

УДК 622.24

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОПУТНОЙ ЖИДКОСТИ В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

© 2025 Ю. А. Дашевский^{1,2a}, И. В. Суродина^{1b}, И. Н. Ельцов^{1,3c}

¹Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН,
просп. Акад. Лаврентьева, 6, г. Новосибирск 630090, Россия,

²Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия,

³Новосибирский государственный технический университет,
просп. Карла Маркса, 20, г. Новосибирск 630073, Россия

E-mails: ^adashyuly48@mail.ru, ^bsur@ommfao1.sccc.ru, ^cinyeltsov@sscc.ru

Поступила в редакцию 24.07.2024 г.; после доработки 17.10.2025 г.;
принята к публикации 06.11.2025 г.

Рассматриваются вопросы создания математической модели и программного обеспечения для развития технологии мониторинговых наблюдений за степенью обводнения газовых и газоконденсатных скважин. Для этой цели используют кондуктометрические датчики для измерения электрофизических параметров жидкости в скважинном продукте, установленные в нижней части горизонтального трубопровода. Основной целью исследования является разработка, отладка и верификация программно-алгоритмических средств для численного моделирования сигналов кондуктометрического датчика, применяемого для определения степени минерализации попутной жидкости в газожидкостном потоке. Исследование включает в себя анализ механизмов образования электрического поля в датчике, физических принципов формирования индуцированных зарядов, а также влияния контрастности удельных электрических сопротивлений материалов датчика на измеряемые сигналы. Основным методом исследования математическое моделирование, выполненное с использованием аналитических, асимптотических и численных решений с контролируемой точностью. Для отладки программных средств использовались результаты лабораторных экспериментов с растворами различной солёности. Теоретически и экспериментально доказано, что сопротивление, измеряемое датчиком любой конструкции, изготовленным из сильно контрастных по удельному электрическому сопротивлению материалов, прямо пропорционально удельному электрическому сопротивлению жидкости, находящейся внутри датчика. Апробирование на модельных и экспериментальных данных показало эффективность разработки. Статья вносит вклад в разработку инструментов для эффективного контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин, обеспечивая оперативный мониторинг непосредственно на газовом промысле без взятия проб и последующего ресурсозатратного гидрохимического анализа.

Ключевые слова: диагностика попутной воды, кондуктометрический датчик, минерализация попутной жидкости, газожидкостный поток, численное моделирование.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2025.28.305

ВВЕДЕНИЕ

Добычные характеристики газовых и газоконденсатных скважин снижаются при появлении во время добычи воды любого типа [1, 2, 3]. Своевременное обнаружение обводнения

продукции и диагностирование типа воды (пластовая, техногенная, конденсационная) позволяет правильно планировать геологотехнические мероприятия для эффективной добычи скважинного продукта. Эволюцию представлений о способах диагностирования типа воды можно проследить в серии работ [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Под пластовой водой мы понимаем свободную воду пластов коллекторов, способную к перемещению. Она, как правило, имеет высокую степень минерализации и низкое электрическое сопротивление. Появление пластовой воды свидетельствует о поднимающемся конусе заводнения и/или латеральном продвижении фронта пластовой воды. Увеличение её количества приводит к сокращению срока службы скважины, что требует проведения специальных мероприятий. Техногенная вода — водная часть технической жидкости, введённой в пласт при бурении, эксплуатации и ремонте скважин. Диапазон электропроводности такой воды очень широк и зависит от типов технологических жидкостей. Этот фактор обводнения является полностью контролируемым. Конденсационная вода образуется в результате конденсации водяных паров, содержащихся в пластовом газе.

Как показывает опыт, геофизические полевые и скважинные исследования технически сложны, трудоёмки и дороги. Поэтому они не годятся для использования в качестве оперативных методов контроля. Гидрохимический контроль также не всегда применим и влечёт значительные трудовые и материальные затраты. Различные аспекты применения геофизических и геохимических методов исследований рассматриваются в следующих публикациях [10, 11, 12, 13, 14, 15].

В последние годы была разработана и проверена в производственных условиях новая технология контроля обводнённости газовых и газоконденсатных скважин. Она основана на непрерывном мониторинге удельного электрического сопротивления и температуры попутной жидкости, измеряемых в потоке газа, поступающего на газовый промысел непосредственно на наземном оборудовании [16].

Основной трудностью при измерении электрического сопротивления в газожидкостном потоке является очень низкая концентрация жидкости (менее 100 мл/м³), поскольку в штатном режиме работы из скважины поступает практически сухой газ [17, 18]. Был найден способ концентрирования жидкости в специальном углублении, где располагаются измерительные электроды [19].

Разработанная технология научно обоснована и экспериментально опробована, однако её внедрение сдерживается отсутствием математической модели и цифрового двойника кондуктометрического датчика.

Целью данного исследования является разработка математической модели устройства для измерения степени минерализации попутной жидкости в газожидкостном потоке для выявления природы попутной воды, а также создание программно-алгоритмических средств для численного моделирования.

Использованный в эксперименте датчик и вспомогательное оборудование для него имеют ряд технических особенностей. В состав комплекта для мониторинга входят блок питания, ноутбук с программным обеспечением для записи данных и датчики температуры и электрического сопротивления. Датчик сопротивлений подключается к газовой трубе с предельным давлением 16 (160) Мпа (кг/см²), который работает в диапазоне температур от -4 до +50°C и измеряет сопротивление от 10 до 10000 Ом · м с погрешностью ±0.5%. Допустимый диапазон измеряемых минерализаций 0,1–300 г/л, абсолютная погрешность измерения температуры ± 0.5°C.

Датчик сопротивления диаметром 26 мм включает в себя два электрода, отстоящих друг от друга на 9 мм, и ячейку, в которой накапливается измеряемая жидкость. Диаметр и длина электродов равны 0.5 мм и 5 мм, соответственно. Конструкция ячейки такова, что толщина слоя жидкости над электродами превышает 10 мм. Подробное описание конструкции приведено в [19].

Действие датчика основано на физическом принципе, который учитывает зависящую от удельного электрического сопротивления жидкости степень минерализации раствора и его температуру в момент измерения. Этот процесс однозначно связан с измеряемым межэлектродным электрическим сопротивлением, которое определяется как отношение разности потенциалов электродов к величине тока в цепи.

В работе решается актуальная научная задача, обусловленная необходимостью оперативного контроля за обводнением скважин путём создания цифрового двойника датчика, позволяющего оптимизировать его конструкцию и чувствительность к измеряемым параметрам.

1. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При решении задачи исследовался механизм образования стационарного электрического поля в датчике, основанный на физическом принципе формирования объёмных и поверхностных индуцированных зарядов. Был выполнен анализ интегральных уравнений, описывающих поведение этих зарядов в проводящей среде и установлена степень влияния контрастности удельных сопротивлений конструкционных материалов датчика на измеряемые сигналы.

В качестве основного метода исследования было выбрано математическое моделирование, опирающееся на аналитические [20, 21], асимптотические [22], а также численные решения с контролируемой точностью двумерных и трёхмерных краевых задач стационарной геоэлектрики. В работе были задействованы интегрирование быстро осциллирующих функций с переносом пути интегрирования в комплексную плоскость [23], нелинейная минимизация и вычисление статистических характеристик [24, 25]. Для отладки программных средств использовались результаты лабораторных экспериментов с растворами различной солёности.

Многочисленные эксперименты, выполненные с датчиком в лаборатории, выявили отсутствие частотной зависимости сигнала в диапазоне частот менее 1000 Гц. Поэтому, вычислительная схема строилась на основе уравнения Лапласа.

Механизм образования стационарного электрического поля в датчике основан на законе Кулона, который, как известно [26], действует и в том случае, когда постоянный ток распространяется в трехмерно неоднородной проводящей среде. Исходя из закона Ома, объединяющего вектор плотности тока \mathbf{j} , электрическое поле \mathbf{E} и удельную электрическую проводимость γ , имеем $\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$. Поскольку $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$, то можно записать следующую цепочку равенств:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = \operatorname{div} \gamma \mathbf{E} = \gamma \operatorname{div} \mathbf{E} + \mathbf{E} \cdot \operatorname{grad} \gamma = 0 \quad (1)$$

В точках неоднородной проводящей среды, где $\mathbf{E} \cdot \operatorname{grad} \gamma \neq 0$, появляется объёмный индуцированный заряд с плотностью δ :

$$\delta = \operatorname{div} \mathbf{E} = -\frac{\mathbf{E} \cdot \operatorname{grad} \gamma}{\gamma} \quad (2)$$

Если в проводящей среде присутствует разрыв значения электропроводности, то в каждой точке P такой границы раздела электрических свойств возникает поверхностный заряд $\sigma(P)$:

$$\sigma(P) = 2\kappa_{12} \cdot E_n^{\text{aver}}(P) \quad (3)$$

Здесь $\kappa_{12} = (\gamma_1 - \gamma_2)/(\gamma_1 + \gamma_2)$ — так называемый коэффициент контрастности, удовлетворяющий очевидному условию: $|\kappa_{12}| \leq 1$; γ_1, γ_2 — электропроводность по разные стороны границы; $E_n^{\text{aver}}(P)$ — среднее из значений нормальной к границе компоненты электрического поля, взятых по обе стороны границы. Предполагается, что нормаль к границе направлена из среды (1) в среду (2).

Объёмные и поверхностные заряды, возникающие в неоднородной проводящей среде, подчиняются закону Кулона и служат источником электрического поля и соответствующих токов

в проводящей среде. Физический механизм образования стационарного электрического поля в проводящей среде подробно рассмотрен в работах [21, 26, 27, 28]. Для описания поведения индуцированных в проводящей среде зарядов необходимо построить и решить соответствующие интегральные уравнения [29].

Пусть такие уравнения построены, их решения получены и распределение плотности поверхностного заряда известно на всех границах раздела. Тогда для того, чтобы получить значение потенциала в заданной точке среды, необходимо, используя закон Кулона, проинтегрировать вклад зарядов, расположенных на границах.

Таким образом, потенциал ϕ_{charges} всех индуцированных зарядов в некоторой точке R_0 среды может быть представлен в следующем виде:

$$\phi_{\text{charges}}(R_0) = \int_{S_1} \sigma_1(S_1) \hat{G}(S_1, R_0) dS + \dots + \int_{S_\kappa} \sigma_\kappa(S_\kappa) \hat{G}(S_\kappa, R_0) dS + \int_{S_N} \sigma_N(S_N) \hat{G}(S_N, R_0) dS. \quad (4)$$

Здесь N — общее количество границ раздела электрических свойств; κ — порядковый номер границы раздела электрических свойств ($\kappa = 1, \dots, N$); $\sigma_\kappa(S_\kappa)$ — распределение плотности заряда на границе с номером κ ; $\hat{G}(S_\kappa, R_0)$ — функция Грина задачи (потенциал в точке R_0 , создаваемый точечными источниками с единичным зарядом, расположенными на границе с номером κ).

Для полного решения краевой задачи моделирования распределения электрического поля в среде к потенциалу ϕ_{charges} индуцированных зарядов следует добавить потенциал первичного поля (электрода с током).

Применим соотношение (4) для анализа свойств электрических сигналов в модели. Как следует из представленных данных, в области пространства, занятой ячейкой, выделяются три типа границ раздела сред с разными электрическими свойствами: «жидкость — металл», «жидкость — изолятор», «изолятор — металл». В качестве изолятора выступает воздух или материал, непроводящий электрический ток.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие особенности формирования электрического поля в датчике.

— На всех границах раздела электрических свойств соответствующие коэффициенты контрастности равны единице по абсолютной величине. В функцию Грина $\hat{G}(S_\kappa, R_0)$ электрические свойства среды не входят.

— Среднее электрическое поле $E_n^{\text{aver}}(P)$ прямо пропорционально первичному полю электрода с током I , а следовательно, и удельному сопротивлению ρ_0 , поскольку в однородной среде потенциал ϕ_0 на расстоянии R от электрода выражается следующим образом:

$$\phi_0 = \rho_0 I / 4\pi R. \quad (5)$$

Сформулированные выше свойства приводят к следующим выводам.

— Сопротивление \mathbf{R} между электродами A и B двухэлектродного датчика, изготовленного из сильно контрастных по удельному электрическому сопротивлению материалов, прямо пропорционально удельному электрическому сопротивлению ρ жидкости, находящейся внутри датчика: $\mathbf{R} = K \cdot \rho$, где K — постоянный коэффициент, отражающий конструктивные особенности датчика сопротивлений.

— При практическом определении величины \mathbf{R} , измеренный сигнал линейно зависит от удельного сопротивления ρ жидкости: $\mathbf{R} = K \cdot \rho + B$. Поскольку с уменьшением величины ρ значение \mathbf{R} монотонно убывает, величина константы B позволяет судить о погрешностях эксперимента. При математическом моделировании речь идёт о погрешностях вычислений.

— Выводы 1, 2 допускают обобщение на любые конструкции ячеек, изготовленные из сильно контрастных по электрическим свойствам материалов, и на любые виды многоэлектродных измерений при помощи этих конструкций.

Для модели датчика, принятой при разработке средств математического моделирования, сформулирована краевая задача для электрического потенциала и разработаны программно-алгоритмические средства моделирования значений электрического сопротивления \mathbf{R} , измеряемого между электродами A и B .

Входными параметрами программного продукта, помимо конструктивных параметров ячейки, служат удельное электрическое сопротивление и высота столба жидкости, находящаяся в ячейке. Выходным расчётным параметром программы моделирования выступает соответствующая введённым данным величина \mathbf{R} .

В современной научной литературе имеется такое понятие как вычислительный электромагнетизм [30]. Арсенал применяемых методов расчёта электрических и магнитных полей значителен [31, 32, 33]. В нашей работе краевая задача для электрического потенциала от двух электродов сводится к моделированию потенциалов двух точечных источников постоянного тока в среде с заданным распределением электропроводности $\gamma(x, y, z) = 1/\rho(x, y, z)$.

В декартовой системе координат уравнение для потенциала примет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \Phi^a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \Phi^a}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial \Phi^a}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((\gamma_0 - \gamma) \frac{\partial \Phi^0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\gamma_0 - \gamma) \frac{\partial \Phi^0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\gamma_0 - \gamma) \frac{\partial \Phi^0}{\partial z} \right), \quad (6)$$

где $\Phi = \Phi^0 + \Phi^a$, Φ^0 определён формулой (5), Φ^a — аномальный потенциал, Φ — полный потенциал электрического поля, I — сила тока, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ — расстояние от источника, γ_0 — удельная электрическая проводимость металла (электрода).

Как следует из формулы (5), при удалении от источника потенциал затухает как $1/R$, поэтому вдали от источников ($x = \pm X, y = \pm Y, z = \pm Z$) для функции Φ^a справедливы предельные значения:

$$\Phi^a|_{x=\pm X} = 0, \quad \Phi^a|_{y=\pm Y} = 0, \quad \Phi^a|_{z=\pm Z} = 0. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) определяют задачу Дирихле для одного точечного источника.

Для дискретизации данной задачи используем консервативную разностную схему [18]. Полученную систему линейных алгебраических уравнений приводим к симметричному виду с помощью диагонального преобразования подобия

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (8)$$

Матрица \mathbf{A} в уравнении (8) является симметричной, сильно разреженной, действительной, положительно определённой. Для быстрого решения системы (8) была использована видеокарта K40. Специально для графических процессоров ранее был разработан алгоритм метода сопряжённых градиентов со встроенным параллельным предобуславливателем, основанным на аппроксимации обратной матрицы. Алгоритм достигает полного параллелизма за счёт того, что используются только матрично-векторные операции и вектор-векторные операции (скалярное произведение, сложение векторов), которые есть в стандартной библиотеке CUBLAS. Кроме того, в реализации метода не требуется отдельно вычислять и хранить саму предобуславливающую матрицу — важен лишь результат воздействия этой матрицы на вектор. Масштабирование матрицы (приведение исходной матрицы к матрице с единичными диагональными элементами) также значительно снижает количество операций на каждом шаге итерационного процесса и требуемой памяти для хранения самой матрицы. Все совокупные факторы позволили получить очень эффективный и быстрый алгоритм решения поставленной краевой задачи. Подробно этот подход изложен и обоснован в работах [34, 35]. После решения двух краевых задач вычисляется разность потенциалов между электродами A и B и рассчитывается кажущееся сопротивление.

Потенциалы на электродах при переносе точечного источника поля из одного электрода в другой должны совпадать в силу симметрии датчика относительно продольной оси. На этом свойстве потенциала основан встроенный в программу блок контроля, постоянно задействованный при её работе.

Тестирование и отладка программы моделирования сигналов датчика проходили в три этапа.

Этап 1. Проверка принципа взаимности. Одним из возможных методов тестирования программ моделирования электромагнитных полей служит проверка выполнения так называемого принципа взаимности. В нашей задаче принцип взаимности проявляется в неизменности значения потенциала при смене положений источника и приёмника поля. Обсуждаемые здесь аспекты касаются источника и приёмника в контексте математической модели и не имеет отношения к самому датчику.

Серия вычислительных экспериментов показала, что значения потенциала остаются неизменными с вычислительной погрешностью в 1–2 %. Такая точность является достаточной для численного решения поставленной задачи моделирования. Расчёты проведены на видеокарте K40 кластера НКС30Т+GPU ССКЦ СО РАН.

Этап 2. Сравнение с аналитическим решением. В качестве тестовой рассматривалась допускающая аналитическое решение задача о поле источника тока на поверхности проводящего слоя, лежащего на изоляторе. На этом этапе корректировалась расчётная неравномерная сетка: подбирались размеры расчётной области, выполнялось уплотнение вблизи электродов. Установлено, что применённые сеточные алгоритмы позволяют вычислять потенциал, совпадающий с тестовыми значениями с абсолютной погрешностью 1–2 %.

Этап 3. Сравнение с результатами лабораторного эксперимента. На рис. 1 приведены результаты сравнения модельных сигналов R_{mod} и сигналов R_{exp} , полученных экспериментально для нескольких значений солёности жидкости, находящейся в датчике.

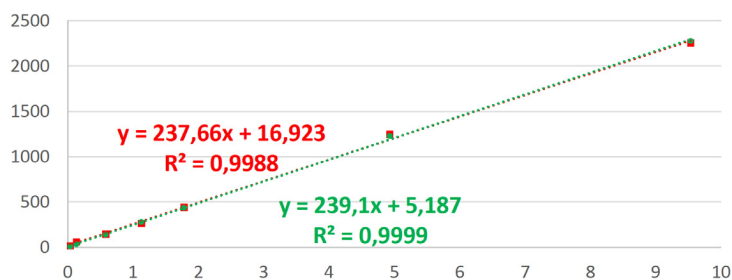


Рис. 1. Зависимость модельных R_{mod} (зелёный цвет) и экспериментальных R_{exp} (красный цвет) сигналов от удельного сопротивления жидкости в ячейке

Полученные данные обрабатывались в стандартном пакете Excel. Как следует из данных (см. рис. 1), качество линейной аппроксимации модельных сигналов функцией $y = ax + b$ ($R^2 = 0,9999$) лишь незначительно отличается от соответствующего параметра для сигналов экспериментальных ($R^2 = 0,9988$).

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведённого исследования создана математическая модель поточного измерителя сопротивлений газожидкостной смеси и разработан цифровой двойник сложного в электрофизическом смысле устройства.

Основываясь на физическом механизме формирования стационарного электрического поля в кондуктометрическом датчике и анализе соответствующих интегральных уравнений, описывающих поведение электрического поля в устройстве, доказано теоретически, что электрическое сопротивление, измеряемое датчиком любой конструкции, изготовленным из сильно контрастных по удельному электрическому сопротивлению материалов, прямо пропорционально удельному электрическому сопротивлению жидкости, находящейся внутри датчика.

Полученный результат был подтверждён с помощью верифицированных программно-алгоритмических средств двумерного и трёхмерного моделирования значений электрического сопротивления, измеряемого двухэлектродным датчиком, а его достоверность закреплена дополнительно с помощью лабораторных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из изучения механизма формирования стационарного электрического поля в датчике, анализа физических принципов формирования объёмных и поверхностных индуцированных зарядов, а также учёта влияния контрастности удельных сопротивлений конструкционных материалов датчика на измеряемые сигналы, был разработан и верифицирован комплекс программно-алгоритмических средств для численного моделирования сигналов кондуктометрического датчика. Устройство применяется в промышленности для измерения степени минерализации попутной жидкости в газожидкостном потоке и определения типа попутной воды.

Успешное тестирование разработанного программного продукта на модельных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о создании адекватной математической модели и эффективного инструментария для численного моделирования сигналов, регистрируемых датчиком с целью определения минерализации жидкости, выносимой с потоком газа, которые имеют практическую значимость.

Созданный инструментарий создаст устойчивые предпосылки для калибровки, тестирования и создания метрологического обеспечения. Цифровой двойник позволит исследовать чувствительность устройства к измеряемым параметрам, проводить сценарные расчёты для применения технологии на новых газовых промыслах, характеризующихся существенно различными параметрами газожидкостной смеси и режимами работ скважин. С использованием цифрового двойника упрощается процесс оптимизации конструктивных элементов устройства и их интеграция в соответствующие технологические цепочки.

Ряд вопросов, касающихся работы датчика, к настоящему времени не решён. Отсутствуют научно обоснованные и технически реализованные оценки степени влияния механических примесей на показания кондуктометрического датчика. Эти примеси, представляющие собой частицы шлама и твёрдой фазы технологических растворов, практически всегда выносимые с жидкостью, не проводят электрический ток. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется научное обоснование количественной оценки влияния механических примесей на сигнал датчика и разработка метода исключения влияния механических примесей на показания датчика.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена рамках гос. задания «Математические модели, численные методы, суперкомпьютерное математическое моделирование и информационно-вычислительные технологии в задачах математической и прикладной геофизики при исследовании и мониторинге природной среды, процессов и опасных явлений» (проект FWNM-2025-0004). Других источников финансирования проведения или руководства данным конкретным исследованием не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гасумов Р.А., Минликаев В.З. Техника и технология ремонта скважин. Т. 1. М.: ООО «Газпром экспо», 2013.
2. Ли Дж., Никенс Г., Уэллс М. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин. Технологические решения по удалению жидкости из скважин. М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2008.
3. Научноисследовательский институт природных газов и газовых технологий (ООО «ВНИИГАЗ»). СТО Газпром 6-2005. Методическое руководство по определению компонентного состава природных и сточных вод на объектах газовой промышленности. **Город: Издательство**, 2005.
4. Abdou M.K. et al. Finding Value in Formation Water // Oilfield Review Spring. 2011. V. 23, N 1. P. 24–35.
5. Francisca F., Yun T.-S., Ruppel C., Santamarina J. C. Geophysical and geotechnical properties of near-seafloor sediments in the northern Gulf of Mexico gas hydrate province // Earth Planet Sci. Lett. 2005. V. 237, Iss. 3–4. P. 924–939; DOI: 10.1016/j.epsl.2005.06.050
6. Раупов И. Р., Касымов М. Подбор геолого-технических мероприятий для борьбы с обводнением газовых скважин // Бурение и нефть. 2023. Т. 1. С. 103.
7. Тупышев М.К. Влияние техногенных процессов на содержание воды в продукции газовых скважин // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Т. 1, Вып. 28. С. 1–5.
8. Subhashini S., Karthi S. Study of Identifying Liquid Loading in Gas Wells and Deliquification Techniques // Internat. J. Engrg. Research & Technology (IJERT). 2019. V. 8, Iss. 6. P. 1434–1445.
9. Харитонов А.Н. Проблемы эксплуатации газовых скважин зрелых месторождений Западной Сибири и пути их решения // Нефтяная провинция. 2021. Т. 4, Вып. 28. С. 155–185; DOI:10.25689/NP.2021.4.155-185
10. Пермяков В.С. и др. Оптимизация схемы гидрохимического контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 3. С. 201–208.
11. Манзырев Д.В., Пермяков В.С. Способ диагностики попутных вод газоконденсатных скважин по данным их анализа электрохимическими методами, **2711024, 14 января 2020 г.**
12. Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water (Correspondence) // IEEE Trans Microw Theory Tech. V. 19, Iss. 8. P. 733–736; DOI:10.1109/TMTT.1971.1127617
13. Judakova Z., Janousek L., Carnecka L., Svantnerova I. Conductometry as an evaluation tool in research into the impact of low-frequency electromagnetic field irradiation on cells // 23rd International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Zuberec, Slovakia. 2022. P. 1–4.
14. Федота К.В., Вавилова Г.В., Леонов А.Е. Отличие градуировочных зависимостей при реализации кондуктометрического метода, в Интеграция науки, образования и производства - основа реализации Плана нации // Сагиновские чтения № 14. Труды Межд. научно-практ. online конф. Ч. 1., Караганда: Карагандинский гос. техн. университет (КарГТУ). 2022. С. 478–480.
15. Xiaoping S., Spitzer P., Sudmeier U. Novel method for bulk resistance evaluation in conductivity measurement for high-purity water // Accreditation and Quality Assurance. 2007. V. 12, Iss. 7. P. 351–355; DOI:10.1007/s00769-007-0258-5
16. Пермяков В.С., Манштейн А.К., Ельцов И.Н., Юркевич Н.В. Контроль за обводнением газовых скважин по удельной электрической проводимости жидкой фазы водогазового потока // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. Т. 5, Вып. 341. С. 52–57.
17. Кагиров А.Г., Романенко С.В., Дошинский Я.Н. Отклик тока двухэлектродного кондуктометрического датчика на импульсное воздействие напряжения // Контроль. Диагностика. 2012. Вып. 13. С. 8–11.
18. Wu Y.C. et al. A dc method for the absolute determination of conductivities of the primary standard KCl solutions from 0-degrees-C to 50-degrees-C // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1994. V. 99, Iss. 3. P. 241–246; DOI:10.6028/jres.099.019
19. Manstein A.K., Sokolov P.A. Method for measuring the mineralization of aqueous solutions in pipeline flows // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023. V. 1. P. 4–12; DOI:10.18303/2619-1563-2023-1-4

20. Константинов О.В., Бугров В.Е., Колесникова А.Л. Лекции по классической электродинамике. Учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2021.
21. Kaufman A.A., Dashevsky Y.A. Principles of Induction Logging. Elsevier Science, 2003.
22. Грибанов А.Н., Курушин А.А., Кузнецов И.А. Асимптотические методы электродинамики. Солон-пресс, 2020.
23. Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В., Федосеев А.А. Математическое моделирование сигналов импульсного электромагнитного зондирования для мониторинга состояния многолетне-мерзлых пород // Геология и геофизика. 2022. С. 1–9; DOI:10.15372/GiG2022132
24. Агекян Т. А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. М.: Наука, 1972.
25. Нильсен Э. Практический анализ временных рядов: прогнозирование со статистикой и машинное обучение. СПб.: ООО «Диалектика», 2021.
26. Альпин Л.М. Теория поля. М.: Недра, 1966.
27. Kaufman A.A., Itskovich G.B. Basic Principles of Induction Logging. Elsevier, 2017.
28. Kaufman A.A., Donadille J.M. Principles of Dielectric Logging Theory. Elsevier, 2021.
29. Дашевский Ю.А. Математическое моделирование и численный анализ новых возможностей стационарной геоэлектрики, Автореф. дис. ... д.ф.-м.н., Новосибирск, 2001.
30. Bossavit A. Computational electromagnetism: variational formulation, complementarity, edge Elements. San Diego, CA: Academic Press Inc., 1998.
31. Shurina E.P. et al. Determination of thermal, stiffness and electrical effective tensors in composite media // J. Comput. Appl. Math. 2022. V. 409. P. 114009; DOI:10.1016/j.cam.2021.114009
32. Shurina E.P., Itkina N.B., Markov S.I. A discontinuous Galerkin method for mathematical simulating of gas-liquid mixture flows // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1615, Iss. 1. P. 012009; DOI:10.1088/1742-6596/1615/1/012009
33. Добролюбова Д.В., Шурина Э.П. Application of a modified variational formulation of the vector finite element method for modelling a harmonic electric field in areas with curved shields // Вычисл. технологии. 2021. Вып. 3. С. 26–41; DOI:10.25743/ICT.2021.26.3.003
34. Суродина И.В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графиче-ских процессорах // Математические заметки СВФУ. 2015. Т. 22, Вып. 2. С. 51–61.
35. Labutin I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Comput. (Interval Computations) J. 2013. V. 19.

UDC 622.24

**THEORETICAL ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION
OF CONDUCTOMETRIC SENSOR SIGNALS FOR ESTIMATION
OF ASSOCIATED FLUID MINERALIZATION IN A GAS WELL**© 2025 Yu. A. Dashevsky^{1,2a}, I. V. Surodina^{1b}, I. N. Eltsov^{1,3c}¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
prosp. Akad. Lavrentieva, 6, Novosibirsk 630090, Russia,*²*Novosibirsk State University,
ul. Pirogova, 1, Novosibirsk 630090, Russia,*³*Novosibirsk State Technical University,
prosp. Karla Marksa, 20, Novosibirsk 630073, Russia*E-mails: ^adashyuly48@mail.ru, ^bsur@ommfao1.sccc.ru, ^cinyeltsov@sscc.ru

Received 24.07.2024, revised 17.10.2025, accepted 06.11.2025

Abstract. The article is devoted to the creation of a mathematical model and software for the development of technology for monitoring observations of the degree of watering of wells producing gas and gas condensate. For this purpose, conductometric sensors are used to measure electrophysical parameters of fluid in the well product, installed in the lower part of the horizontal pipeline. The main purpose of the study is the development, debugging and verification of software and algorithmic tools for numerical simulation of signals of conductometric sensor used to determine the degree of mineralization of associated fluid in the gas-liquid flow. The study includes analysis of the mechanisms of electric field formation in the sensor, physical principles of induced charge formation, as well as the influence of contrast of specific electrical resistances of the sensor materials on the measured signals. The main method of research is mathematical modeling performed using analytical, asymptotic and numerical solutions with controlled accuracy. The work involved integration of rapidly oscillating functions with transfer of the integration path to the complex plane, nonlinear minimization, calculation of statistical characteristics, parallel fast algorithms for solving the system of linear algebraic equations on graphic processors. The results of laboratory experiments with solutions of different salinity were used to debug the software tools. As a result, a mathematical model of an in-line gas-liquid mixture electrical resistance meter was created, and verified software-algorithmic means of two-dimensional and three-dimensional modeling of electrical resistance values measured by a two-electrode sensor were developed. It has been theoretically and experimentally proved that the resistance measured by a sensor of any design made of materials of strongly contrasting specific electrical resistance is directly proportional to the specific electrical resistance of the liquid inside the sensor. Validation on model and experimental data has shown the effectiveness of the development. The article contributes to the development of tools for effective control of watering of gas and gas condensate wells, providing operational monitoring directly at the gas field without sampling and subsequent resource-consuming hydrochemical analysis.

Keywords: associated water diagnostics, conductometric sensor, associated fluid mineralization, gas-liquid flow, numerical simulation.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2025.28.305

REFERENCES

1. Gasumov R.A., Minlikaev V.Z. Tekhnika i tekhnologiya remonta skvazhin [Well repair equipment and technology]. Moscow: OOO «Gazprom ekspoz» Publ., Vol. 1, 2013.
2. Li Dzh., Nikens G., Uells M. Eksploatatsiya obvodnyayushchikhsya gazovykh skvazhin. Tekhnologicheskie resheniya po udaleniyu zhidkosti iz skvazhin [Operation of watered gas wells. Technological solutions for liquid removal from wells]. Moscow: Premium Inzhiniring Publ. [Premium Engineering Publ.], 2008 (in Russian).
3. Nauchnoissledovatel'skii institut prirodnkh gazov i gazovykh tekhnologii (OOO «VNIIGAZ»). STO Gazprom 6-2005. Metodicheskoe rukovodstvo po opredeleniyu komponentnogo sostava prirodnkh i stochnykh vod na ob"ektakh gazovoi promyshlennosti [Methodological guidelines for determining the component composition of natural and wastewater at gas industry facilities]. Moscow: OAO «Gazprom» Publ., 2005 (in Russian).
4. Abdou M.K. et al. Finding Value in Formation Water. *Oilfield Review Spring*, 2011, Vol. 23, No. 1, pp. 24–35.
5. Francisca F., Yun T.-S., Ruppel C., Santamarina J.C. Geophysical and geotechnical properties of near-seafloor sediments in the northern Gulf of Mexico gas hydrate province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, Vol. 237, Iss. 3–4, pp. 924–939; DOI: 10.1016/j.epsl.2005.06.050
6. Raupov I.R., Kasymov M. Podbor geologo-tekhnicheskikh meropriyatii dlya bor'by s obvodneniem gazovykh skvazhin [Selection of geological and technical measures to combat water encroachment of gas wells]. *Burenie i neft'* [Drilling and oil], 2023, Vol. 1, pp. 103 (in Russian).
7. Tupysev M.K. Vliyanie tekhnogennykh protsessov na sodержanie vody v produktsii gazovykh skvazhin [The influence of technogenic processes on the water content in gas well products]. *Aktual'nye problemy nefti i gaza* [Current problems of oil and natural gas], 2020, Vol. 1, Iss. 28, pp. 1–5 (in Russian).
8. Subhashini S., Karthi S. Study of Identifying Liquid Loading in Gas Wells and Deliquification Techniques. *Internat. J. Engrg. Research & Technology (IJERT)*, 2019, Vol. 8, Iss. 6, pp. 1434–1445.
9. Kharitonov A.N. Problemy eksploatatsii gazovykh skvazhin zrelykh mestorozhdenii Zapadnoi Sibiri i puti ikh resheniya [Problems of operating gas wells in mature fields of Western Siberia under conditions of active water and sand production and ways to solve them]. *Neftyanaya provintsia* [Oil Province], 2021, Vol. 4, Iss. 28, pp. 155–185; DOI:10.25689/NP.2021.4.155-185 (in Russian).
10. Permyakov V.S. et al. Optimizatsiya skhemy gidrokhimicheskogo kontrolya za obvodneniem gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin [Optimization of the scheme of hydrochemical control over the refrigeration of gas and gas-condensate wells]. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2019, Vol. 3, pp. 201–208 (in Russian).
11. Manzyrev D.V., El'tsov I.N., Men'shikov S.N., Arkhipov Yu.A., Kharitonov A.N., Edelev A.V., Permyakov V.S. Sposob diagnostiki poputnykh vod gazokondensatnykh skvazhin po dannym ikh analiza elektrokhimicheskimi metodami [A method for diagnosing associated waters from gas condensate wells based on their analysis using electrochemical methods]. The patent RU 2711024, 14.01.2020 (in Russian).
12. Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water (Correspondence). *IEEE Trans Microw Theory Tech.*, Vol. 19, Iss. 8, pp. 733–736; DOI:10.1109/TMTT.1971.1127617
13. Judakova Z., Janousek L., Carnecka L., Svantnerova I. Conductometry as an evaluation tool in research into the impact of low-frequency electromagnetic field irradiation on cells. 23rd International Conf. on Comput. Problems of Electrical Engrg. (CPEE), Zuberec, Slovakia, 2022, pp. 1–4.
14. Fedota K.V., Vavilova G.V., Leonov A.E. Otliche graduirovocnykh zavisimostej pri realizacii konduktometricheskogo metoda [Difference of graduation dependences at implementation of conductometric method]. *Saginovskie chteniya, No. 14, Trudy Mezhdunarodnoj Nauchno-Prakticheskoy Onlain Konferencii*, [Saginovsky readings, No. 14, Proceedings of the international scientific and practical online conference], June 16-17, 2022, Karaganda], Karaganda, 2022, Part 1, pp. 478–480 (in Russian).
15. Xiaoping S., Spitzer P., Sudmeier U. Novel method for bulk resistance evaluation in conductivity measurement for high-purity water. *Accreditation and Quality Assurance*, 2007, Vol. 12, Iss. 7, pp. 351–355; DOI:10.1007/s00769-007-0258-5

16. Permyakov V.S., Manshtein A.K., El'tsov I.N., Yurkevich N.V. Kontrol' za obvodneniem gazovykh skvazhin po udel'noi elektricheskoi provodimosti zhidkoi fazy vodogazovogo potoka [Control over watering of gas wells by the unit electrical conductivity of the liquid phase water-gas flow]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdenii* [Geology, geophysics and development of oil and gas fields], 2020, Vol. 5, Iss. 341, pp. 52–57 (in Russian).
17. Kagiroy A.G., Romanenko S.V., Doshchinskii Ya.N. Otklik toka dvukhelektrodnogo konduktometricheskogo datchika na impul'snoe vozdeistvie napryazheniya [Electric current response at two-electrode conductometric sensor to voltage pulse effect]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2012, Iss. 13, pp. 8–11 (in Russian).
18. Wu Y.C. et al. A dc method for the absolute determination of conductivities of the primary standard KCl solutions from 0-degrees-C to 50-degrees-C. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1994, Vol. 99, Iss. 3, pp. 241–246 (in Russian); DOI:10.6028/jres.099.019
19. Manstein A.K., Sokolov P.A. Method for measuring the mineralization of aqueous solutions in pipeline flows. *Russian J. Geophysical Technologies*, 2023, Vol. 1, pp. 4–12; DOI:10.18303/2619-1563-2023-1-4
20. Konstantinov O.V., Bugrov V.E., Kolesnikova A.L. Lektsii po klassicheskoi elektrodinamike [Lectures on classical electrodynamics]. Ucheb. posobie. Saint Petersburg: Universitet ITMO Publ., 2021 (in Russian).
21. Kaufman A.A., Dashevsky Y.A. Principles of Induction Logging. Elsevier Sci., 2003.
22. Gribov A.N., Kurushin A.A., Kuznetsov I.A. Asimptoticheskie metody elektrodinamiki [Asymptotic methods in electrodynamics]. Solon-press Publ., 2020 (in Russian).
23. Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mikhailov I.V., Fedoseev A.A. Mathematical modeling of transient electromagnetic sounding signals for monitoring the state of permafrost. *Russian Geology and Geophysics*, 2023, Vol. 64, No. 4, pp. 488–494; doi:10.2113/RGG20224514
24. Agekyan T.A. Osnovy teorii oshibok dlya astronomov i fizikov [Fundamentals of Error Theory for Astronomers and Physicists]. Moscow: Nauka, 1972 (in Russian).
25. Nil'sen E. Prakticheskii analiz vremennykh ryadov: prognozirovaniye so statistiko i mashinnoe obucheniye [Practical Time Series Analysis: forecasting with statistics and machine learning]. Saint Petersburg: OOO «Dialektika» Publ., 2021 (in Russian).
26. Al'pin L.M. Teoriya polya [Field theory]. Moscow: Nedra, 1966 (in Russian).
27. Kaufman A.A., Itskovich G.B. Basic Principles of Induction Logging. Elsevier, 2017.
28. Kaufman A.A., Donadille J.M. Principles of Dielectric Logging Theory. Elsevier, 2021.
29. Dashevskii Yu. A. Parallelnye algoritmy dlya resheniya pryamykh zadach elektricheskogo karotazha na grafiche-skikh protsessorakh [Mathematical modeling and numerical analysis of new possibilities of stationary geoelectrics]. Abstr. of dis. ... d. ph.-m. s., Novosibirsk, 2001 (in Russian).
30. Bossavit A. Computational Electromagnetism: Variational Formulation, Complementarity, Edge Elements. San Diego, CA: Academic Press Inc., 1998.
31. Shurina E.P. et al. Determination of thermal, stiffness and electrical effective tensors in composite media. *J. Comput. Appl. Math.*, 2022, Vol. 409, pp. 114009; DOI:10.1016/j.cam.2021.114009
32. Shurina E.P., Itkina N.B., Markov S.I. A discontinuous Galerkin method for mathematical simulating of gas-liquid mixture flows. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, Vol. 1615, Iss. 1, pp. 012009; DOI:10.1088/1742-6596/1615/1/012009
33. Dobrolyubova D.V., Shurina E.P. Application of a modified variational formulation of the vector finite element method for modelling a harmonic electric field in areas with curved shields. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Comp. technol.], 2021, Iss. 3, pp. 26–41 (in Russian); DOI:10.25743/ICT.2021.26.3.003.
34. Surodina I.V. Parallelnye algoritmy dlya resheniya pryamykh zadach elektricheskogo karotazha na grafiche-skikh protsessorakh [Parallel GPU solvers for the solution of direct electriclogging problems. *Matematicheskie zametki SVFU* [NEFU Mathematical Notes], 2015. Vol. 22, Iss. 2, pp. 51–61 (in Russian).
35. Labutin I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method. *Reliable Comput. (Interval Computations) J.*, 2013, Vol. 19.