



РАЗВИТИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОТЕНЦИАЛОВ САМОПРОИЗВОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ КАРОТАЖА НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН

А.В. Глинских, О.В. Нечаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

e-mail: GlinskikhAV@ipgg.sbras.ru

В работе представлен обзор основных исследований, посвященных развитию теоретической модели явления самопроизвольной поляризации (ПС) и созданию алгоритмов численного моделирования данных каротажа ПС. Обсуждаются как ранние работы в области метода ПС, заложившие основы теоретического описания, так и работы последних лет, направленные на создание количественных физико-математических моделей ПС, а также посвященные развитию численных подходов к моделированию каротажных данных. Для демонстрации эффективности современных вычислительных методов в работе представлен оригинальный алгоритм, позволяющий рассчитывать сигналы ПС в интервалах заглинизированных пластов-коллекторов. Сравнение результатов моделирования сигналов ПС и практических каротажных данных показывает высокое качество используемой теоретической модели. Представленный обзор демонстрирует возможности задачи ПС для новых актуальных направлений практического применения.

Самопроизвольная поляризация, каротаж ПС, численное моделирование, метод конечных элементов

DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF SPONTANEOUS POLARIZATION POTENTIALS FOR OIL AND GAS WELL LOGGING

A.V. Glinskikh, O.V. Nechaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: GlinskikhAV @ipgg.sbras.ru

Among a large number of geophysical well logging methods, the spontaneous potential (SP) logging is a most demanded one for studying geological sections, and is widely used in all drilled wells. This paper presents a brief review of the main studies on the enhancement of a theoretical model for the SP phenomenon, and on the creation of algorithms for numerical modeling of SP logging data. First of all, we discuss the studies that were conducted shortly after the discovery of the phenomenon and became fundamental in the field of SP method theory. Most of the first works were aimed at identifying the key factors that influence the shape and amplitude of SP signals. The research vector of these works contributed to the creation of interpretation charts, which are widely used even today. This review also analyses the main results of the more recent theoretical works aimed at developing a quantitative SP logging model that takes into account the petrophysical properties of the geological environment, and works related to numerical approaches for the modeling of well logging data. In addition, to demonstrate the effectiveness of modern computational methods, the paper presents an original algorithm based on the finite element method and utilizing a correct physical and mathematical model of the SP phenomenon. The proposed approach makes it possible to calculate SP signals in the intervals of clayed reservoirs, with consideration to their porosity, water saturation, as well as the type and content of clay minerals. Comparison of the SP modeling results and field logging data obtained from wells in Western Siberian fields shows a high quality of our theoretical model. The presented review of key

works devoted to the theoretical description of the SP method, as well as modern numerical approaches for analysing SP logging curves in complex geological conditions, demonstrates the potential of the SP method for new areas of practical application.

Spontaneous polarization, SP logging, numerical modeling, finite element method

ВВЕДЕНИЕ

Метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) входит в стандартный комплекс геофизических исследований в скважинах и играет ведущую роль при выделении и оценке фильтрационно-емкостных свойств пластов-коллекторов, содержащих углеводороды. Как известно, в основе каротажа ПС лежит регистрация вдоль ствола скважины электрических сигналов, обусловленных физико-химическими процессами, протекающими в околоскважинном пространстве. Традиционно при описании сигнала ПС рассматривают электрокинетические, электрохимические и окислительно-восстановительные вклады, которые соответствуют образованию на границе «скважина – пласт» градиентов давления [Hunt, Worthington, 2000; Minsley et al., 2007; Revil et al., 2007], активности ионных частиц [Stoll et al., 1995; MacAllister et al., 2019] и окислительно-восстановительного потенциала [Maineult et al., 2006; Arora et al., 2007].

Открытие явления самопроизвольной поляризации братьями Шлюмберже и Г.Дж. Доллем в начале 30-х годов прошлого века привело к созданию каротажного метода, который незамедлительно нашел широкое производственное применение [Schlumberger et al., 1933]. Несмотря на то что подходы к анализу данных, полученных в результате каротажа ПС, имели исключительно эмпирический характер и основывались прежде всего на построении корреляционных зависимостей между сигналами ПС и фильтрационно-емкостными свойствами горных пород, метод ПС показал свою высокую эффективность и подтолкнул исследователей к созданию последовательной физической модели, способной вывести его на новый уровень.

Основы теоретического описания метода ПС заложили работы Г.Дж. Долля, В.М. МакКарделла и коллег, а также В.Н. Дахнова, в которых показана зависимость формы и амплитуды сигналов от геометрических параметров скважины и таких петрофизических параметров среды, как пористость и газонефтенасыщенность [Doll, 1948; McCardell et al., 1953; Дахнов, 1959]. Среди современных работ особое внимание заслуживают исследования А. Ревила, в которых проведен наиболее комплексный анализ фундаментальных физических основ ионной диффузии в пористых средах, содержащих поверхностные электрические заряды [Revil, 1999, 2007]. Представленная А. Ревилом модель позволяет связать величину сигналов ПС с целым набором петрофизических параметров – пористостью, водонасыщенностью, удельным электрическим сопротивлением пластовой воды и емкостью катионного обмена.

С развитием вычислительной техники важнейшей задачей в области геофизических исследований скважин стала разработка эффективных численных алгоритмов для моделирования и инверсии каротажных данных. Первые работы по моделированию каротажа ПС были выполнены Ф. Сегезманом с помощью аналоговых электрических схем [Segesman, 1962]. Возможности численного моделирования данных каротажа ПС, в том числе с помощью сеточных методов, включая методы конечных элементов и конечных разностей, продемонстрированы Г.Ж. Чжаном и Г.Л Ваном [Zhang, Wang, 1999], а также в более поздних работах [Bautista-Anguiano et al., 2020; Epov et al., 2022]. Эффективный подход к анализу данных

каротажа ПС, включающий как использование подробной физико-математической модели ПС, так и алгоритмы численной инверсии, представлен в работе В.Ф. Вудрофа с соавторами [Woodruff et al., 2010].

Несмотря на большой прогресс в области теории метода ПС, интерпретация каротажных данных в большинстве случаев до сих пор основывается на использовании эмпирических зависимостей и упрощенных модельных подходов, что в значительной степени ограничивает информативность метода. По этой причине создание эффективных алгоритмов многомерного численного моделирования в совокупности с использованием детальных физико-математических моделей остается важным и актуальным направлением исследования.

Целью данной работы является краткий аналитический обзор ключевых работ по методу ПС – его физико-химической теории и численному моделированию. В качестве теоретико-алгоритмического развития метода ПС рассматривается обобщенное модельное описание процессов, приводящих к формированию сигналов ПС, и численное решение прямой задачи ПС методом конечных элементов в рамках осесимметричной модели флюидонасыщенного пласта-коллектора с учетом типа и содержания глинистого материала.

ОТКРЫТИЕ ЯВЛЕНИЯ ПС И ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕОРИИ МЕТОДА

Явление самопроизвольной поляризации обнаружено в 1931 г. сотрудниками компании «Schlumberger» во время записи каротажа сопротивления [Schlumberger et al., 1933]. Как отмечал Г.Дж. Долль, каротажный отклик, наблюдаемый при пропускании электрического тока в околоскважинном пространстве, возникал и в его отсутствии. Это открытие привело к созданию каротажного метода потенциалов самопроизвольной поляризации, который, несомненно, не уступал по своей информативности каротажу сопротивления.

Внедрение каротажа ПС началось в том же году в Азербайджане во время совместных работ советских и французских электроразведчиков на месторождениях «Азнефти». Главным образом метод ПС позволял судить о пористости горных пород, тем самым упрощая поиск и выявление проницаемых интервалов. Основной причиной возникновения самопроизвольной поляризации К. Шлюмберже рассматривал явление электрофильтрации, при котором разность потенциалов между измерительным и обратным электродами обусловлена проникновением бурового раствора в пласт. Однако позже было установлено, что ключевой вклад в формирование сигналов ПС вносят электрохимические процессы, вызванные различиями соленостей бурового раствора и пластовой воды [Schlumberger et al., 1933].

В 1940-х годах появились исследования, направленные на создание последовательной теоретической модели метода ПС, которая могла бы способствовать повышению его информативности. В 1948 году Г.Дж. Долль публикует свою работу, в которой впервые вводит понятие статического потенциала самопроизвольной поляризации, а также рассматривает влияние мощности пласта-коллектора и его удельного сопротивления на характер кривой ПС [Doll, 1948]. Безусловно работы Г.Дж. Долля во многом определили основные принципы интерпретации каротажных кривых ПС, в частности многие современные исследователи до сих пор при анализе сигналов ПС ограничиваются рассмотрением статического потенциала. Однако предложенная Г.Дж. Доллем модель не учитывает физико-химические процессы, участвующие в формировании сигналов ПС, и не позволяет связать форму и амплитуду аномалии ПС с петрофизическими параметрами пласта-коллектора.

В 1953 году В.М. МакКардел с коллегами проводят исследование, в котором устанавливают влияние содержащихся в горных породах глинистых минералов на наблюдаемые сигналы ПС [McCardell

et al., 1953]. В работе показано, что разность потенциалов между двумя растворами, содержащими соли в разных концентрациях и глинистый материал, определяется свойствами двойного электрического слоя, возникающего на поверхности глинистых частиц. Проведенный анализ позволил на качественном уровне установить влияние на сигналы ПС глинистых минералов, содержащихся в породе, и с хорошей точностью описать имеющиеся на тот момент результаты лабораторных исследований ПС. Однако предложенная модель не давала возможности связать величину сигналов ПС с конкретными петрофизическими свойствами горных пород на количественном уровне.

Наряду с зарубежными коллегами теоретические исследования в области каротажа ПС активно проводили и советские ученые. Так, значительный вклад в развитие теории метода ПС сделан В.Н. Дахновым. В его работах описаны основные физико-химические процессы, приводящие к возникновению сигналов ПС, включая диффузию, адсорбцию, фильтрацию и протекание окислительно-восстановительных реакций [Дахнов, 1959]. Наиболее подробно рассмотрены условия формирования сигналов ПС, которые обусловлены диффузионным переносом ионов в пористых средах, в том числе содержащих заряженные частицы. Полученное Дахновым аналитическое выражение для диффузионно-адсорбционного потенциала позволяет связать сигнал ПС с такими параметрами коллектора, как удельная поверхность твердых частиц, влажность, коэффициент пористости и коэффициент газонефтенасыщенности.

Несмотря на активное развитие теоретического описания метода ПС, ранние модели в значительной степени опирались на эмпирические зависимости и упрощенные подходы. В результате интерпретация данных каротажа ПС долгое время носила преимущественно качественный характер.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ПС

Для более поздних работ по теории метода ПС характерны попытки модельного описания явления самопроизвольной поляризации, имеющего прежде всего количественный характер и основанного на фундаментальных положениях коллоидной химии и физики поверхностных явлений.

Существенным вкладом в развитие данного направления стали работы А. Ревила. Основной вектор его исследований направлен на построение детальной теоретической модели процессов переноса вещества, электрического заряда и тепла в заряженных пористых средах [Revil, 1999, 2007; Revil, Linde, 2006]. Для метода ПС наибольшее значение имеет работа, посвященная анализу ионной диффузии в коллоидных растворах и пористых средах, а также связанных с ней явлений электропроводности, мембранного и термоэлектрического потенциалов [Revil, 1999]. А. Ревил рассматривает полную диффузию ионов как совокупность диффузии через объемный раствор, занимающий поры, и дрейфа ионов на границе раздела фаз «твердая частица – вода в двойном электрическом слое». Стоит отметить, что большинство моделей, предложенных ранее, предполагали отсутствие влияния микрогеометрии пор на мембранный потенциал в гранулированных пористых средах. Модель Ревила, напротив, учитывает этот эффект и не имеет ограничений предшествующих подходов, например, таких как необходимость введения большого количества трудно измеряемых параметров в модели П.Н. Сэна [Sen, 1989]. Кроме того, им приводится точное решение для случая произвольной солености электролита. Важным достоинством модели Ревила является связь величины мембранного потенциала с пористостью и емкостью катионного обмена твердых частиц, образующих матрицу породы, что делает ее удобной для практического применения.

В последующих работах А. Ревилом и Н. Линде создана унифицированная модель для описания переноса воды и ионов в заряженных микропористых материалах путем масштабирования локальных уравнений (уравнений Нернста-Планка и Навье-Стокса) с помощью оператора усреднения по объему [Revil, Linde, 2006; Revil, 2007]. Полученные аналитические выражения устанавливают ряд простых и теоретически обоснованных связей между измеряемыми свойствами материала, ключевыми микроструктурными параметрами пористой среды (извилистостью порового пространства и внутренней проницаемостью) и электрохимическими свойствами двойного электрического слоя глинистых частиц. Позднее модель расширена для описания диффузии ионов в средах с произвольной степенью флюидонасыщения [Revil, Jougnot, 2008].

К числу значимых работ по теории метода ПС можно отнести исследования В.В. Кормильцева, посвященные разработке физико-химической теории самопроизвольной поляризации с помощью аналитического расчета диффузионно-адсорбционных потенциалов в неоднородных средах. Главным образом его работы основываются на классической теории двойного электрического слоя применительно к случаю капиллярнопористой среды [Кормильцев, 1995]. Это, в свою очередь, показывает, что величина равновесного адсорбционного потенциала связана напрямую с размером пор и косвенно с гранулометрическим составом породы [Кормильцев, Ратушняк, 2007].

Начиная с первых наблюдений явления самопроизвольной поляризации, непрерывно совершенствовалось описание процессов, отвечающих за возникновение сигналов ПС. Описанные в разделе физические модели стали основой для разработки численных алгоритмов моделирования и инверсии сигналов ПС, которые открыли новые возможности применения метода каротажа ПС.

ЧИСЛЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДАННЫХ КАРОТАЖА ПС

Использование численных подходов к моделированию каротажных данных ПС является основой современной интерпретации комплекса методов геофизических исследований скважин. Однако уже работы Г.Дж. Долля по теории метода ПС включают расчеты кривых ПС, используемые для оценки влияния геометрических параметров модели среды [Doll, 1948]. Первые результаты по моделированию сигналов ПС, направленные на практическое использование, получены Ф. Сегезманом с помощью аналоговой резисторной цепи, отражающей распределение УЭС и источников напряжения в прискважинной области [Segesman, 1962]. Выполненные им расчеты позволили оценить влияние на амплитуду сигнала ПС различных факторов, включая УЭС и толщину проницаемого пласта, а также учесть эффекты проникновения бурового раствора в пласт, что стало основой при создании корректировочных палеток.

Несмотря на то, что использование различных поправок и палеток для коррекции до сих пор распространено на практике, такой способ анализа каротажных данных имеет множество недостатков и значительно уступает по эффективности применения подходам, основанным на численных методах. В 1997 году Г.Ж. Чжан и Г.Л. Ван разработали алгоритм, использующий метод конечных элементов для моделирования сигналов ПС в рамках теории скалярного, а впоследствии и векторного, потенциала [Zhang, Wang, 1999]. Их алгоритм успешно воспроизводит модель Сегезмана и показывает высокую вычислительную эффективность. Позднее в работе Дж.М. Салазара и коллег проводится совместная численная инверсия данных каротажа ПС, рассчитанных с помощью алгоритма Чжана и Вана, и данных каротажа сопротивления, полученных методом численного согласования мод [Salazar et al., 2008]. Это позволило найти значения УЭС пластовой воды и показателя цементации для набора практических

данных. Подробное описание численного моделирования сигналов ПС с помощью сеточных методов представлено также в работах Дж. Баутиста-Ангуиано с соавторами [Bautista-Anguiano et al., 2020], в которой используется метод конечных разностей, и М.И. Эпова с соавторами [Епов et al., 2022], основанной на методе конечных элементов с применением детальной физической модели ПС для заглинизированного пласта-коллектора. В данных работах физико-математическая модель ПС А. Ревила применяется с помощью формализма связанных потоков, рассмотренного В.Р. Силлом [Sill, 1983].

Один из наиболее комплексных подходов к интерпретации данных каротажа ПС предложен в работе [Woodruff et al., 2010], в которой для моделирования и инверсии приводится механистическая модель, основанная на единой петрофизической модели электропроводности и ионной диффузии. Данная модель во многом построена на результатах Ревила, описанных в предыдущем разделе [Revil, 1999]. Отличительной особенностью подхода, представленного в работе, является одновременная инверсия целого набора скважинных измерений, включающих кривые ПС, каротажа сопротивления, а также информацию, найденную по данным ядерных методов каротажа (объемной плотности, водородной пористости, естественной радиоактивности). В.Ф. Вудрофом и коллегами разработан алгоритм для инверсии следующих петрофизических параметров пласта-коллектора: солёности пластовой воды, пористости, водонасыщенности, емкости катионного объема, показателей цементации и насыщения. Получение такого количества информации в результате анализа каротажных данных является значительным результатом, однако недостатком предложенного подхода можно считать сложность практической реализации.

Таким образом, несмотря на большой прогресс за последние десятилетия, дальнейшее развитие подходов и методов для моделирования данных каротажа ПС в классе реалистичных моделей, а также создание соответствующих эффективных вычислительных алгоритмов остается актуальным направлением.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ КАРОТАЖА ПС В МОДЕЛИ ГЛИНИСТОГО ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО ПЕСЧАНИКА

Описанные теоретические модели и численные методы применяются в практических приложениях каротажа ПС, в первую очередь для интерпретации данных применительно к изучению флюидонасыщенного заглинизированного пласта-коллектора. Перспективным подходом к решению данной задачи становится создание вычислительного алгоритма для моделирования данных каротажа ПС с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с учетом последовательной физико-математической модели, адекватно описывающей явление самопроизвольной поляризации.

Основой такого алгоритма является решение прямой задачи ПС, формальная постановка которой значительно не изменилась со времени первых работ по теории метода и заключается в нахождении электростатического потенциала внутри скважины при заданном распределении геоэлектрических параметров среды. В работах В.Р. Силла [Sill, 1983] и А. Ревила [Revil, 2007] показано, что для наиболее корректной постановки прямой задачи ПС необходимо формализовать ее в терминах метода связанных потоков, что позволяет получить уравнение Пуассона для искомого потенциала в следующем виде:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot (j_s),$$

где σ – удельная электрическая проводимость (УЭП), φ – электростатический потенциал (потенциал ПС), j_s – плотность тока стороннего источника.

Данное уравнение формулируется как следствие требования сохранения полного заряда среды и отражает тот факт, что источником ПС является сторонний физико-химический процесс, протекающий в прискважинной области и приводящий к появлению электрического тока. Конкретный вид функции правой части определяется типом процесса, в качестве которого могут выступать диффузия ионов солей, фильтрация бурового раствора и пластовой воды, а также окислительно-восстановительные реакции. Однако в большинстве ситуаций в стандартных скважинных условиях величина последних двух вкладов в величину ПС оказывается существенно меньше вклада ионной диффузии. При пренебрежении этими эффектами плотность тока стороннего источника принимает следующий вид:

$$j_s = -\frac{k_b T}{e} \sigma (2T_{(+)} - 1) \nabla \ln \sigma_w,$$

где σ_w – УЭП пластовой воды, $T_{(+)}$ – макроскопическое число Хитторфа (доля электрического тока, переносимого катионами в пористой среде), k_b – постоянная Больцмана, T – температура, e – элементарный заряд.

Удельная электрическая проводимость пластовой воды прямо пропорциональна ее солёности ($\sigma_w = e C_w (\beta_{(+)} + \beta_{(-)})$), где C_w – солёность пластовой воды, $\beta_{(\pm)}$ – подвижности катионов и анионов соответственно), в то время как связь остальных параметров модели с петрофизическими величинами является более сложной. Используя зависимость Арчи–Дахнова, а также модель Ваксмана–Смита для заряженной пористой среды, можно получить следующие соотношения:

$$\sigma = \sigma_{(+)} + \sigma_{(-)},$$

$$\sigma_{(+)} = s_w^n \phi^m \left(t_{(+)} \sigma_w + \beta_s \tilde{\rho}_s \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right) CEC \right),$$

$$\sigma_{(-)} = s_w^n \phi^m (1 - t_{(+)}) \sigma_w,$$

$$T_{(+)} = \frac{\sigma_{(+)}}{\sigma},$$

где $\sigma_{(\pm)}$ – вклад в УЭП от катионов/анионов, ϕ – пористость, s_w – водонасыщенность пласта, m – показатель цементации, n – показатель насыщения, β_s – эффективная подвижность катионов на минеральной поверхности, ρ_s – плотность твердой фазы, CEC – ёмкость катионного обмена (Кл/кг), $t_{(+)}$ – микроскопическое число Хитторфа, равное относительной подвижности катионов в свободном растворе электролита. Однако стоит отметить, что для практического применения данной модели удобнее оперировать значениями удельного электрического сопротивления $\rho = \sigma^{-1}$.

Достоинством предложенного подхода к определению модельных параметров в задаче ПС является явная зависимость между расчетными сигналами и реальными петрофизическими параметрами среды [Revil, 1999; Woodruff et al., 2010]. При этом количество и тип глинистых минералов, содержащихся в пласте, определяются через параметр ёмкости катионного обмена. Данная величина отражает количество противоионов двойного электрического слоя глинистых частиц на единицу массы пористого материала. Если песчаный пласт-коллектор содержит один тип глинистого минерала, то его ёмкость катионного обмена можно выразить следующим образом:

$$CEC = CEC_r k_r,$$

где k_r – коэффициент заглинизированности пласта, CEC_r – емкость катионного обмена глины. В случае нескольких типов глинистых минералов необходимо использовать обобщенную величину средней емкости катионного обмена.

Дальнейшим предположением, применимым для большинства практических случаев, является аксиально-симметричная модель среды, включающая вертикальную скважину и пласты с горизонтальными плоскопараллельными границами, каждый из которых может содержать одну или несколько цилиндрических зон. В качестве базисных функций для МКЭ выбраны билинейные функции, определенные на прямоугольной сетке. Для аппроксимации радиального распределения удельной проводимости используются сигмоидальные функции, являющиеся гладкими, что позволяет вычислить первые и вторые производные в правой части уравнения Пуассона. С помощью МКЭ численное решение исходного уравнения Пуассона сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженной матрицей большой размерности. Для решения полученной СЛАУ используется метод Холецкого, который позволяет сначала разложить матрицу в произведение двух треугольных матриц, а затем найти нескольких решений рассматриваемой СЛАУ. Это значительно повышает эффективность расчета при численном моделировании сигналов ПС в реалистичных моделях геологической среды.

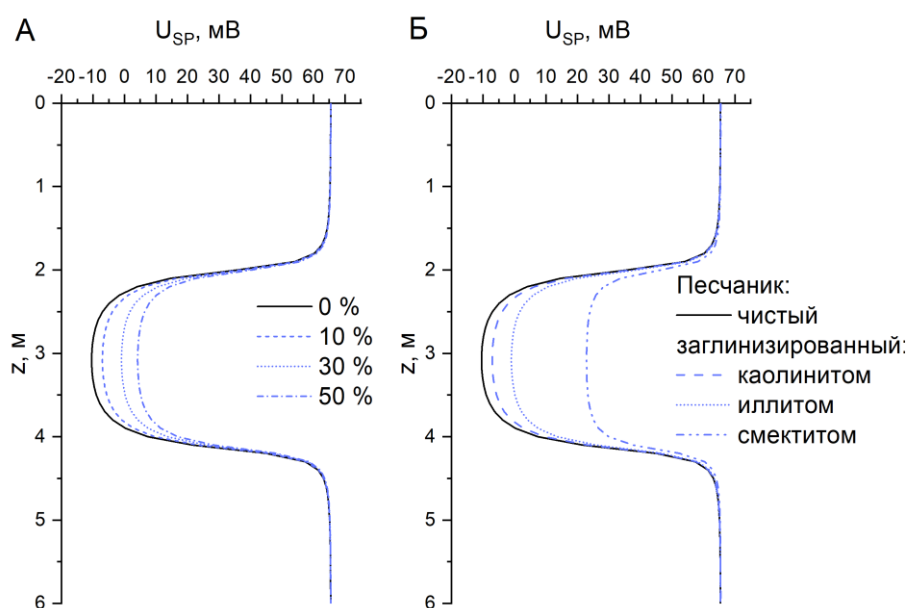


Рис. 1. Влияние количества глинистого минерала (иллит), содержащегося в пласте-коллекторе, на сигнал ПС (А). Влияние типа глинистого минерала на сигнал ПС при его 30 % содержании в пласте-коллекторе (Б). Рассмотренные типы глинистых минералов: каолинит ($CEC = 8700$ Кл/кг), иллит ($CEC = 26500$ Кл/кг) и смектит ($CEC = 144000$ Кл/кг). Параметры модели: УЭС бурового раствора – 2 Ом·м, радиус скважины – 0.108 м, соленость пластовой воды – 20 г/л, $\phi = 0.1$, $s_w = 1$, $m = 2$, $n = 2$

Разработанный вычислительный алгоритм используется для расчета сигналов ПС в модели заглинизированного пласта-коллектора ограниченной мощности, перекрытого и подстилаемого глинистыми отложениями. Результаты моделирования показывают зависимость сигнала ПС как от количества глинистого материала, так и от типа глинистых минералов (рис. 1). Как видно, повышение заглинизированности пласта-коллектора и выбор глинистых минералов с большей величиной CEC_r приводят к уменьшению амплитуды аномалии ПС. Из представленного теоретического описания следует,

что данная зависимость обусловлена увеличением значения емкости катионного обмена пласта-коллектора, однако для оценки индивидуального влияния данных факторов необходимо дополнительно использовать другие методы ГИС, например, гамма-каротаж.

Предложенное программное обеспечение для моделирования сигналов ПС позволяет выполнять количественный анализ практических каротажных данных в интервалах песчано-глинистых коллекторов. Демонстрация возможностей алгоритма проводится на практических материалах каротажа ПС со скважин месторождений Западной Сибири с привлечением результатов интерпретации данных ГИС и лабораторных исследований керна. Данные о пористости, водонасыщенности и емкости катионного обмена породы, используемые при моделировании, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Петрофизические параметры пластов-коллекторов, используемые при расчете синтетических сигналов ПС в интервале хх34–хх65

Кровля, м	Подошва, м	ϕ , д. ед.	S_w , д. ед.	CEC, Кл/кг
хх38	хх38.6	0.122	0.62	11550
хх39.4	хх40.1	0.183	0.584	9620
хх40.1	хх41.6	0.184	0.542	9620
хх41.6	хх42.2	0.181	0.611	9620
хх43.6	хх44.3	0.181	0.656	9610
хх44.3	хх44.8	0.188	0.660	9610
хх44.8	хх45.5	0.197	0.695	9610
хх45.5	хх46.4	0.188	0.806	9610
хх46.9	хх47.8	0.198	0.920	9610
хх48.5	хх49.3	0.176	0.969	9610
хх49.3	хх49.9	0.196	0.936	9610
хх49.9	хх51.5	0.162	0.999	9610
хх56.1	хх56.6	0.122	0.36	13850
хх60.6	хх61.3	0.166	0.604	13460
хх61.3	хх61.8	0.185	0.585	13460
хх61.8	хх62.6	0.214	0.535	13460
хх62.6	хх63.5	0.266	0.453	13460

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с практическими данными (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$), подтверждая эффективность разработанного алгоритма (рис. 2). В дальнейшем предложенный подход будет использован для разработки численного алгоритма решения обратной задачи ПС, который позволит восстанавливать петрофизические свойства пластов-коллекторов по практическим каротажным данным ПС.

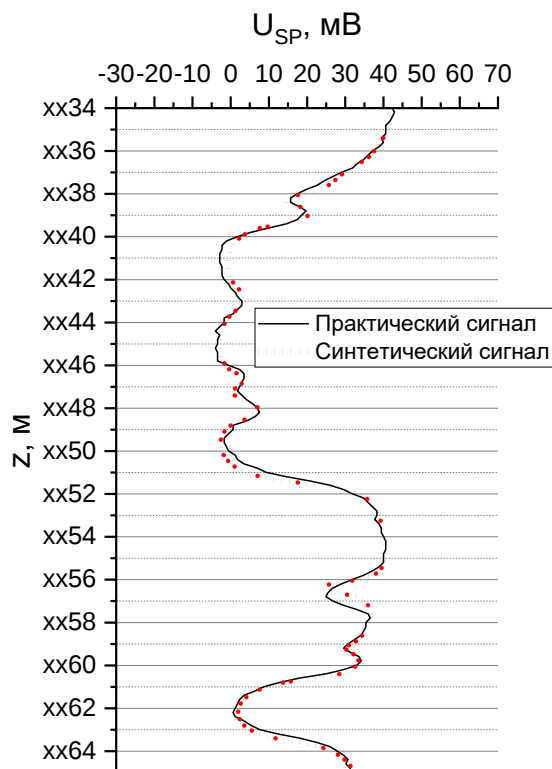


Рис. 2. Сравнение результатов численного моделирования сигналов ПС (пунктирная линия) и практических данных каротажа ПС (сплошная линия). Параметры модели: УЭС бурового раствора – 0.6 Ом·м, радиус скважины – 0.108 м, соленость пластовой воды – 25 г/л

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день каротаж ПС является одним из основных и востребованных на практике методов геофизических исследований геологических разрезов, вскрытых нефтегазовыми скважинами. В данной работе представлен обзор основных этапов создания последовательной и подробной физико-математической модели задачи ПС. Несмотря на то что первые теоретические исследования в области каротажа ПС были проведены вскоре после открытия явления в начале XX века, наиболее развитый подход к описанию сформировался только в последние десятилетия. На текущий момент выбор оптимальной модели задачи ПС позволяет связать наблюдаемые каротажные данные с петрофизическими свойствами геологической среды. Не менее важным аспектом развития метода ПС стало создание эффективных расчетных алгоритмов, необходимых для повышения качества интерпретации больших объемов каротажных данных. Представлен оригинальный алгоритм моделирования сигналов ПС, основанный на методе конечных элементов. По результатам численного моделирования показано, что предложенный алгоритм позволяет эффективно рассчитывать сигналы ПС в интервалах заглинизированных коллекторов. Проведено сравнение синтетических и практических данных каротажа ПС, полученных со скважин месторождений Западной Сибири. Выполненный анализ

ключевых работ, посвященных теоретическому описанию метода ПС, а также демонстрация возможностей современного программного обеспечения для анализа кривых каротажа ПС в сложных геологических условиях, позволяют сформулировать новые актуальные направления практического применения задачи ПС.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Дахнов В.Н.** Промысловая геофизика. Методы промысловой геофизики, аппаратура и оборудование, электрические методы исследования скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 697 с.
- Кормильцев В.В.** Электрокинетические явления в пористых горных породах. – Екатеринбург, УНЦ АН СССР, 1995. – 48 с.
- Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н.** Теоретические и экспериментальные основы спонтанной поляризации горных пород в нефтегазовых скважинах. – Екатеринбург, УрО РАН, 2007. – 164 с.
- Arora T., Linde N., Revil A., Castermant J.** Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2007. – Vol. 92 (3–4). – P. 274–292, doi: 10.1016/j.jconhyd.2007.01.018.
- 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, doi: 10.1190/geo2019-0632.1.
- Doll H.G.** The S.P.Log: Theoretical analysis and principles of interpretation // *Transactions AIME*. – 1948. – Vol. 179. – P. 146–185, doi: 10.2118/949146-G.
- Епов М., Глинских А., Нечаев О.** Finite-element modeling of spontaneous potential in an axisymmetric reservoir model with account of its shale content // *Geosciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Article 30, doi: 10.3390/geosciences12010030.
- Hunt C.W., Worthington M.H.** Borehole electrokinetic responses in fracture dominated hydraulically conductive zones // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – Vol. 27 (9). – P. 1315–1318, doi: 10.1029/1999GL011099.
- 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 // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124 (8). – P. 7918–7933, doi: 10.1029/2019JB017829.
- Maineult A., Bernabé Y., Ackerer P.** Detection of advected, reacting redox fronts from self-potential measurements // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2006. – Vol. 86 (1–2). – P. 32–52, doi: 10.1016/j.jconhyd.2006.02.007.
- McCardell W.M., Winsauer W.O., Williams M.** Origin of the electric potential observed in wells // *Petroleum Transactions, AIME*. – 1953. – Vol. 198. – P. 41–50.
- Minsley B.J., Sogade J., Morgan F.D.** Three-dimensional source inversion of self-potential data // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – Vol. 112 (B2). – Article B02202, doi: 10.1029/2006JB004262.
- Revil A.** Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1999. – Vol. 212 (2). – P. 503–522, doi: 10.1006/jcis.1998.6077.
- Revil A.** Thermodynamics of ions and water transport in porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 307 (1). – P. 254–264, doi: 10.1016/j.jcis.2006.10.074.

- Revil A., Linde N.** Chemico-electromechanical coupling in microporous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 302 (2). – P. 682–694, doi: 10.1016/j.jcis.2006.06.051.
- Revil A., Jougnot D.** Diffusion of ions in unsaturated porous materials // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 319 (1). – P. 226–235, doi: 10.1016/j.jcis.2007.10.041.
- Revil A., Linde N., Cerepi A., Jougnot D., Matthäi S., Finsterle S.** Electrokinetic coupling in unsaturated porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 313 (1). – P. 315–327, doi: 10.1016/j.jcis.2007.03.037.
- 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 (3). – P. E107–E114, doi: 10.1190/1.2890408.
- Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G.** A New contribution to subsurface studies by means of electrical measurements in drill holes // *Transactions of the AIME*. – 1933. – Vol. 110 (1). – P. 273–289.
- Segesman F.** New SP correction charts // *Geophysics*. – 1962. – Vol. 27 (6). – P. 815–828, doi: 10.1190/1.1439106.
- Sen P.N.** Unified model of conductivity and membrane potential of porous media // *Physical Review B*. – 1989. – Vol. 39 (13). – P. 9508–9517, doi: 10.1103/PhysRevB.39.9508.
- Sill W.R.** Self-potential modeling from primary flows // *Geophysics*. – 1983. – Vol. 48 (1). – P. 76–86, doi: 10.1190/1.1441409.
- Stoll J., Bigalke J., Grabner E.W.** Electrochemical modelling of self-potential anomalies // *Surveys in Geophysics*. – 1995. – Vol. 16. – P. 107–120, doi: 10.1007/BF00682715.
- Woodruff W.F., Revil A., Jardani A., Nummedal D., Cumella S.** Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 183 (2). – P. 748–764, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04770.x.
- Zhang G.J., Wang G.L.** A new approach to SP computation – vector potential approach // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 37 (4). – P. 2092–2098.

REFERENCES

- Arora T., Linde N., Revil A., Castermant J.** Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2007. – Vol. 92 (3–4). – P. 274–292, doi: 10.1016/j.jconhyd.2007.01.018.
- 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, doi: 10.1190/geo2019-0632.1.
- Dakhnov V.N.** Field geophysics. Methods of field geophysics, apparatus and equipment, electrical methods of wells investigation [in Russian]. – Gostoptekhizdat, Moscow, 1959. – 697 p.
- Doll H.G.** The S.P.Log: Theoretical analysis and principles of interpretation // *Transactions AIME*. – 1948. – Vol. 179. – P. 146–185, doi: 10.2118/949146-G.
- Epov M., Glinskikh A., Nechaev O.** Finite-element modeling of spontaneous potential in an axisymmetric reservoir model with account of its shale content // *Geosciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Article 30, doi: 10.3390/geosciences12010030.
- Hunt C.W., Worthington M.H.** Borehole electrokinetic responses in fracture dominated hydraulically conductive zones // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – Vol. 27 (9). – P. 1315–1318, doi: 10.1029/1999GL011099.

- Kormiltsev V.V.** Electrokinetic phenomena in porous rocks [in Russian]. – UNTS of the USSR Academy of Sciences, Yekaterinburg, 1995. – 48 p.
- Kormiltsev V.V., Ratushnyak A.N.** Theoretical and experimental bases of spontaneous polarization of rocks in oil and gas wells [in Russian]. – Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, 2007. – 164 p.
- 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 // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124 (8). – P. 7918–7933, doi: 10.1029/2019JB017829.
- Maineult A., Bernabé Y., Ackerer P.** Detection of advected, reacting redox fronts from self-potential measurements // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2006. – Vol. 86 (1–2). – P. 32–52, doi: 10.1016/j.jconhyd.2006.02.007.
- McCardell W.M., Winsauer W.O., Williams M.** Origin of the electric potential observed in wells // *Petroleum Transactions, AIME*. – 1953. – Vol. 198. – P. 41–50.
- Minsley B.J., Sogade J., Morgan F.D.** Three-dimensional source inversion of self-potential data // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – Vol. 112 (B2). – Article B02202, doi: 10.1029/2006JB004262.
- Revil A.** Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1999. – Vol. 212 (2). – P. 503–522, doi: 10.1006/jcis.1998.6077.
- Revil A.** Thermodynamics of ions and water transport in porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 307 (1). – P. 254–264, doi: 10.1016/j.jcis.2006.10.074.
- Revil A., Linde N.** Chemico-electromechanical coupling in microporous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 302 (2). – P. 682–694, doi: 10.1016/j.jcis.2006.06.051.
- Revil A., Jougnot D.** Diffusion of ions in unsaturated porous materials // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 319 (1). – P. 226–235, doi: 10.1016/j.jcis.2007.10.041.
- Revil A., Linde N., Cerepi A., Jougnot D., Matthäi S., Finsterle S.** Electrokinetic coupling in unsaturated porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 313 (1). – P. 315–327, doi: 10.1016/j.jcis.2007.03.037.
- 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 (3). – P. E107–E114, doi: 10.1190/1.2890408.
- Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G.** A New contribution to subsurface studies by means of electrical measurements in drill holes // *Transactions of the AIME*. – 1933. – Vol. 110 (1). – P. 273–289.
- Segesman F.** New SP correction charts // *Geophysics*. – 1962. – Vol. 27 (6). – P. 815–828, doi: 10.1190/1.1439106.
- Sen P.N.** Unified model of conductivity and membrane potential of porous media // *Physical Review B*. – 1989. – Vol. 39 (13). – P. 9508–9517, doi: 10.1103/PhysRevB.39.9508.
- Sill W.R.** Self-potential modeling from primary flows // *Geophysics*. – 1983. – Vol. 48 (1). – P. 76–86, doi: 10.1190/1.1441409.
- Stoll J., Bigalke J., Grabner E.W.** Electrochemical modelling of self-potential anomalies // *Surveys in Geophysics*. – 1995. – Vol. 16. – P. 107–120, doi: 10.1007/BF00682715.
- Woodruff W.F., Revil A., Jardani A., Nummedal D., Cumella S.** Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 183 (2). – P. 748–764, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04770.x.

Zhang G.J., Wang G.L. A new approach to SP computation – vector potential approach // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Vol. 37 (4). – P. 2092–2098.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГЛИНСКИХ Анастасия Вячеславовна – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование данных электрокаротажа.

НЕЧАЕВ Олег Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование электромагнитных полей, решение обратных задач (методы глобальной оптимизации).

*Статья поступила в редакцию 18 ноября 2022 г.,
принята к публикации 15 декабря 2022 г.*