

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук М.Г. Персовой на диссертацию Никитенко Марины Николаевны «Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях электромагнитного каротажа», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Диссертационная работа М.Н. Никитенко посвящена созданию и обоснованию методов исследования околоскважинного пространства для определения электрофизических параметров горных пород. Применение новых высокоразрешающих методов каротажа обеспечивает решение усложняющихся практических задач. В разработку вовлекаются глубокопогруженные залежи углеводородов сложного геологического строения: тонкослоистые коллекторы, высокоомные карбонатные породы и битуминозные сланцы. Кроме того, все больший объем измерений каротажных сигналов проводится в горизонтальных скважинах в процессе бурения; надежная интерпретация этих данных в реальном времени необходима для оптимальной проводки (геонавигации) скважины. Разработка компьютерных программ оперативного моделирования и инверсии данных современных каротажных комплексов требуется для их широкого применения при исследованиях в нефтегазовых скважинах. Развитие и создание новых способов инверсии и комплексирования данных различных каротажных методов необходимо для увеличения их информативности и извлечения дополнительной информации об изучаемой геологической среде.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и включает 340 страниц, 124 рисунка, 26 таблиц и 305 наименований библиографии.

Во введении сформулированы цели, научные задачи, методы исследования, перечислены защищаемые научные результаты работы, указан личный вклад соискателя. Охарактеризована теоретическая и практическая значимость результатов. Все утверждения, сформулированные во введении, подтверждаются при изучении текста диссертации.

В первой главе соискатель провел достаточно полный аналитический обзор по теме диссертации и охарактеризовал изученность решения проблемы.

Во второй главе приведены полученные автором решения прямых задач, описаны созданные вычислительные алгоритмы и программы моделирования сигналов тороидального источника и смещенного с оси скважины магнитного диполя в слоистых средах, необходимые для численного моделирования сигналов новых каротажных зондов. Высокая точность и быстродействие реализованных вычислительных алгоритмов достигается путем представления решения в виде, сокращающем число вычислительных операций, использования необходимой нормировки, применения схем эффективного интегрирования и суммирования. Это детально показано на примере решения задачи для смещенного источника в цилиндрически-слоистой среде. Обоснованы оптимальные конфигурации новых зондов для изучения анизотропных свойств сложно построенных коллекторов на основе моделирования электромагнитных сигналов. Учет анизотропии необходим для правильной оценки коэффициента нефтенасыщения. Рассмотрены базовые зависимости измеряемых сигналов в простых средах от удельного электросопротивления, коэффициента анизотропии, диэлектрической проницаемости, глубины вдоль скважины при пересечении границ пласта, позволившие установить рабочие частоты и длины зондов для определения указанных параметров. Помимо этого, создан комплекс программ численного моделирования электромагнитных сигналов современных каротажных комплексов в радиально и вертикально неоднородных моделях сред с использованием как разработанных другими авторами вычислительных модулей для расчетов магнитных полей, так и созданных непосредственно автором. Данный комплекс служит основой оперативной инверсии и анализа разрешающей способности данных, чему посвящена следующая часть работы.

В третьей главе представлен разработанный комплекс алгоритмов и программ численной инверсии каротажных данных для определения электрофизических и геометрических модельных параметров и анализа пространственного разрешения систем измерений. Инверсионная процедура является общей и применима для данных разных каротажных методов. Анализ разрешающей способности (или чувствительности сигналов к

параметрам модели) с использованием информационной матрицы наблюдений позволяет оценивать как результаты инверсии, так и возможности каротажного метода или совокупности методов при решении каких-либо задач. Реализованы разные подходы к оценке чувствительности: линейный и нелинейный, возможность учета погрешности известных параметров модели, с использованием детерминированных или случайных ошибок измерений. Создан комплекс программ для интерпретации данных в вертикальных и наклонно-горизонтальных скважинах с построением обоснованной геоэлектрической модели и определением погрешностей восстановления модельных параметров. Преимуществом разработанных алгоритмов и программ является высокая скорость, позволяющая восстанавливать электрофизические параметры в масштабе реального времени. С их использованием обоснована эффективность применения прибора каротажа в процессе бурения при геонавигации скважин, а также комплекса данных электромагнитных и электрических каротажных зондирований для определения электрической анизотропии и диэлектрической проницаемости. Приведены примеры инверсии как для синтетических, так и для практических данных с оценкой областей неопределенности параметров результирующих моделей.

В четвертой главе описаны созданные соискателем новые методы обработки и интерпретации каротажных данных. Для прибора каротажа в процессе бурения методом переходных процессов разработаны следующие подходы и алгоритмы.

1. Вычисление значений угла наклона и азимутального угла между скважиной и плоскостью границ пластов с помощью фокусировки измеренных сигналов. Знание этих значений способствуют надежной геонавигации и позволяют существенно сократить ресурсоемкость инверсии и снизить модельную эквивалентность.
2. Быстрая инверсия на основе трансформации измеренных сигналов в частотную область. Такой способ позволяет избежать многократного ресурсоемкого вычисления сигналов во временной области при решении оптимизационной задачи.
3. Сжатие данных для передачи информации «на поверхность». Предложены два способа сжатия данных, отличающиеся простотой реализации и высокой скоростью.

Все указанные методы протестированы на синтетических данных, смоделированных для реального прибора. Показана их эффективность и условия применения.

Также в этой части работы предлагается метод комплексирования данных различных каротажных методов для определения электросопротивления и коэффициента анизотропии в прискважинной зоне и для уточнения коэффициента глинистости. Радиальный профиль электросопротивления и коэффициента анизотропии в зоне проникновения могут быть использованы для оценки насыщения и коэффициента проницаемости при интерпретации данных повторных измерений электромагнитного каротажа. Коррекция коэффициента глинистости приводит к более правильной оценке продуктивности пластов-коллекторов.

Все вышеперечисленные научные результаты являются новыми и представляют несомненный теоретический и практический интерес. Высокая степень достоверности полученных результатов и надежности программно-алгоритмических средств решения прямых задач электромагнитного каротажа подтверждается всесторонним тестированием путем сравнения с аналитическими, конечно-разностными и конечно-элементными решениями.

Замечания

1. В работе все выводы основаны на результатах численного моделирования и инверсии в слоисто-однородных (одномерных) моделях сред. Однако в реальных условиях значительное влияние на сигналы могут оказывать не учтенные двух- и трехмерные неоднородности. Должным образом не обсуждаются условия применения одномерного моделирования и справедливость полученных выводов в более сложных средах. Например, на показания зондов БКЗ значительное влияние оказывает скважина и в общем случае ее нужно учитывать при инверсии данных в наклонно-горизонтальных скважинах.
2. В работе описан только один алгоритм численной инверсии каротажных данных, основанный на методе деформируемых многогранников. Стоило бы рассмотреть и другие эффективные оптимизационные методы, например, метод Гаусса-Ньютона с адаптивной регуляризацией, которые позволили бы ускорить инверсию, что особенно важно при интерпретации данных в реальном времени.
3. В работе обсуждается восстановление дисперсионных свойств горных пород. При этом предлагается оценивать параметры сопротивления и

диэлектрической проницаемости отдельно на каждой частоте. В то же время известно, что кажущаяся зависимость комплексной электропроводности от частоты связана с процессом вызванной поляризации. Почему не восстанавливать (одновременно по всем частотам) не зависящие от частоты параметры электрической проводимости, диэлектрической проницаемости, поляризуемости и параметров спада, как это принято в методах разведочной геофизики?

4. Работа не свободна от некоторых неточностей и опечаток. Например, опечатка на с. 218: «Матрица системы (4.3) умножается слева на ...». Должно быть «справа». На с. 62: «рабочие частоты от 5 до 500 МГц ...». Должно быть «кГц».

Указанные замечания не уменьшают достоинства работы в целом, не снижают ее научную и практическую ценность и не влияют на общую положительную оценку результатов исследований.

Заключение

Главными результатами диссертационной работы М.Н. Никитенко являются методы решения прямых и обратных задач, высокоточные и быстрые вычислительные алгоритмы и компьютерные программы для моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности данных методов электромагнитных зондирований, научное обоснование конфигурации новых каротажных зондов для изучения анизотропных свойств сложнопостроенных коллекторов, обоснование эффективности применения используемых на практике каротажных методов, а также новые способы интерпретации данных.

Тема диссертации актуальна, предложенные решения в достаточной степени обоснованы, верифицированы, обладают научной новизной и практической значимостью. В целом, представленная диссертация М.Н. Никитенко является завершенным научно-техническим исследованием, в котором содержатся новые обоснованные решения, имеющие большое значение для развития скважинной геофизики РФ. Результаты диссертации опубликованы в 35 научных работах, из них 18 – статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 3 научные публикации в журналах, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science, 15 научных публикаций, индексируемые в международной информационно-

аналитической системе научного цитирования Scopus. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 5 российских и зарубежных патентов. Автореферат соответствует основным идеям и выводам диссертации.

Диссертация «Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях электромагнитного каротажа» отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор, Никитенко Марина Николаевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Официальный оппонент,
профессор кафедры прикладной математики,
заведующая лабораторией моделирования и
обработки данных наукоемких технологий
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Новосибирский
государственный технический университет»,
доктор технических наук по специальности
05.13.18 – «математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Персова Марина Геннадьевна

Даю согласие на обработку персональных данных.

«24» января 2022 г.

Сведения об организации:

630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, корпус 1

Тел. +7 (383) 346-50-01;

E-mail: rector@nstu.ru; <https://www.nstu.ru/>