — неодинакова; во-вторых, она зависит от значения измеряемой величины; в третьих, решение такой обратной задачи неустойчиво (задача некорректно поставлена по Адамару [8])).

В предлагаемом способе вместо (1) будем минимизировать функционал:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\lambda_i \rho_i^T} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $\lambda_i$  — весовые коэффициенты, определенные из условия  $\inf_{\lambda_1, \dots, \lambda_n} (\|\delta \vec{p}(\delta \vec{g})\|)$ , и соответственно определяющие меру влияния величины погрешности измерения каждого отдельного зонда на величину доверительного интервала каждого параметра модели при решении обратной задачи.

Приведем пример применения предлагаемого способа решения обратной задачи в сравнении с применяемым в настоящее время. Для этого будем рассматривать типичные пласты с проникновением, соответствующие условиям Днепровско-Донецкой впадины. В качестве зондирующей аппаратуры выберем семизондовую аппаратуру индукционного каротажа ИК-7 [9].

Для приведенных в табл. 1 параметров рассматриваемых пластов в табл. 2 представлены результаты сравнения решений обратной задачи предлагаемым и существующим методами. Аналогичное сравнение для зондирующего комплекса БКЗ-БК-ИК [4] иллюстрирует табл. 3. Размер погрешности был выбран соответственно нормам проведения каротажных работ [10]. Кроме того, подобный расчет для комплексов ИК-7 и БКЗ-БК-ИК выполнен для всего спектра моделей продуктивных пластов, относящихся к Днепровско-Донецкой впадине (скважины перечислены в статье [11]).

Таблица 1. Параметры модели различных пластов

Тип пласта	Флюидосодержание	$\rho_{п}$ , Ом · м	$\rho_{з}$ , Ом · м	$D/d$
1	Водонасыщенный	2,7	5	0,6
2	Газонасыщенный	64	30	1,2
3	Нефтенасыщенный	10	25	0,8

Таблица 2. Сравнение погрешности решения обратной задачи двумя способами для аппаратуры ИК-7

Тип пласта	Существующий метод			Предлагаемый метод		
	$\rho_{п}$ , %	$\rho_{з}$ , %	$D/d$ , %	$\rho_{п}$ , %	$\rho_{з}$ , %	$D/d$ , %
1	35,0	18,3	44,1	5,5	2,5	4,7
2	20,1	45	22,3	3,7	6,1	3,1
3	43,3	20,9	45,1	6,8	3,2	6,5

Таблица 3. Сравнение погрешности решения обратной задачи двумя способами для аппаратуры БКЗ-БК-ИК

Тип пласта	Существующий метод			Предлагаемый метод		
	$\rho_{п}$ , %	$\rho_{з}$ , %	$D/d$ , %	$\rho_{п}$ , %	$\rho_{з}$ , %	$D/d$ , %
1	19,6	30,3	74,3	8,9	14,0	16,4
2	15,4	25,4	55,4	6,5	13,2	13,2
3	18,9	28,7	61,3	7,4	12,2	16,0

Следует отметить, что эффективное практическое применение предлагаемого способа стало возможным благодаря развитию вычислительной техники, так как требует значительных вычислительных ресурсов: фактически при определении доверительного интервала каждого определяемого параметра для каждого конкретного пласта необходимо решать обратную задачу для нескольких различных значений начальных данных.

В качестве алгоритмов решения обратной задачи были использованы разработанные автором [12, 13].

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

решение обратной задачи, основанное на минимизации функционала (2), более корректное и точное, чем при использовании минимизации функционала (1);

аппаратура ИК-7 более эффективна для восстановления геоэлектрических параметров продуктивных пластов.

*Автор выражает глубокую признательность акад. НАН Украины В. И. Старостенко, д-ру физ.-мат. наук В. Н. Шуману и канд. техн. наук Р. С. Челокьяну за высказанные замечания.*

1. Пирсон С. Дж. Справочник по интерпретации данных каротажа. – Москва: Недра, 1996. – 414 с.
2. Дебрант Р. Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин. – Москва: Недра, 1972. – 288 с.
3. Латышова М. Г. Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических методов исследования скважин. – Москва: Недра, 1981. – 182 с.
4. Красножон М. Д. Компьютеризированная технология интерпретации материалов электрического каротажа // Науч.-техн. вестн. “Каротажник”. – 2005. – № 3./4 (130–131). – С. 27–52.
5. Потапов А. П., Кнеллер Л. Е. Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа для сред с произвольным и дискретным распределением проводимости по глубине // Изв. вузов. Сер. Геология и геофизика. – 1990. – № 9. – С. 122–130.
6. Кнеллер Л. Е., Потапов А. П. Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа с учетом вертикальной и радиальной неоднородности геоэлектрического разреза // Там же. – 1990. – № 9. – С. 95–102.
7. Горбик Г. К., Зундулевич С. М., Кулинкович А. Е. Машинная интерпретация кривых БКЗ. – Москва: Недра, 1982. – 106 с.
8. Старостенко В. И., Оганесян С. М. Некорректно поставленные задачи по Адамару и их приближенное решение методом регуляризации А. Н. Тихонова // Геофиз. журн. – 2001. – 23. – С. 3–20.
9. Миронцов Н. Л. Решение прямых и обратных задач электрического и индукционного каротажа методом интегральных (полных) токов // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ: Карбон, 2009. – С. 340–352.
10. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах / Под. ред. Р. Т. Хаматдинова. – Москва: М-во энергетики; “ГЕРС”, 2002. – 270 с.
11. Миронцов Н. Л. Способ решения 2D обратной задачи индукционного каротажа // Геофиз. журн. – 2009. – 31, № 4. – С. 196–203.
12. Миронцов М. Л. Метод розв’язання прямої та зворотної задач електричного каротажу // Доп. НАН України. – 2007. – № 2. – С. 128–131.
13. Миронцов М. Л. Метод швидкого розв’язання прямої та оберненої задач індукційного каротажу // Геофиз. журн. – 2007. – 29, № 5. – С. 212–214.

M. L. Myrontsov

### **Example of effective solution of the inverse problem for multielectrode induction logging**

*A method to improve the accuracy of solving the inverse geoelectric problem for multielectrode complexes is proposed. It is shown, with the modeling of seven-electrode induction logging and BKZ-BK-IK complex logging under conditions of the Dnieper-Donets depression as an example, that the proposed method is more accurate in comparison with the method used in practice at the present time. The examples of solving the inverse problem for productive strata obtained by means of various methods are given.*