

## **Двумерное численное моделирование данных каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации с учётом глинистости пласта-коллектора методом конечных элементов**

*А. В. Глинских\*, О. В. Нечаев*

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: GlinskikhAV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) остается одним из наиболее широко применяемых геофизических методов исследования скважин. Однако долгое время его интерпретационная база основывалась на эмпирических зависимостях и аналитических решениях в упрощенных постановках. На данный момент развитие метода сопряжено с разработкой новых подходов к численному моделированию и количественной интерпретации данных каротажа ПС. Применение численных алгоритмов позволяет существенно повысить информативность и разрешающую способность метода ПС. Тем не менее большинство предложенных на сегодняшний день подходов опираются на упрощенное описание формирования сигналов ПС, что может приводить к ошибкам в интерпретации данных в интервалах сложных коллекторов. В работе предлагается алгоритм численного моделирования данных каротажа ПС применительно к изучению заглинизированных флюидонасыщенных пластов-коллекторов. Рассматривается физико-математическая модель формирования сигналов ПС в терминах связанных потоков для случая электрохимического источника ПС. Программная реализация алгоритма включает двумерное численное моделирование сигналов ПС, основанное на применении метода конечных элементов в аксиально симметричной модели геологической среды. Исследуется характер сигналов ПС для пластов различной мощности при четырех значениях коэффициента водонасыщенности пласта-коллектора, а также зависимость формы и амплитуды аномалии ПС заглинизированного водо- и нефтеводонасыщенного пласта-коллектора от содержания и типа глинистого минерала. Полученные результаты, направленные на развитие метода ПС, позволяют улучшить качество интерпретации диаграмм ПС применительно к изучению заглинизированных коллекторов.

**Ключевые слова:** каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации, метод конечных элементов, глинистость, коэффициент водонасыщенности

## **Two-dimensional numerical simulation of spontaneous potential logging data with account to clay content of a reservoir by finite element method**

*A. V. Glinskikh<sup>1</sup>\*, O. V. Nechaev<sup>1</sup>*

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

**Abstract.** Spontaneous polarization potential (SP) logging remains one of the most widely used geophysical methods of borehole investigation. However, for a long time its interpretation was based on empirical dependences and analytical solutions in simplified formulations. At present the development of the method is associated with the development of new approaches to numerical

modeling and quantitative interpretation of SP logging data. Application of numerical algorithms makes it possible to considerably increase information content and resolution of SP method. Nevertheless, most of the currently proposed approaches rely on a simplified description of SP signal formation, which may lead to errors in data interpretation for complex reservoir intervals. In this work, we propose an algorithm for numerical simulation of SP logging data as applied to the study of clayed fluid-saturated reservoirs. The physical and mathematical model of SP signal formation in terms of coupled fluxes for the case of electrochemical SP source is considered. The software realization of the algorithm includes a two-dimensional numerical simulation of SP signals based on the application of the finite element method in the axially symmetric model of the geological medium. The character of SP signals for reservoirs of different thickness at four values of the reservoir water saturation coefficient is studied, as well as the dependence of the shape and amplitude of the SP anomaly in a water- and oil-saturated clayed reservoir on the content and type of clay mineral. The obtained results, aimed at the development of the SP method, improve the quality of SP diagrams interpretation for the study of clayed reservoirs.

**Keywords:** spontaneous polarization logging, finite element method, clay content, water saturation

### *Введение*

Метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) является одним из широко используемых в комплексе геофизических исследований скважин. Несмотря на почти вековую историю метода, создаются новые подходы к численному моделированию и количественной интерпретации данных ПС, направленные на повышение информативности и разрешающей способности метода, а также на расширение возможностей для практического применения. В настоящее время развивается теоретико-методическая и программно-алгоритмическая база метода ПС, что связано как с обобщением модельного описания физико-химических процессов, обуславливающих формирование ПС, так и с разработкой численных методов для решения прямых и обратных задач в многомерных постановках, созданием вычислительных алгоритмов и их программной реализацией [1, 2, 3, 4].

В данной работе предлагается алгоритм численного моделирования данных ПС в аксиально-симметричной модели среды на основе метода конечных элементов (МКЭ) в сочетании с аппроксимацией физических свойств на границах сигмоидальными функциями. МКЭ позволяет получать устойчивое численное решение в широком диапазоне изменения модельных параметров, а сигмоидальные функции – получить аналитическое выражение для плотности тока, приводящего к формированию ПС. Для задания физико-математической модели используется формализм связанных потоков [5], являющийся на данный момент наиболее последовательным подходом при описании физико-химических процессов. Традиционно в качестве основного вклада в ПС рассматривается процесс ионной диффузии, который является преобладающим, при этом необходимо корректное описание эффекта заглинизированности пласта-коллектора, учитывающего как количество глинистого материала, так и тип глинистых минералов. В работе демонстрируются результаты двумерного численного моделирования данных каротажа ПС в интервалах заглинизированных коллекторов при разных коэффициентах водонасыщенности.

## Методы моделирования

Моделирование данных каротажа ПС основано на численном решении задачи об электрическом потенциале в исследуемой области в рамках следующей физико-математической модели. Для нахождения распределения потенциала ПС необходимо представить плотность полного электрического тока в среде как сумму плотностей тока проводимости и тока, возникающего в результате стороннего физико-химического процесса:

$$j = j_{\sigma} + j_c, \quad (1)$$

где  $j_{\sigma}$  – плотность тока проводимости, вызванного действием электрического поля на заряды в среде,  $j_c$  – плотность тока стороннего физико-химического процесса.

Для дальнейшего вычисления необходимо воспользоваться условием сохранения полного заряда в среде, что аналогично требованию нулевой дивергенции плотности полного тока:

$$\nabla \cdot j = \nabla \cdot (\sigma E) + \nabla \cdot (j_c) = 0, \quad (2)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость.

Выражая электрическое поле через градиент скалярного потенциала  $\varphi$ , получим уравнение Пуассона, определяющее задачу на потенциал ПС:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot (j_c). \quad (3)$$

Конкретный вид функции правой части уравнения (3) зависит от выбора физико-химического процесса, вызывающего появление стороннего тока. В данной работе рассматривается ПС, возникающая только в результате диффузии ионов между пластовой водой и буровым раствором. Как известно, данный вклад существенно превышает эффекты, вызванные протеканием окислительно-восстановительных реакций или фильтрацией бурового раствора / пластового флюида. Плотность тока, вызванного диффузией ионов заданного типа в растворе электролита, можно представить в следующем виде [3]:

$$j_c = -k_b T \sum_{i=1}^N \frac{T_i \sigma}{q_i} \nabla \ln \{a_i\}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество различных типов ионов,  $T_i$  – макроскопическое число Хитторфа для ионов  $i$ -го типа (доля электрического тока, переносимого данными ионами в пористой среде),  $q_i$  – электрический заряд ионов  $i$ -го типа,  $a_i$  – активность ионов  $i$ -го типа,  $k_b$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

В предшествующих работах по теории электродиффузии в пористых средах показано, что градиент активности ионов в (4) может быть заменен на градиент проводимости соли  $\sigma_w$  [6]. В простейшем случае моновалентного раствора с учетом выражения (4), уравнение Пуассона (3) можно привести к следующему виду:

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla \varphi \right) = \frac{k_b T}{e} \nabla \cdot \left[ \frac{1}{\rho} (2T_{(+)} - 1) \nabla \ln \rho_w \right], \quad (5)$$

где  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  – удельное электрическое сопротивление (УЭС),  $\rho_w$  – УЭС пластовой воды,  $T_{(+)}$  – макроскопическое число Хитторфа (число переноса катионов),  $e$  – элементарный заряд.

Уравнение (5) учитывает диффузию ионов электролита для случая пористой среды, частицы которой могут обладать поверхностными электрическими зарядами, и описывает формирование ПС между скважиной и прилегающим проницаемым пластом, частично заполненным глинистым материалом. УЭС пласта можно представить как:

$$\rho = \left( \phi^m \cdot \left( s_w^n \cdot \rho_w^{-1} + \frac{\beta_s \cdot (1-\phi) \cdot \rho_s \cdot CEC}{s_w \cdot \phi} \right) \right)^{-1},$$

где  $\phi$  – пористость,  $s_w$  – коэффициент водонасыщенности пласта,  $m$  – показатель цементации,  $n$  – показатель насыщения,  $\beta_s$  – эффективная подвижность катионов на минеральной поверхности,  $\rho_s$  – плотность твердой фазы,  $CEC$  – емкость катионного обмена.

Данное представление отражает вклады ионной проводимости пластовой воды и поверхностных зарядов глинистых минералов. Выражение для числа переноса катионов определяется:

$$T_{(+)} = \frac{s_w \cdot t_{(+)} \cdot \phi \cdot \rho_w^{-1} + \beta_s \cdot (1-\phi) \cdot \rho_s \cdot CEC}{s_w \cdot \phi \cdot \rho_w^{-1} + \beta_s \cdot (1-\phi) \cdot \rho_s \cdot CEC},$$

где  $t_{(+)}$  – микроскопическое число Хитторфа, равное относительной подвижности катионов в свободном растворе электролита.

Необходимо отметить, что емкость катионного обмена указывает на количество поверхностно-обмениваемых противоионов на единицу массы пористого материала [6]. Для смеси различных твердых частиц (например, зерен кварца и частиц глинистых минералов) требуется использовать обобщенную величину средней емкости катионного обмена.

В работе рассматривается аксиально-симметричная модель среды, включающая скважину и пласты с плоскопараллельными границами, в каждом из которых могут быть цилиндрические зоны. Для численного решения прямой двумерной задачи ПС используется МКЭ, где в качестве базисных функций выбраны билинейные функции, определенные на прямоугольной сетке. Поскольку влияние вертикальной составляющей стороннего тока на сигнал ПС незначительно [3], то при вычислении правой части (5) учитывается только производная по радиальной координате  $r$ . Для аппроксимации радиального распределения УЭС используются сигмоидальные функции, являющиеся гладкими, что позволяет вычислить первые и вторые производные в правой части уравнения (5).

## Результаты численного моделирования

Разработанный вычислительный алгоритм используется для расчета сигналов ПС в модели чередующихся пластов песчаника разной мощности в глинистых отложениях. Для моделирования были выбраны пласты большой ( $20r_b$  и  $10r_b$ ) и малой мощности ( $5r_b$ ), а также два пласта малой мощности ( $5r_b$ ), разделенные тонким прослоем глины ( $r_b$  – радиус скважины). Рассматривается изменение формы и амплитуды аномалии ПС при разных значениях коэффициента водонасыщенности (рис. 1).

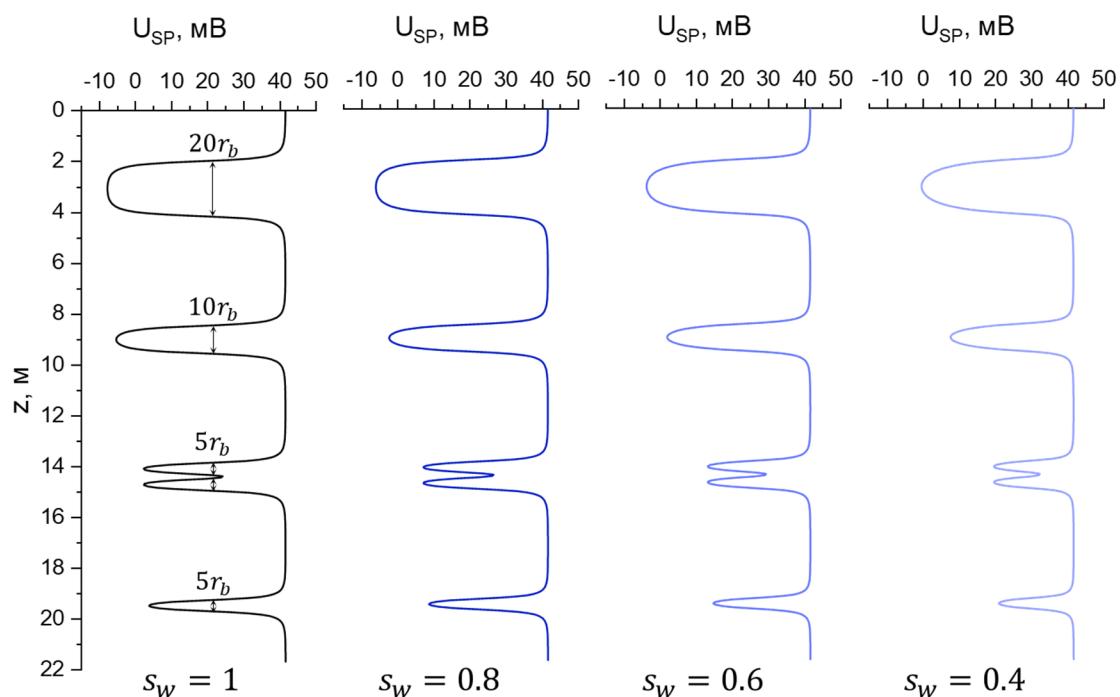


Рис. 1. Диаграммы каротажа ПС в модели чередующихся пластов песчаника разной мощности в глинистых отложениях при разных значениях коэффициента водонасыщенности

Кроме того, данный подход к решению задачи ПС позволяет проводить численное моделирование данных каротажа ПС в геологической модели среды, включающей заглинизированный пласт-коллектор, находящийся между глинистыми отложениями, с учетом типа глинистого минерала (рис. 2). В проведенных расчетах рассмотрены случаи водо- и нефтеводонасыщенного песчаника с коэффициентами водонасыщенности  $s_w = 1$  и  $s_w = 0.4$  соответственно. Учет глинистости проводится путем вычисления средней емкости катионного обмена пласта-коллектора. В качестве глинистых минералов рассматриваются каолинит (СЕС = 8700 Кл/кг), иллит (СЕС = 26500 Кл/кг) и смектит (СЕС = 144000 Кл/кг). Заглинизованность пласта-коллектора сопровождается изменением содержания глинистого материала и пористости. Содержание глинистого минерала в заглинизованном песчанике принято равным 30%, а пористость равной 0.2 для чистого песчаника и 0.15 - для заглинизованного.

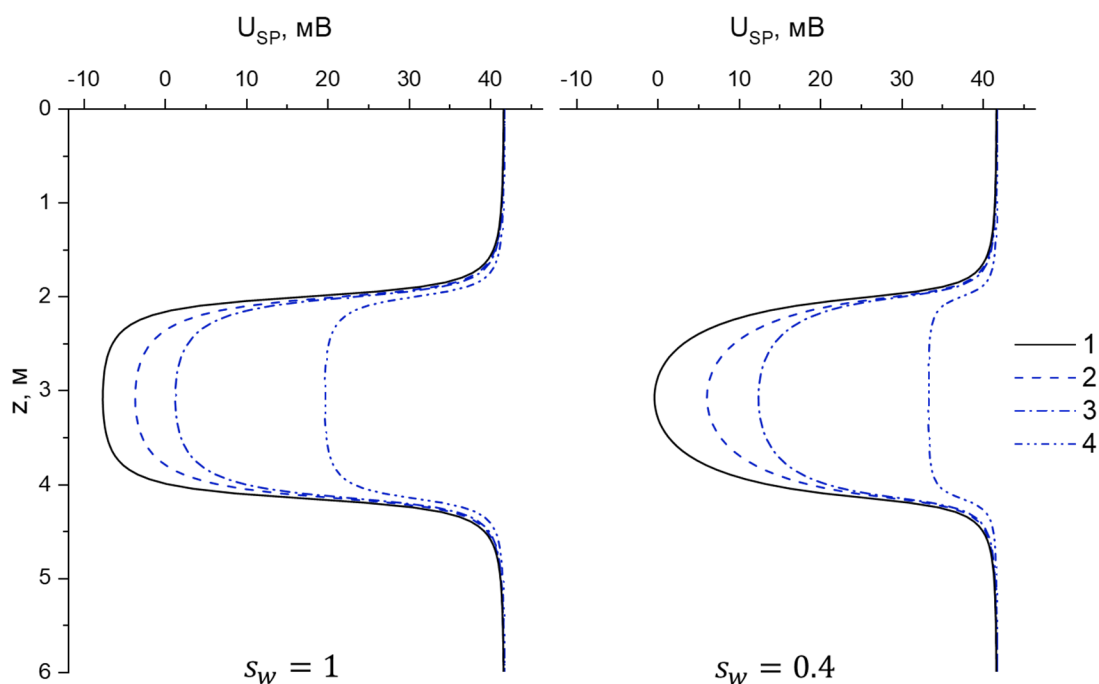


Рис. 2. Влияние типа глинистого минерала на сигнал ПС. Шифр диаграмм (пористость / содержание глинистого материала и тип глинистого минерала):  
 1 – 20% / 0%, 2 – 15% / 30% каолинит, 3 – 15% / 30% иллит,  
 4 – 15% / 30% смектит

### *Обсуждение результатов*

Моделирование сигналов ПС, проведенное для серии чередующихся пластов песчаника разной мощности в глинистых отложениях, демонстрирует изменение формы сигналов и снижение амплитуды аномалии ПС при уменьшении коэффициента водонасыщенности (рис. 1). Данный эффект наиболее выражен для пластов малой мощности.

Как видно из рис. 2, наличие глинистого материала как в водонасыщенном, так и в нефтеводонасыщенном пласте-коллекторе приводит к снижению амплитуды аномалии ПС относительно случая незаглинизованного песчаника. Наибольшее снижение амплитуды наблюдается для глинистых минералов с большими значениями емкости катионного обмена. Также стоит отметить, что для нефтеводонасыщенного пласта, содержащего смектит в качестве глинистого минерала, наблюдается значительно более сильное уменьшение амплитуды аномалии, чем для водонасыщенного.

Разработанное программное обеспечение численного моделирования данных ПС в интервалах песчано-глинистых коллекторов позволяет перейти к количественному анализу практических данных. С его использованием становится возможным оценка как содержания, так и типа глинистых минералов. Представляется целесообразным анализ практических данных с привлечением результатов лабораторных литологических и петрофизических исследований керна для скважин месторождений Широтного Приобья Западной Сибири.

## ***Заключение***

Развитие метода потенциалов самопроизвольной поляризации сопряжено с разработкой вычислительного инструментария применительно к изучению заглинизированных пластов-коллекторов. Рассмотрена физико-математическая модель формирования сигналов ПС в терминах связанных потоков при наличии электрохимического источника ПС для случая глинистого флюидонасыщенного песчаника. Параметризация модели среды учитывает содержание и тип глинистого материала пласта-коллектора. Разработан и программно реализован алгоритм численного двумерного моделирования сигналов ПС с использованием метода конечных элементов в сочетании с аппроксимацией физических свойств сигмоидальными функциями. Проведено численное моделирование сигналов ПС и установлены их зависимости от мощности, коэффициента водонасыщенности пласта-коллектора, а также типа глинистого минерала в случае заглинизированного водо- и нефтеводонасыщенного пласта песчаника.

Важным практическим приложением разработанного численного алгоритма является его применение для фациального анализа, выполняемого на основе моделирования данных каротажа ПС для разных обстановок осадконакопления, что представляет интерес дальнейшего научного исследования.

## ***Благодарности***

Исследовательская часть работы выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

## **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. 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.
4. 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.
5. Sill W.R. Self-potential modeling from primary flows // *Geophysics*. – 1983. – Vol. 48. – № 1. – P. 76-86.
6. 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, 2022