

А. В. Глинских¹, О. В. Нечаев¹*

Моделирование данных каротажа ПС нефтяных скважин Западной Сибири на базе метода конечных элементов

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: GlinskikhAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Новым импульсом к развитию метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) может стать разработка подходов к численному моделированию и количественной интерпретации каротажных данных, позволяющих повысить информативность и расширить возможности его практического применения. В работе рассматривается постановка задачи ПС с привлечением теории связанных потоков, реалистично отражающей физико-химические процессы формирования ПС для случая диффузии ионов солей в околоскважинном пространстве. Представлен алгоритм численного моделирования данных каротажа ПС на основе метода конечных элементов в рамках осесимметричной модели флюидонасыщенного заглинизированного пласта-коллектора. Для оценки влияния УЭС пород на форму и амплитуду сигналов ПС выполнено моделирование каротажных данных при различных соотношениях УЭС коллекторов и бурового раствора. Возможности алгоритма демонстрируются на практических материалах каротажа ПС с привлечением результатов интерпретации данных ГИС и лабораторных исследований керна из интервалов песчано-глинистых коллекторов нижнего мела Западной Сибири.

Ключевые слова: самопроизвольная поляризация, каротаж ПС, метод конечных элементов, численные алгоритмы, моделирование каротажных данных

A. V. Glinskikh¹, O. V. Nechaev¹*

Modelling of SP logging data from oil wells in Western Siberia based on the finite element method

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: GlinskikhAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. A new impetus for the development of spontaneous potential (SP) method may come from the design of approaches to numerical modeling and quantitative interpretation of logging data, aimed for increasing the information content and expanding the possibilities of its practical application. In this work, we consider the formulation of the SP problem using the theory of coupled flows, which realistically reflects physical and chemical processes of SP formation for the case of diffusion of salt ions in the near-wellbore space. We present an algorithm for numerical simulation of SP logging data based on the finite element method within the axisymmetric model of fluid-saturated clayey reservoir. To assess the influence of rock resistivity on the shape and amplitude of SP signals, logging data were simulated at different resistivity ratios of reservoirs and drilling fluids. The capabilities of the algorithm are demonstrated on practical SP logging materials, involving the results of geophysical data interpretation and laboratory core studies from intervals of sandy-clayey reservoirs of the Lower Cretaceous of Western Siberia.

Keywords: spontaneous polarization, SP logging, finite element method, numerical algorithms, log data modeling

Введение

Разработка эффективных численных алгоритмов решения прямых и обратных задач скважинной геофизики открывает новые возможности для поиска пропущенных нефтесодержащих интервалов путём переинтерпретации архивных каротажных материалов. Это направление особенно актуально для метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС), поскольку для месторождений, находящихся на поздней стадии разработки, данные каротажа ПС являются одними из немногих широко доступных. На сегодняшний день основной вектор исследований в области метода ПС включает в себя как создание последовательной физико-математической модели явления самопроизвольной поляризации, так и привлечение современных численных подходов к моделированию и инверсии каротажных данных ПС [1-6].

В работе представлен численный алгоритм моделирования данных каротажа ПС на основе метода конечных элементов (МКЭ) в рамках осесимметричной модели флюидонасыщенного заглинизированного песчаника. Последовательное задание физико-математической модели явления ПС выполняется с помощью формализма связанных потоков [7], показавшего свою эффективность при описании физико-химических процессов, протекающих в околоскважинном пространстве. Данный подход даёт возможность корректно учесть процесс ионной диффузии между скважиной и проницаемым пластом, обуславливающий формирование ПС. Это, в свою очередь, позволяет повысить информативность данных каротажа ПС в интервалах коллекторов, представленных переслаивающимися песчано-глинистыми породами, в том числе при большом контрасте УЭС в исследуемой области. Возможности алгоритма демонстрируются на практических материалах каротажа ПС с привлечением результатов интерпретации данных ГИС и лабораторных исследований керна из интервалов нижнемеловых отложений, вскрытых скважинами на месторождении Западной Сибири.

Методы моделирования

Под решением прямой задачи ПС понимается нахождение электростатического потенциала в исследуемой области при заданном распределении геоэлектрических параметров и граничных условий. В общем случае источником сигналов ПС является сторонний физико-химический процесс, протекающий в прискважинной области и приводящий к появлению электрического тока. Использование формализма связанных потоков для физико-математической постановки задачи ПС, когда в качестве источника выступает только диффузия ионов солей, позволяет получить уравнение Пуассона в следующем виде:

$$\nabla \cdot (\rho^{-1} \nabla \varphi) = \nabla \cdot (\rho^{-1} K_{\text{да}} \nabla \lg \rho_w) \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление (УЭС), φ – электростатический потенциал (потенциал ПС), ρ_w – УЭС флюида, $K_{\text{да}}$ – коэффициент диффузионно-

адсорбционной активности породы, зависящей от её пористости, флюидонасыщения и глинистости.

Также в качестве источников ПС могут выступать фильтрация бурового раствора/пластовой воды и окислительно-восстановительные реакции, однако в рассматриваемых скважинных условиях их вклад незначителен.

Используя закон Арчи-Дахнова, а также модель Ваксманна-Смита для заряженной пористой среды, можно связать величину коэффициента диффузионно-адсорбционной активности с петрофизическими параметрами пласта-коллектора:

$$K_{\text{да}} = 2.3 \frac{k_b T}{e} \left[2 \frac{s_w \cdot t_{(+)} \cdot \phi \cdot \rho_w^{-1} + \beta_s \cdot (1 - \phi) \cdot \tilde{\rho}_s \cdot CEC}{s_w \cdot \phi \cdot \rho_w^{-1} + \beta_s \cdot (1 - \phi) \cdot \tilde{\rho}_s \cdot CEC} - 1 \right] \quad (2)$$

где ϕ – пористость, s_w – водонасыщенность пласта, β_s – эффективная подвижность катионов на минеральной поверхности, $\tilde{\rho}_s$ – плотность твердой фазы, CEC – ёмкость катионного обмена (Кл/кг), $t_{(+)}$ – микроскопическое число Хитторфа, равное относительной подвижности катионов в свободном растворе электролита, k_b – постоянная Больцмана, T – температура, e – элементарный заряд.

В данной модели учёт глинистости пласта-коллектора осуществляется посредством параметра ёмкости катионного обмена, величина которого отражает количество поверхностно-обмениваемых противоионов на единицу массы пористого материала [8]. Кроме того, для смеси различных типов твердых частиц требуется использовать обобщенную величину средней ёмкости катионного обмена. Данные о глинистости получены с привлечением результатов лабораторных исследований кернового материала из нижнемеловых коллекторов Западной Сибири. Другие петрофизические параметры среды входят в уравнения явным образом.

Численное решение прямой задачи ПС выполняется в приближении аксиальной симметрии исследуемой области и основывается на методе конечных элементов с аппроксимацией распределения электрофизических параметров сигмоидальными функциями. Поскольку в данном случае задача ПС является двумерной, в качестве базисных функций выбраны билинейные функции, определенные на прямоугольной сетке. Для нахождения решения получаемой с помощью МКЭ системы линейных уравнений используется разложение Холецкого.

Результаты численного моделирования

Неоднородное распределение геоэлектрических параметров среды может оказывать значительный эффект на форму и амплитуду сигналов ПС. Используемый алгоритм численного моделирования данных каротажа ПС позволяет учесть это влияние, что показано на примере синтетической модели пластов-коллекторов различной мощности во вмещающих глинистых отложениях (рис. 1).

Для моделирования сигналов ПС выбраны пласты большой ($16d$) и малой ($2d$) мощности, а также два пласта мощности $4d$ и шесть пластов мощности d , разделенные тонкими прослоями глины, где d – диаметр скважины.

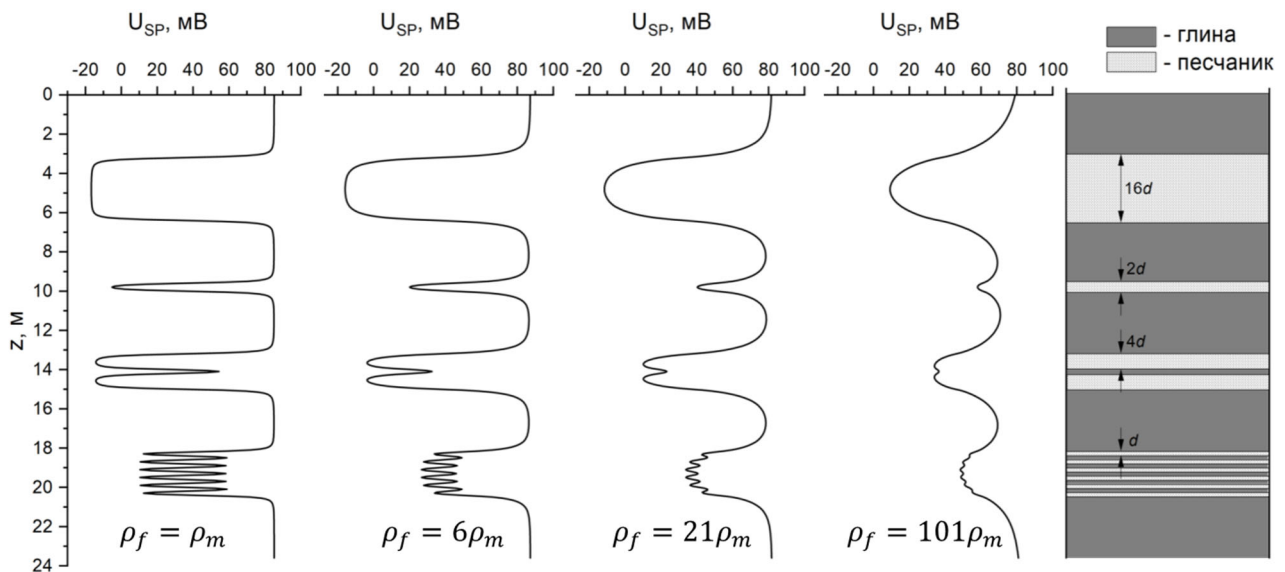


Рис. 1. Синтетические диаграммы каротажа ПС при различных соотношениях УЭС пластов-коллекторов и УЭС бурового раствора

Разработанный алгоритм позволяет провести численное моделирование сигналов ПС в интервалах песчано-глинистых нижнемеловых коллекторов Западной Сибири с привлечением результатов интерпретации данных высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) и лабораторных исследований керна. Для инициализации входных параметров модели используются данные об УЭС пластов, пористости, водонасыщенности, УЭС пластовой воды и ёмкости катионного обмена породы (табл. 1).

Таблица 1

Параметры проницаемых пластов, используемые при расчёте синтетических данных каротажа ПС

Кровля - подошва, м	ρ , Ом · м	ϕ , д. ед.	S_w , д. ед.	ρ_w , Ом · м	СЕС, Кл/кг
xx53.5 – xx54.1	7.33	0.176	0.667	0.12	10500
xx54.1 – xx54.5	7.168	0.172	0.663	0.12	10500
xx54.5 – xx55.3	6.559	0.207	0.607	0.12	10500
xx55.3 – xx55.7	5.66	0.206	0.5	0.12	10500

Кровля - подошва, м	ρ , Ом · м	ϕ , д. ед.	S_w , д. ед.	ρ_w , Ом · м	СЕС, Кл/кг
xx55.7 – xx56.3	9.303	0.191	0.586	0.12	10500
xx56.3 – xx57.1	5.027	0.201	0.563	0.12	10500
xx57.1 – xx57.7	6.807	0.186	0.666	0.12	10500
xx58.2 - xx58.8	4.644	0.158	0.885	0.12	10500
xx59.7 - xx60.4	4.944	0.150	0.918	0.12	10500
xx60.4 - xx61.1	6.643	0.139	0.962	0.12	10500

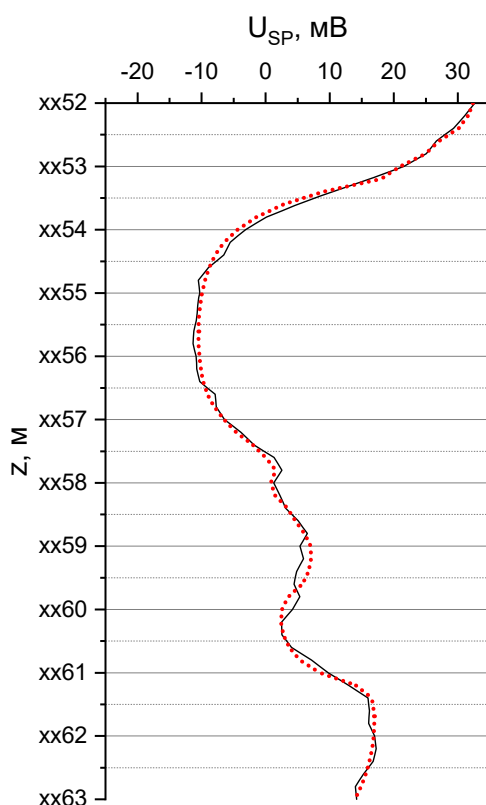


Рис. 2. Сравнительный анализ синтетических (пунктирная линия) и практических (сплошная линия) данных каротажа ПС песчано-глинистых коллекторов нижнего мела Западной Сибири

Обсуждение результатов

Как видно на рис. 1, чем больше соотношение УЭС пластов-коллекторов и УЭС бурового раствора, тем меньших значений достигают амплитуды аномалии сигналов ПС. Данный эффект наиболее выражен в маломощных проницаемых

пластах, а также пластах, разделенных тонкими глинистыми прослоями. Кроме того, при увеличении контраста УЭС между скважиной и коллекторами кривая ПС становится более сглаженной на границах пластов. Поэтому при расчётах и интерпретации данных каротажа ПС необходимо корректно учитывать распределение УЭС в исследуемой области.

Проведен сравнительный анализ синтетических и практических данных каротажа ПС (рис. 2). Результаты моделирования хорошо согласуются с практическими каротажными данными (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$). В дальнейшем предложенный подход может быть использован для разработки численного алгоритма решения обратной задачи ПС, который позволит восстанавливать петрофизические свойства коллекторов по практическим каротажным данным.

Заключение

В данной работе разработан и программно реализован алгоритм двумерного численного моделирования данных каротажа ПС на основе метода конечных элементов в сочетании с аппроксимацией физических свойств сигмоидальными функциями. Применяется физико-математическая модель формирования сигналов ПС, полученная с помощью формализма связанных потоков для случая самопроизвольной поляризации, вызванной диффузией ионов солей. Используемый алгоритм численного моделирования данных каротажа ПС позволяет учесть влияние УЭС пластов на форму и амплитуду сигналов. Эффективность подхода демонстрируются путём сравнительного анализа синтетических и практических каротажных данных ПС. Дальнейшее развитие предложенного алгоритма, основанного на точных физических принципах и реализованного с использованием современных вычислительных методов, позволит повысить информативность данных каротажа ПС, а также найти новые области практического применения этого каротажного метода. Так, актуальным направлением исследования может стать проведение литофациальных реконструкций, которые составят основу для построения реалистичных геологических моделей некоторых месторождений Западной Сибири, в том числе при отсутствии или ограниченном количестве кернового материала.

Благодарности

Разработка алгоритма численного моделирования сигналов ПС методом конечных элементов выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026, моделирование каротажных данных ПС проведено при финансовой поддержке РНФ № 23-27-00058.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ellis D.V., Singer J.M. Well Logging for Earth Scientists. – Springer, Dordrecht, 2007. – 708 p.
2. Salazar J.M., Wang G.L., Torres-Verdín C., Lee H.J. Combined simulation and inversion of SP and resistivity logs for the estimation of connate-water resistivity and Archie's cementation exponent // Geophysics. – 2008. – Vol. 73. – P. E107-E114.

3. Pan K.J., Tan Y.J., Hu H.L. Mathematical Model and Numerical Method for Spontaneous Potential Log in Heterogeneous Formations // *Appl. Math. Mech.* – 2009. – Vol. 30. – P. 209–219.
4. Woodruff W.F., Revil A., Jardani A., Nummedal D., Cumella S. Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophys. J. Int.* – 2010. – Vol. 183. – № 2. – P. 748–764.
5. MacAllister D.J., Graham M.T., Vinogradov J., Butler A.P., Jackson M.D. Characterizing the Self-Potential Response to Concentration Gradients in Heterogeneous Subsurface Environments // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* – 2019. – Vol. 124. – P. 7918–7933.
6. Bautista-Anguiano J., Torres-Verdín C., Strobel J. Mechanistic 3D finite-difference simulation of borehole spontaneous potential measurements // *Geophysics.* – 2020. – Vol. 85. – № 4. – P. D105-D119.
7. Sill W.R. Self-potential modeling from primary flows // *Geophysics.* – 1983. – Vol. 48. – № 1. – P. 76-86.
8. Revil A. Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model // *J. Colloid Interface Sci.* – 1999. – Vol. 212. – № 2. – P. 503-522.

© А. В. Глинских, О. В. Нечаев, 2023