

К. Н. Даниловский¹✉, А. В. Глинских¹

Численное моделирование данных каротажа потенциала самопроизвольной поляризации в гидродинамически согласованных моделях глинизированных флюидонасыщенных отложений

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

Аннотация. Метод каротажа потенциала самопроизвольной поляризации (ПС) уже почти столетие занимает важное место в комплексе геофизических исследований скважин (ГИС). Он применяется для литологического расчленения разреза, выделения коллекторов, оценки их глинистости и, в отдельных случаях, для определения минерализации пластовых вод. Однако традиционно интерпретация данных ПС опирается на эмпирические зависимости и поправочные палетки, рассчитанные для идеализированных условий, что может приводить к существенным погрешностям, особенно в терригенных разрезах с высоким содержанием глинистого материала. Целью представленного исследования является разработка более физически обоснованного подхода к моделированию сигнала ПС, учитывающего сложное строение околоскважинной зоны и влияние глинизации. Предложен новый алгоритм численного решения прямой задачи каротажа ПС на основе метода конечных элементов (МКЭ) в осесимметричной цилиндрической постановке. Алгоритм позволяет учитывать детальное распределение свойств среды в неоднородной прискважинной области. Особое внимание в работе уделено оптимальной параметризации моделей среды с плавным изменением свойств в зоне проникновения фильтра бурового раствора. На примере гидродинамически-согласованных профилей, полученных для типичных терригенных коллекторов Западной Сибири, показаны результаты применения процедуры оптимальной кусочно-постоянной аппроксимации плавного профиля удельного электрического сопротивления (УЭС), позволяющей существенно сократить число параметров модели при сохранении физической согласованности. По результатам анализа сходимости решения, в рассматриваемых условиях аппроксимация профиля проникновения девятью кольцевыми зонами обеспечивает совпадение сигнала с рассчитанным для «эталонного» (детального) профиля в пределах 1 мВ независимо от мощности пласта-коллектора.

Ключевые слова: геофизические исследования в скважинах (ГИС); каротаж потенциала самопроизвольной поляризации (ПС), численное моделирование, метод конечных элементов (МКЭ), гидродинамически согласованные модели

K. N. Danilovskiy¹✉, A. V. Glinskikh¹

Numerical simulation of spontaneous potential well logs in hydrodynamically consistent models of shale-rich fluid-saturated formations

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
e-mail: danilovskiikn@ipgg.sbras.ru

Abstract. The spontaneous potential (SP) logging method has maintained its important role in the suite of well logging techniques for nearly a century. It is widely used for lithological differentiation,

identification of payzones, evaluation of their shale content, and, in some cases, for determining formation water salinity. However, conventional interpretation of SP data still relies on empirical relationships and correction charts derived for idealized conditions. This often leads to significant errors, particularly in clastic sections with high shale content. The aim of this study is to develop a more physically grounded approach to modeling the SP response that accounts for the complex structure of the near-wellbore zone and the influence of shale content. A new algorithm is proposed for the numerical solution of the forward SP logging problem based on the finite element method (FEM) in an axisymmetric cylindrical formulation. The algorithm enables detailed representation of property distributions within the heterogeneous near-wellbore region. Particular attention is paid to the optimal parameterization of formation models with smoothly varying properties in the mud filtrate invasion zone. Using hydrodynamically consistent profiles obtained for typical clastic reservoirs of Western Siberia, the study demonstrates the application of an optimal piecewise-constant approximation of the smooth resistivity profile. This approach significantly reduces the number of model parameters while maintaining physical consistency between the properties. Convergence analysis shows that, under the considered conditions, approximating the invasion profile with nine concentric cylindrical zones ensures that the computed SP response deviates from the “reference” (high-resolution) solution by no more than 1 mV, regardless of reservoir thickness.

Keywords: well logging, spontaneous potential logging, numerical modelling, finite element method, hydrodynamically consistent models

Введение

Несмотря на почти столетнюю историю применения, метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) по-прежнему занимает важное место в комплексе геофизических исследований скважин (ГИС). Он используется для литологического расчленения разрезов, выделения коллекторов и оценки их глинистости, а в ряде случаев, может быть использован для получения информации о минерализации пластовых вод.

Вместе с тем традиционные подходы к интерпретации данных метода ПС в значительной степени основаны на упрощенных физических моделях. На практике до сих пор широко применяются поправочные палетки и аналитические решения, полученные для идеализированных условий. Эти упрощенные постановки позволяют учитывать влияние вмещающих пород, зон проникновения фильтрата бурового раствора и др., однако они не обеспечивают согласованного описания физических и электрохимических процессов, лежащих в основе формирования сигнала ПС. Это особенно ярко проявляется в терригенных разрезах с высоким содержанием глинистого материала, где могут возникать существенные погрешности интерпретации [1]. Так, даже в современных работах часто используется приближение статического потенциала, в рамках которого источники ПС представляются в виде идеализированных дипольных слоев на границах сред. Такой подход не вполне корректно устанавливает связь между наблюдаемым сигналом и петрофизическими параметрами исследуемых отложений пласта, в частности в глинистых коллекторах. Ключевым фактором, определяющим поведение ПС в подобных условиях, является влияние глинистого материала на электрохимические свойства пористой среды.

Развитие численных методов математического моделирования открывает возможности для создания более физически обоснованных способов интерпретации

данных каротажа ПС. Современные подходы к описанию сигналов ПС основываются на термодинамически корректном представлении процессов ионной диффузии в пористых средах, что позволяет связать амплитуду ПС с минералогическим составом породы, ее пористостью и емкостью катионного обмена. При этом корректный учет указанных факторов требует использования параметров, непосредственно отражающих физику процессов, таких как число переноса катионов, а также согласованного описания распределения электрофизических свойств в прискважинной зоне [2, 3].

Дополнительную сложность представляет параметризация модели среды. Традиционно радиальное строение пласта описывается малым количеством концентрических кольцевых зон с постоянными свойствами, что упрощает расчеты, но не отражает реального плавного изменения параметров, обусловленного проникновением фильтрата бурового раствора [4]. В действительности распределение сопротивления и минерализации носит непрерывный характер, и его адекватное описание становится особенно важным при совместной интерпретации различных методов каротажа. В связи с этим актуальной задачей является разработка подходов к моделированию ПС, сочетающих физическую обоснованность и достаточную гибкость параметризации.

В работе представлены результаты разработки нового алгоритма численного моделирования данных каротажа ПС на основе метода конечных элементов (МКЭ). Алгоритм позволяет учитывать сложное строение околоскважинной области и влияние глинизации отложений на сигнал ПС. Приводятся результаты расчетов в гидродинамически-согласованных моделях околоскважинного пространства, анализируются возможности оптимальной аппроксимации плавного радиального изменения свойств и изучается сходимость решения в зависимости от детальности аппроксимации.

Численное решение прямой задачи каротажа ПС.

Для решения прямой задачи ПС рассматривается геологическая модель в цилиндрической системе координат (рис. 1), где ось z совпадает с осью скважины, а зависимость от азимутального угла отсутствует (осесимметричная постановка). Прискважинная область может включать несколько коаксиально-цилиндрических зон. В этом случае уравнение Пуассона для потенциала φ записывается в виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\rho(r, z)} \frac{\partial \varphi(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(r, z)} \frac{\partial \varphi(r, z)}{\partial z} \right) =$$

$$= \frac{k_b T}{e} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\rho(r, z)} (2T_+(z) - 1) \frac{\partial \ln \rho_w(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(r, z)} (2T_+(z) - 1) \frac{\partial \ln \rho_w(r, z)}{\partial z} \right) \right].$$

Число переноса катионов $T_+(z)$ изменяется только вдоль оси z , отражая литологическую неоднородность, тогда как $\rho(r, z)$ и $\rho_w(r, z)$ могут варьироваться как по радиусу, так и по глубине, причем в скважине они принимаются равными УЭС бурового раствора.

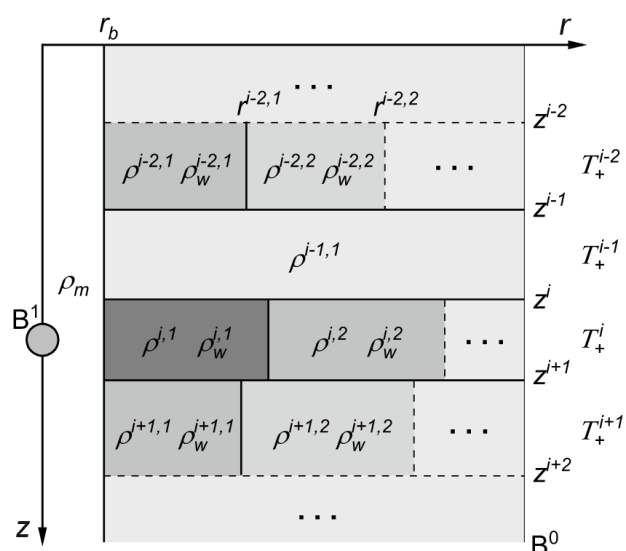


Рис. 1. Осесимметричная модель среды, включающая скважину и пачку пластов, состоящих их набора радиальных зон с различными свойствами

Для формулирования краевой задачи задаются граничные условия: на поверхности электрода нормальная компонента плотности тока равна нулю, а на внешней границе потенциал принимается равным нулю, что обеспечивает затухание поля. Задача решается при помощи МКЭ в вариационной постановке, что позволяет учитывать неоднородную проводимость и сложную геометрию источников. После аппроксимации потенциала по базисным функциям задача сводится к системе линейных уравнений вида $\hat{A}x = b$ с симметричной положительно определенной матрицей.

Электрофизические параметры $\rho(r, z)$, $\rho_w(r, z)$ и $T_+(z)$ задаются с учетом радиального разбиения на зоны. Для исключения сингулярностей скачкообразное изменение свойств на границах блоков среды заменяется сглаженными переходами с применением сигмоидальных функций, что позволяет корректно вычислять производные и задавать правую часть СЛАУ в аналитическом виде. Правая часть представляется как сумма локальных вкладов от границ зон, что обеспечивает устойчивость расчета и корректное описание зоны проникновения при произвольном числе радиальных и вертикальных областей.

Интегралы по элементам вычисляются с использованием численного квадратурного метода, основанного на последовательном уточнении сетки и экстраполяции Рундсона (интегрирование типа Ромберга), что обеспечивает учет быстрых изменений правой части вблизи границ и устойчивость решения при изменении параметров модели.

Оптимальная параметризация моделей среды с гидродинамически согласованным плавным профилем электрофизических свойств.

Во флюидонасыщенных коллекторах электрофизические свойства от стенки скважины до неизменной части пласта изменяются плавно, что обусловлено постепенным проникновением фильтрата бурового раствора и его смешиванием с

пластовыми флюидами. Подход к параметризации, описанный в предыдущем разделе, позволяет учесть эти радиальные изменения за счет аппроксимации исходного профиля дискретным набором коаксиальных цилиндрических зон. С увеличением числа зон такое представление все точнее приближает истинный плавный профиль, обеспечивая более реалистичное представление среды.

В такой постановке возникает вопрос об оптимальной аппроксимации истинного плавного профиля свойств. Высокая вычислительная сложность алгоритмов численного моделирования ограничивает их применимость при решении практических задач, поэтому задавать распределение свойств с очень детальным шагом по радиусу представляется неэффективным подходом.

В рамках исследования поиск оптимальной параметризации выполняется на примере профилей электрофизических свойств, полученных в результате гидродинамического моделирования процесса фильтрации бурового раствора в терригенные коллекторы с характерными для месторождений Западной Сибири свойствами. Рассмотрим результаты таких расчетов в модели, типичной для продуктивных меловых коллекторов БС10 [5]. Пористость пласта составляет 0.17, содержание нефти в неизменной части – 80 %. Время, прошедшее после вскрытия пласта, – 24 часа, что также типично для интервала между бурением эксплуатационной секции скважины и каротажем на месторождениях этого региона.

Минерализация воды в пласте изменяется от 1 г/л, что соответствует минерализации бурового раствора, до 15 г/л, что соответствует минерализации воды в неизменной части пласта. При этом из-за одновременного наличия в пласте подвижной нефти и минерализованной пластовой воды образуется сложный профиль УЭС, включающий проводящую окаймляющую зону (рис. 2а). Значение числа переноса катионов T_+ принято равным 0.4 (чистый песчаник) для всех радиальных зон в пласте. Температура в эксперименте принята равной 68 °С, что соответствует исходным гидродинамическим расчетам. Значения УЭС воды ρ_w определяются на основе данных минерализации с использованием эмпирической формулы [6]:

$$\rho_w = \frac{82}{1.8T + 39} \left[0.0123 + \frac{3647.5}{(1000S)^{0.955}} \right] \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где T – температура, °С; S – минерализация, кррт (для растворов NaCl допускается принимать эквивалентной г/л).

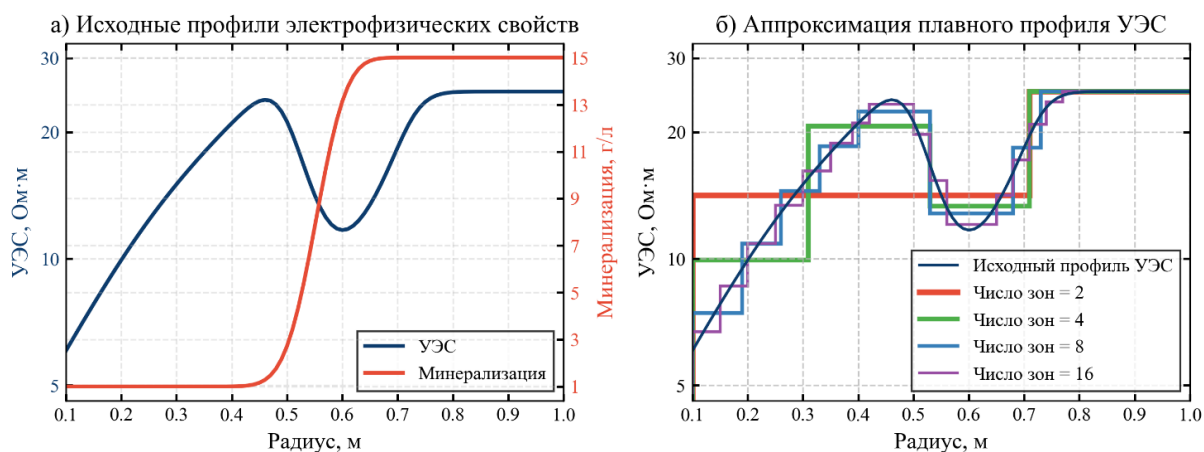


Рис. 2. а) Исходные плавные профили УЭС и минерализации воды;
б) результаты аппроксимации плавного профиля УЭС набором зон, характеризующихся постоянными значениями

Наиболее сложной немонотонной формой характеризуется именно профиль УЭС, поэтому целесообразно оценивать оптимальность аппроксимации относительно расхождений с ним. Для аппроксимации плавного радиального профиля свойств применяется кусочно-постоянная функция с фиксированным числом сегментов. Задача поиска оптимального разбиения формулируется как задача минимизации суммарной ошибки аппроксимации по всей длине профиля и решается в парадигме динамического программирования. Исходный профиль представляется в виде последовательности измеренных значений, заменяемых ступенчатой функцией с заданным числом ступенек. Для каждого возможного интервала вычисляется стоимость его замены постоянным значением, при этом значение последнего сегмента фиксируется на уровне, соответствующем правому краю исходной кривой. Формируется матрица, в которой для каждой точки профиля и числа сегментов определяется минимальная накопленная ошибка. На основе этих данных определяются оптимальные положения границ сегментов и строится итоговая кусочно-постоянная аппроксимация исходного профиля.

Полученное для профиля УЭС оптимальное геометрическое разбиение используется также для аппроксимации другого плавно изменяющегося параметра – УЭС пластовой воды. Переназначаются при этом только сами значения свойства внутри каждого из сегментов, тем самым обеспечивается согласованное геометрическое описание всех радиально изменяющихся параметров. Такой подход уменьшает число параметров модели и сохраняет физическую связь между различными свойствами, подверженными влиянию фильтрационных процессов.

Расчет сигналов ПС и анализ сходимости.

Для того чтобы более полно оценить сходимость решения при увеличении числа радиальных кольцевых зон, составляющих аппроксимацию плавного профиля, анализируется также влияние мощности пласта. Рассматривается постановка «пласт-коллектор в однородных вмещающих породах», в качестве вмещающих

пород выступают пласты с УЭС 5.0 Ом·м и числом переноса катионов 1.0 (чистые глины), минерализация воды соответствует минерализации воды в неизменной части пласта-коллектора. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Из рис. 3а видно, что поведение сигналов соответствует теоретическим ожиданиям: с увеличением мощности коллектора уменьшается значение сигнала ПС, то есть увеличивается его амплитуда относительно «линии глин». Также видно, что при увеличении детальности разбиения рассчитанный сигнал ПС сходится к некоторому постоянному значению и не меняется при дальнейшем увеличении детальности.

На рис. 3б для каждой из моделей представлены изменения сигнала относительно значения, полученного в результате расчета в модели с детальным профилем. Можно отметить, что, в среднем, в мощных пластах сигнал быстрее сходится к целевому значению. При этом для любого из рассмотренных случаев при задании профиля девятью кольцевыми зонами с постоянными значениями свойств отклонение сигнала не превышает 1 мВ.

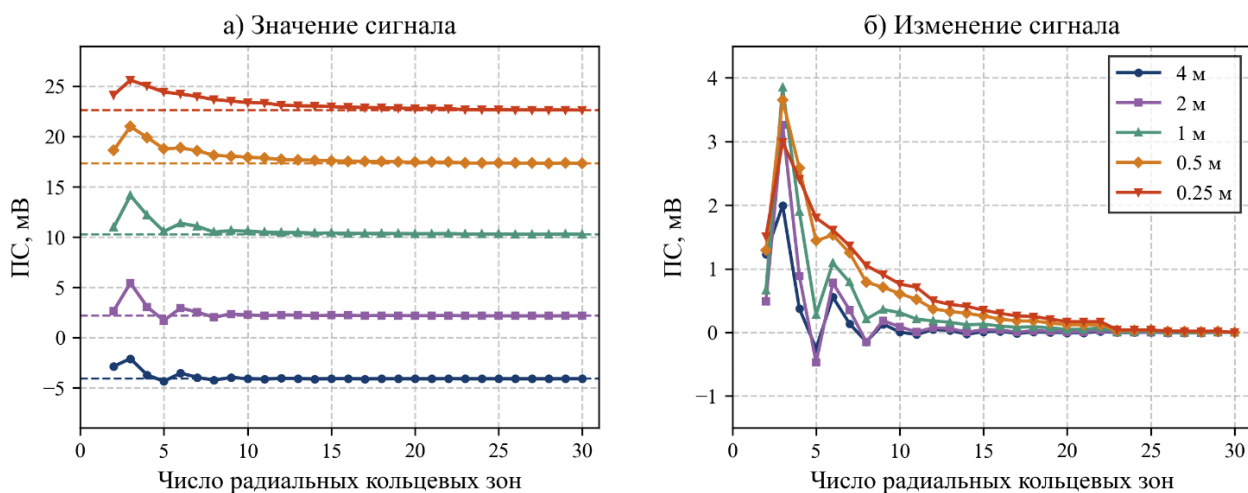


Рис. 3. а) Значения и б) изменения сигнала ПС в зависимости от числа радиальных кольцевых зон в пласте, рассчитанные в моделях «пласт-коллектор в однородных вмещающих породах» для различной мощности пласта

Несмотря на то, что рассмотренный пример представляет собой частный случай, он позволяет выявить общие закономерности поведения решения и его сходимости при детализации плавного профиля. Сформированные представления о влиянии детальности разбиения и мощности пласта могут служить ориентиром при расчетах в более сложных и реалистичных моделях среды.

Заключение

Предложен новый алгоритм численного моделирования данных каротажа ПС на основе МКЭ. В отличие от традиционных методов интерпретации, опирающихся на упрощенные аналитические решения и поправочные палетки для идеализированных условий, предложенный инструментарий явно учитывает плавное радиальное

изменение удельного электрического сопротивления и минерализации порового флюида. По результатам анализа поведения сигнала ПС в моделях среды, построенных на основе профилей проникновения, характерных для терригенных коллекторов Западной Сибири, аппроксимация плавного радиального профиля девятью коаксиальными цилиндрическими зонами с постоянными свойствами позволяет ограничить отклонение рассчитанного сигнала ПС от эталонного значения величиной не более 1 мВ. При этом сходимость решения улучшается с увеличением мощности пласта-коллектора.

Результаты исследования открывают перспективы для более точной количественной интерпретации данных метода ПС в сложных глинистых разрезах. Вместе с тем, предложенный подход не снимает проблему неоднозначности интерпретации данных ПС и в практических условиях требует привлечения дополнительной информации из других методов ГИС. Важным остается и вопрос вычислительной эффективности алгоритма, особенно при моделировании протяженных интервалов. В рамках дальнейших исследований планируется построение быстрого аналога численного алгоритма с применением методов глубокого машинного обучения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-00054, <https://rscf.ru/project/25-77-00054/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao P. [и др.] Joint inversion of saturation and Q_v in low-permeability sandstones using spontaneous potential and resistivity logs // *Petrophysics*. – 2023. – Vol. 64. – P. 741-752.
2. Woodruff W. F. [и др.] Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophys. J. Int.* – 2010. – Vol. 183. – № 2. – P. 748-764.
3. 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.
4. Дахнов В. Н. Промысловая геофизика. Методы промысловой геофизики, аппаратура и оборудование, электрические методы исследования скважин. М. : Гостоптехиздат, 1959. 697 с.
5. Сухорукова К. В., Нестерова Г. В., Примаков С. А. Выявление окаймляющей зоны при совместной инверсии сигналов гальванического и электромагнитного каротажного зондирования, измеренных одновременно и в разное время // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2022. – № S11. – С. 77-86.
6. Dresser Atlas. Well logging and interpretation techniques / Dresser Ind. Inc. [Б. м.], 1982.

© К. Н. Даниловский, А. В. Глинских, 2026