

*На правах рукописи*



**КИНДЮК Владимир Анатольевич**

**ОЦЕНКА КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ  
ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
КАРОТАЖА С УЧЕТОМ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЙ  
СРЕДЕ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы  
поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск  
2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

**Научный руководитель:**

**Нестерова Галина Владимировна,**

кандидат технических наук.

**Официальные оппоненты:**

**Черный Сергей Григорьевич,**

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительных технологий СО РАН;

**Макаров Александр Игоревич,**

кандидат технических наук, научный сотрудник Новосибирского технологического центра компании «Бейкер-Хьюз».

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Защита состоится 5 октября 2017 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3; факс (8-383) 330-28-07; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:  
<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/Kinduk2017>.

Автореферат разослан 3 августа 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 003.068.03, д.г.-м.н., доцент



Неведрова  
Нина Николаевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертационная работа посвящена интерпретации данных электромагнитного каротажа (ЭМК) на основе численного моделирования гидродинамических процессов, происходящих в окрестности скважины во время и после ее бурения. Интерпретация происходит как без учета геомеханических характеристик пород, так и с их учетом. Описаны способы определения геомеханических характеристик пород и предложена методика интерпретации данных ЭМК с их учетом. Учет геомеханических характеристик пород в случае изменения проницаемости околоскважинной области, вызванного перераспределением поля напряжений, позволяет точнее определить фильтрационно-емкостные свойства коллектора.

**Объектом исследования** является окружающая скважину область геологической среды, в которой происходит перераспределение поля напряжений и фильтрация бурового раствора в пласт, вызванные бурением скважины. В этой области исследуются фильтрационные и электрофизические свойства среды, изменившиеся в результате бурения.

**Актуальность работы.** С целью повышения эффективности и сокращения времени строительства скважин добывающим компаниям необходимо уменьшать временной интервал, начинающийся с остановки бурения и заканчивающийся освоением скважины. Отечественные каротажные комплексы, такие как ВИК-ПБ, позволяют во время бурения проводить каротаж, по качеству не уступающий зарубежным аналогам.

Получение данных сразу после окончания бурения позволяет ускорить процесс освоения скважины, уменьшая потерю времени на дополнительные технические и геофизические работы и, подобрав оптимальную схему заканчивания скважины, выбрать эффективный метод освоения запасов. Разработанные в ИНГГ СО РАН программные средства решения прямой и обратной задачи для данных многозондового электромагнитного каротажа позволяют провести интерпретацию данных ЭМК с использованием гидродинамической модели и определить фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) коллектора, необходимые для составления оптимальной схемы заканчивания скважины.

В стандартной схеме интерпретации каротажных данных не учитываются такие геомеханические характеристики породы, как предел прочности на сжатие, коэффициент дилатансии, упругие параметры. В околоскважинной области при бурении скважины вместе с перераспределением поля напряжений одновременно происходит фильтрация бурового раствора в проницаемые породы. Локальное

изменение напряжений влечет за собой изменение проницаемости и пористости коллектора. Этот эффект влияет на показания геофизической аппаратуры и, если не учитывать изменения ФЕС коллектора, вызванные изменением поля напряжений, то появляется большая вероятность ошибки при интерпретации данных геофизических исследований скважины (ГИС) и искажения результатов гидродинамических исследований в скважине. Все это говорит о необходимости учета геомеханических процессов в окрестности скважины для получения достоверной оценки фильтрационно-емкостных свойств коллектора в сложных геологических условиях, когда геомеханические характеристики среды влияют на результат интерпретации. Предлагаемое решение, основанное на применении единой гидродинамической и геомеханической (ЕГДиГМ) модели среды, позволяет учесть геомеханические характеристики породы и тем самым повысить достоверность определения фильтрационно-емкостных свойств коллектора.

**Цель исследования** – повышение качества и достоверности интерпретации данных электромагнитного каротажа посредством применения модели среды, учитывающей и гидродинамические, и геомеханические процессы, происходящие в окрестности скважины.

**Научная задача** – разработать методику интерпретации данных электромагнитного каротажа на основе моделирования гидродинамических процессов, с учетом данных каротажа во время бурения, изменения напряженно-деформированного состояния среды, вызванного бурением скважины, и данных, полученных в результате геомеханических экспериментов на керне.

Этапы решения задачи:

1. Анализ и обобщение имеющихся подходов к интерпретации данных геофизических исследований с учетом гидродинамических процессов.
2. Разработка методики интерпретации данных электромагнитного каротажа, полученных во время бурения скважины, на основе моделирования гидродинамических процессов в ее окрестности.
3. Определение численных значений параметров единой гидродинамической и геомеханической модели среды по данным геофизических исследований скважины, нейросетевого моделирования, данных петрофизических и геомеханических лабораторных измерений и экспериментальной зависимости проницаемости пород от эффективного напряжения.

4. Создание методики интерпретации данных электромагнитного каротажа на основе единой гидродинамической и геомеханической модели среды.

#### **Защищаемый научный результат**

Методика интерпретации данных электромагнитного каротажа на основе моделирования гидродинамических процессов с учетом данных каротажа во время бурения, изменения напряженно-деформированного состояния среды, вызванного бурением скважины, и данных, полученных в результате лабораторных геомеханических экспериментов.

#### **Научная новизна работы**

- Использование данных электромагнитного каротажа, полученных прибором каротажа во время бурения ВИК-ПБ, вместе с данными прибора каротажа на кабеле ВИКИЗ уточняет электрогидродинамическую модель пласта, что повышает качество интерпретации каротажных данных и достоверность оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта.

- Для определения геомеханических параметров единой гидродинамической и геомеханической модели разработан комплексный подход, использующий данные геофизических исследований скважины, результаты петрофизических и геомеханических измерений на керне, а также метод нейронных сетей.

- Количественно оценено влияние геомеханических параметров породы на результаты интерпретации данных электромагнитного каротажа при использовании гидродинамической модели прискважинной зоны.

#### **Личный вклад**

1. В результате анализа данных ВИК-ПБ внесены предложения по оптимизации процесса регистрации прибором данных. Предложено проводить каротажное зондирование при проработке ствола скважины на каждом этапе бурения и дублировать измерения по завершении бурения на подъеме.

2. С использованием разработанного соискателем программного обеспечения VikizGydro выполнена электрогидродинамическая инверсия данных отечественного каротажного прибора ВИК-ПБ, полученных во время бурения с четырех скважин трех месторождений России.

3. Оценены характерные соотношения горизонтальных напряжений в окрестности скважины по литературным данным для 17 месторождений земного шара. Соотношения используются при параметризации единой гидродинамической и геомеханической модели.

4. На отобранных автором коллекциях керн и при его участии проведены лабораторные измерения на уникальном оборудовании Центра коллективного пользования СО РАН. В результате экспериментально определены геомеханические характеристики образцов в условиях двухосного напряженного состояния. Результаты измерений вошли в базу данных петрофизических и геомеханических свойств пород PetroMechBD.

5. Для двух месторождений Западной Сибири (Когалымского и месторождения севера Новосибирской области) определены численные значения параметров единой гидродинамической и геомеханической модели.

6. Разработана методика оценки коллекторских свойств пород по данным электромагнитного каротажа на основе гидродинамического моделирования с учетом напряженно-деформированного состояния среды.

7. Показано увеличение точности определения фильтрационно-емкостных свойств коллектора в результате учета геомеханических свойств пород при электрогидродинамической инверсии синтетических данных электромагнитного каротажа.

#### **Достоверность полученных результатов** подтверждена

- теоретической основой – использованием классических уравнений теории фильтрации несмешивающихся флюидов в пористой среде: закона сохранения массы, уравнения переноса консервативной примеси, закона Дарси; уравнения Арчи – Дахнова; уравнениями геомеханики: закона Гука, соотношения Коши и условия Кулона – Мора;

- использованием апробированных и зарегистрированных программных средств построения численных моделей, разработанных в институтах ИНГГ и ИГД СО РАН: EMF Pro [Эпов и др., 2010] и GENM [Назаров и др., 2012];

- высоким качеством использованных практических данных;
- сопоставлением результатов
  - с лабораторными измерениями на керне,
  - с результатами стандартной интерпретации данных ГИС, выполненными сторонними геофизическими организациями (ОАО «Когалымнефтегеофизика» и ОАО «Сургутнефтегазгеофизика»).

### **Фактический материал и методы исследования**

В диссертации использованы результаты геофизических, петрофизических, геолого-технологических и геомеханических измерений, полученные компаниями «Лукойл АИК», «Сургутнефтегаз» и результаты исследования керна, проведенные в ИНГГ СО РАН и Центре коллективного пользования СО РАН. Также включены результаты исследований, проведенных в рамках интеграционных проектов СО РАН № 6 и № 60 за 2009–2011 гг. и № 89 за 2012–2014 годы.

При исследовании использована разработанная ранее в ИНГГ СО РАН методика совместной интерпретации каротажных данных ВИКИЗ и БКЗ [Власов и др., 2008; Пудова и др., 2008; Эпов и др., 2012]. Также применяются численные методы решения гидродинамических уравнений для пористой флюидонасыщенной среды [Кашеваров и др., 2003; Ельцов и др., 2004, 2005, 2009]. С целью учета геомеханических параметров добавляются отдельно решаемые уравнения: закона Гука, уравнение равновесия и критерия Кулона – Мора, описывающие геомеханическое состояние среды. При интерпретации данных электромагнитного каротажа и с целью определения петрофизических свойств коллектора применяются апробированные и зарегистрированные программные средства комплекса EMF Pro [Эпов и др., 2010], позволяющие построить численную геоэлектрическую модель среды. При настройке геомеханического блока единой гидродинамической и геомеханической модели используются деформационные и прочностные характеристики пород, определенные в результате лабораторных геомеханических экспериментов. В условиях неполного комплекса ГИС для определения деформационных характеристик пород используется метод нейронных сетей.

**Практическая значимость работы** заключается в повышении оперативности и достоверности интерпретации данных электромагнитного каротажа за счет моделирования гидродинамических процессов в окрестности скважины.

- В случае использования данных каротажа во время бурения фильтрационно-емкостные свойства коллектора определяются сразу после вскрытия пласта, что позволяет экономить время на принятие решения.

- В промысловых методах интерпретации данных ГИС не учитываются деформационные и прочностные характеристики пород. Технологические операции, связанные с процессом бурения, в зависимости от прочностных характеристик коллектора и условий его

залегания могут ухудшать фильтрационные свойства прискважинной зоны коллектора, что необходимо учитывать при интерпретации данных ГИС. Предлагаемая методика, реализованная на основе совместной геоэлектрической и гидродинамической модели среды, учитывающей геомеханические процессы, повышает достоверность определения проницаемости и нефтенасыщенности коллектора, что является важной практической задачей.

- В диссертации обоснована необходимость учета геомеханических процессов на примере интерпретации данных ГИС пластов АС<sub>7</sub> – АС<sub>8</sub>, БС<sub>11-2Б</sub>, Ю<sub>1</sub> месторождений Западной Сибири, а также на синтетических примерах, основанных на реальных свойствах образцов из базы данных PetroMechBD.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на конференциях: научно-практических конференциях по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2013» и «Геомодель 2016», Всероссийской молодежной научной конференции «Трофимукские чтения 2015»; Всероссийской конференции «Геофизические исследования в нефтегазовых скважинах – 2011» (Новосибирск); международных научных конгрессах «Гео-Сибирь – 2010, 2011, 2013, 2016»; 4-й Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Геоперспектива – 2010»; VIII Уральской молодежной научной школе по геофизике (2007).

Материалы диссертации, полученные научные результаты и выводы полностью изложены в 13 публикациях, из которых две статьи в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК («Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений» и «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых»), одно государственное свидетельство о регистрации базы данных, две публикации в рецензируемых изданиях (журнале «Oil&Gas Russia» и сборнике статей EAGE) и восемь – в сборниках тезисов и материалов конференций.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка обозначений и сокращений и списка литературы (180 наименований). Работа изложена на 157 страницах, содержит 68 рисунков, 11 таблиц.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность коллективам институтов СО РАН ИНГГ, ИГД и ИГМ, а в частности: Самойловой Валентине Илларионовне – за содержательные советы; Сухоруковой Карине Владимировне – за постоянную поддержку в процессе апробации модели; Нестеровой Галине Владимировне – за огромный вклад в организацию исследований, помощь в создании формулировок при описании результатов исследований, за необыкновенную моральную поддержку и заботу, Соболеву Андрею Юрьевичу – за лаконичные и глубокие замечания. Выражаю благодарность Голикову Никите Александровичу за содержательные советы, значительную помощь в обработке и представлении результатов, выполнении и планировании петрофизических исследований; Назарову Леониду Анатольевичу – за разъяснения сложных вопросов геомеханики и консультирование по содержанию научной работы; Усольцевой Ольге Михайловне – за помощь в обработке данных эксперимента; Пеньковскому Валентину Ивановичу и Корсаковой Надежде Константиновне – за консультирование по решению численных задач в области гидродинамического моделирования. Выражаю глубочайшую признательность научному наставнику – Игорю Николаевичу Ельцову за заботу, наставления и поддержку. Без всех этих людей данная диссертация не могла бы состояться.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Во введении определены объект, цель и задача исследования, сформулированы основные результаты, актуальность и научная новизна работы.

Структура диссертации логически разделена на два основных направления. Первое направление изложено в главе 1 и представляет собой методику интерпретации данных электромагнитного каротажа (на трубах и во время бурения) с использованием гидродинамической (ГД) модели, описывающей гидрофизические процессы, происходящие в окрестности скважины. Второе направление, представленное в главах 2 и 3, является логическим продолжением первого, в котором помимо гидродинамических процессов учитываются поле напряжений вокруг скважины и геомеханические характеристики пород. Итогом работы является методика интерпретации данных ЭМК на основе ЕГДиГМ

модели среды, описанная в главе 3. Отличие ГД и ЕГДиГМ моделей заключается в учете радиального распределения проницаемости  $K_{пр}$  для слоя коллектора. В ГД модели проницаемость постоянна для всего пласта, а в ЕГДиГМ – является функцией расстояния до стенки скважины, обе модели рассматривают одномерный случай в предположении цилиндрически-симметричной среды. В главе 2 представлен поэтапный подход для определения геомеханических свойств коллектора – параметров ЕГДиГМ модели. В главе 3 представлен процесс интерпретации данных электромагнитного каротажа с использованием ЕГДиГМ модели. На реальных данных для пластов БС<sub>11–26</sub>, Ю<sub>1</sub> и синтетических примерах показаны преимущества использования ЕГДиГМ модели при интерпретации данных электромагнитного каротажа.

## **Глава 1. Интерпретация данных электромагнитного каротажа с использованием гидродинамической модели**

В главе изложена методика интерпретации данных электромагнитного каротажа с использованием моделирования гидродинамических процессов в окрестности скважины. Показано развитие уравнений теории фильтрации, описывающих проникновение фильтрата бурового раствора в пласт, и представлены аналогичные подходы при интерпретации данных ЭМК [Semmelbeck et al., 1995; Wu et al., 2001; Alpak et al., 2003; Li et al., 2003; Navarro et al., 2007; Ярмахов, Попов, 2003; Данаев и др., 2014; Макарова, 2015]. Описан стандартный метод интерпретации данных электромагнитного каротажа, заключающийся в подборе ступенчатой геоэлектрической модели среды, необходимой для решения обратной электромагнитной задачи. Приведена постановка задачи для случая цилиндрической симметрии среды в виде системы уравнения переноса консервативной примеси и уравнений двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей (вода, нефть) без учета капиллярных и гравитационных сил. Результат решения системы в виде радиальных распределений водонасыщенности и минерализации водной фазы пересчитывается в радиальный профиль удельного электрического сопротивления (УЭС) по уравнению Арчи–Дахнова. Рассчитанные по полученному профилю УЭС сигналы зондов сравниваются с зарегистрированными в скважине сигналами зондов и, в случае расхождения, меняются входные параметры гидродинамической модели. Процесс повторяется, пока рассчитанные и зарегистрированные сигналы не совпадут с нужной точностью. Таким образом, решается

обратная задача определения величин ФЕС, для которых рассчитанные и зарегистрированные сигналы зондов максимально близки. Соответственно, интерпретация данных ЭМК на основе гидродинамической модели и состоит в оценке ФЕС пласта. В интерпретации могут использоваться данные любого каротажного многозондового электромагнитного прибора, для которого доступна математическая модель расчета сигналов зондов по радиальному профилю УЭС. Методика интерпретации данных электромагнитного каротажа на основе гидродинамической модели последовательно развивалась на базе институтов СО РАН: ИНГГ и ИГиЛ [Кашеваров и др., 2003; Эпов и др., 2004; Нестерова и др., 2008; Ельцов и др., 2011, Ельцов и др., 2014]. Соискателем осуществлен дальнейший этап развития методики интерпретации данных ЭМК, состоящий в автоматизации подбора параметров гидродинамической модели и использовании наряду с данными каротажа на кабеле данных каротажа во время бурения. По такой методике были совместно обработаны данные приборов на постоянном токе БКЗ и данные индукционного каротажа: приборов ВИКИЗ и ВИК-ПБ (модификация прибора ВИКИЗ для каротажа во время бурения).

Применение повторных измерений позволяет повысить достоверность определения ФЕС коллектора. По результатам гидродинамической инверсии нефтенасыщенность и пористость породы определяются с точностью 5 и 2 % соответственно.

## **Глава 2. Экспериментальное определение геомеханических параметров**

Для оценки величины параметров ЕГДиГМ модели проведены лабораторные эксперименты в Центре коллективного пользования «Геомеханика и геофизика» СО РАН на испытательной установке двухосного сжатия INSTRON 8802. Для экспериментов были отобраны образцы песчаника с карбонатным цементом.

В результате лабораторных измерений по схеме Кармана (двухосное нагружение цилиндрических образцов породы с регистрацией осевой и радиальной деформаций) с регистрацией запредельных характеристик образца определены численные значения параметров геомеханического блока ЕГДиГМ модели (Таблица 1).

Таблица 1 – Геомеханические характеристики пород

<i>Упругие</i>	Модуль Юнга $E$ , ГПа	23
	Коэффициент Пуассона $\nu$	0.3
	Модуль сдвига $G$ , ГПа	9.6
<i>Прочностные</i>	Угол внутреннего трения $\theta$ , град.	38.9
	Сцепление $S_0$ , МПа	24.3
	Предел прочности на сжатие $\sigma_c$ , МПа	144

При вскрытии скважиной слоев коллектора происходит перераспределение поля напряжений, в результате чего породы деформируются и в зависимости от соотношения горизонтальных  $\sigma_h$  и вертикальных  $\sigma_v$  напряжений в окрестности скважины и прочностных характеристик могут разрушаться, что приводит к изменению фильтрационных свойств коллектора. В связи с этим при интерпретации данных ЭМК на основе гидродинамической модели необходимо учитывать геомеханические процессы, что реализуется через зависимость проницаемости коллектора от величины напряжений. На основе проведенного анализа публикаций, содержащих результаты лабораторных экспериментов двухосного сжатия образцов в негидростатическом режиме, был выбран вид зависимости, с записью запредельных характеристик, регистрируемых после разрушения образца (Рисунок 1).

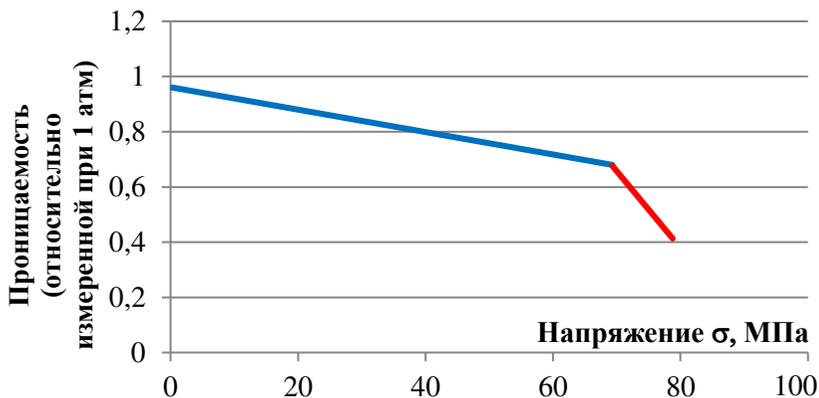


Рисунок 1 – Аппроксимация зависимости проницаемости от эффективного напряжения из статьи [Holt, 1990] двухзвенной кривой – синяя линия соответствует упругому режиму деформации, красная линия – неупругому с разрушением породы

### **Глава 3. Учет напряженного состояния среды при интерпретации каротажных данных**

В главе представлена методика интерпретации данных ЭМК на основе гидродинамической модели с учетом геомеханических факторов.

В условиях бурения вертикальных скважин в режиме репрессии с превышением давления в скважине над пластовым давлением не более чем на 5 % гидродинамические процессы в окрестности скважины вносят пренебрежимо малый вклад в величину напряжений. На основании этого предполагается, что после окончания бурения скважины поле напряжений не изменяется. Это позволяет, рассчитав поле напряжений, определить радиальное распределение проницаемости, связав, таким образом, системы уравнений, описывающие геомеханические и гидродинамические процессы, и решать дальше только гидродинамическую задачу. Определение величин геомеханических характеристик (см. таблицу 1) позволяет установить наличие области необратимой деформаций (разрушение) и область упругой деформации и затем, согласно выбранной зависимости (см. рисунок 1), рассчитать радиальное распределение проницаемости.

Процесс интерпретации состоит из последовательных этапов: первый этап – геомеханическое моделирование, второй этап – гидродинамическое моделирование и этап сравнения рассчитанных сигналов зондов (Рисунок 2). Для геомеханического блока требуются сведения об условиях залегания пород и их геомеханические характеристики, определяемые в результате лабораторных измерений. Геомеханический этап состоит в расчете поля напряжений, выбора зависимости проницаемости от эффективного напряжения. Результатом этапа является зависимость проницаемости от расстояния до стенки скважины  $g$ . Далее происходит процедура аналогичная интерпретации на основе гидродинамической модели – расчет радиальных профилей водонасыщенности  $S_w(r)$  и минерализации водной фазы  $C(r)$ , с вычислением радиального профиля УЭС  $R(r)$  по уравнению Арчи – Дахнова. Для задания параметров гидродинамической модели необходим набор физических и петрофизических параметров пород и жидкостей. Рассчитанный профиль УЭС служит основой для расчета сигналов зондов, которые затем сравниваются с сигналами, зарегистрированными в скважине. Меняя входные параметры, добиваются уменьшения расхождения рассчитанных и измеренных сигналов, определяя тем самым ФЭС коллектора.

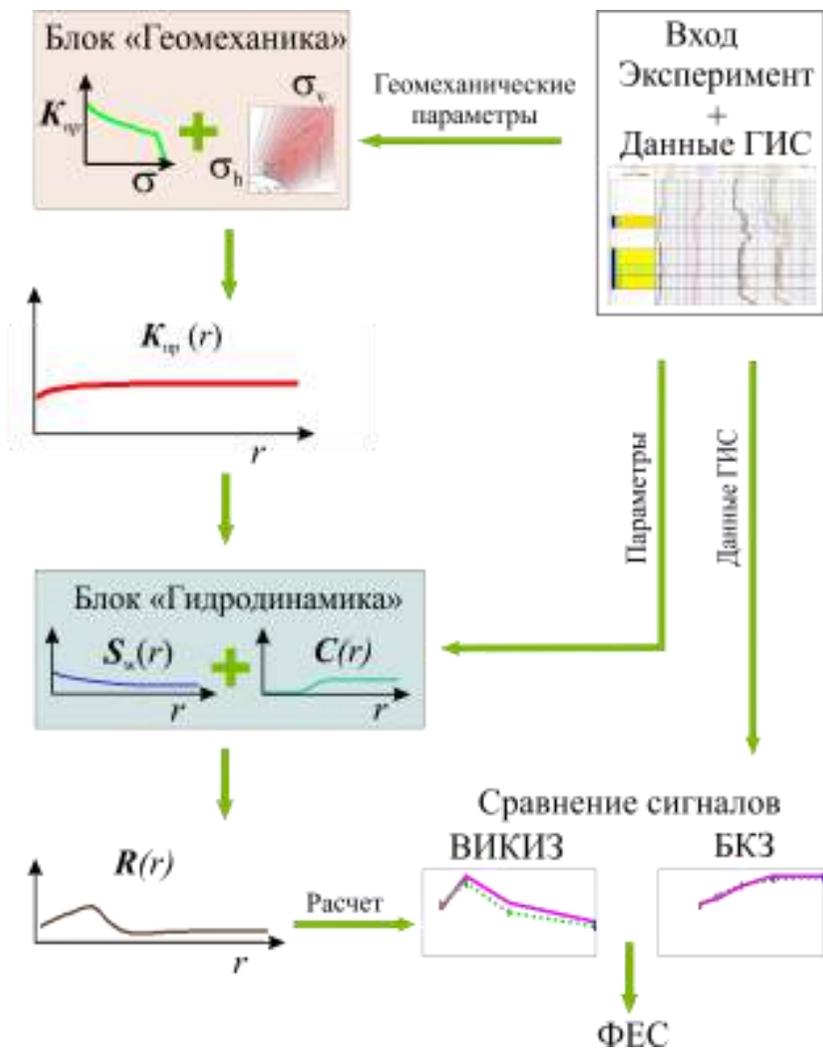


Рисунок 2 – Схема интерпретации данных электромагнитного каротажа по единой гидродинамической и геомеханической модели

Пример влияния геомеханических процессов на радиальное распределение УЭС для слоя коллектора приведен на рисунке 3.

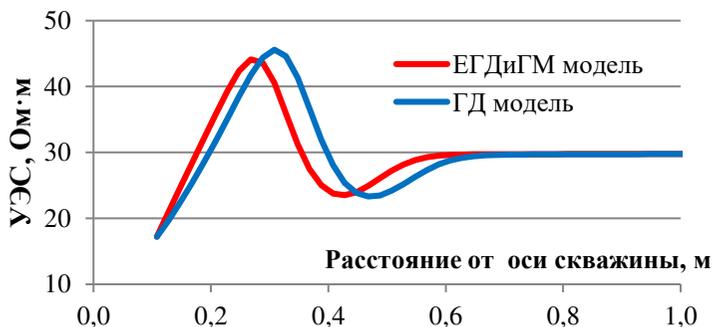


Рисунок 3 – Распределения УЭС, рассчитанные с учетом геомеханических характеристик (красная линия) и без учета (синяя линия)

Определены величины параметров геомеханического блока модели, являющиеся результатом экспериментальных исследований (глава 2), и величины параметров гидродинамического блока модели коллектора месторождения севера Новосибирской области (НСО) (Таблица 2).

Таблица 2 – Параметры модели коллектора месторождения севера НСО

<b>Гидродинамический блок</b>	
Дин. вязкость нефти, Па·с	0.001
Дин. вязкость воды, Па·с	0.0003
Пластовое давление $P_{пл}$ , МПа	24.9
Время бурения, ч	25
Репрессия, в % от пластового давления	3
Минерализация бурового раствора, г/л	35
Минерализация пластовой воды, г/л	25
Коэффициенты в формуле Арчи – Дахнова $n_{\phi} = -2$ ; $n_{sw} = -2$ ; $n_c = -1$ ; $A = 1$	
Показатели степени в формуле фазовой проницаемости $e_w = 2$ ; $e_o = 3$	
Параметры глинистой корки $K_n = 0.6$ ; $K_{np} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ ; $\delta = 0.05$	
Упругоёмкость, 1/Па	$5 \cdot 10^{-10}$
Проницаемости пласта $K_{np}$ , мД	70

Геомеханический блок							
Глубина, м	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_h$ , МПа	$q = \sigma_h / \sigma_v$	$\nu$	$E$ , ГПа	$\theta$ , °	$S_0$ , МПа
2500	52	37.95	0.73	0.19	20.7	38.9	24.3

В параметры глинистой корки помимо величин пористости и проницаемости входит параметр  $\delta$  – доля твердой фазы, содержащейся в буровом растворе. Представленные в таблице 2 параметры использованы при интерпретации данных электромагнитного каротажа с использованием ЕГДиГМ модели.

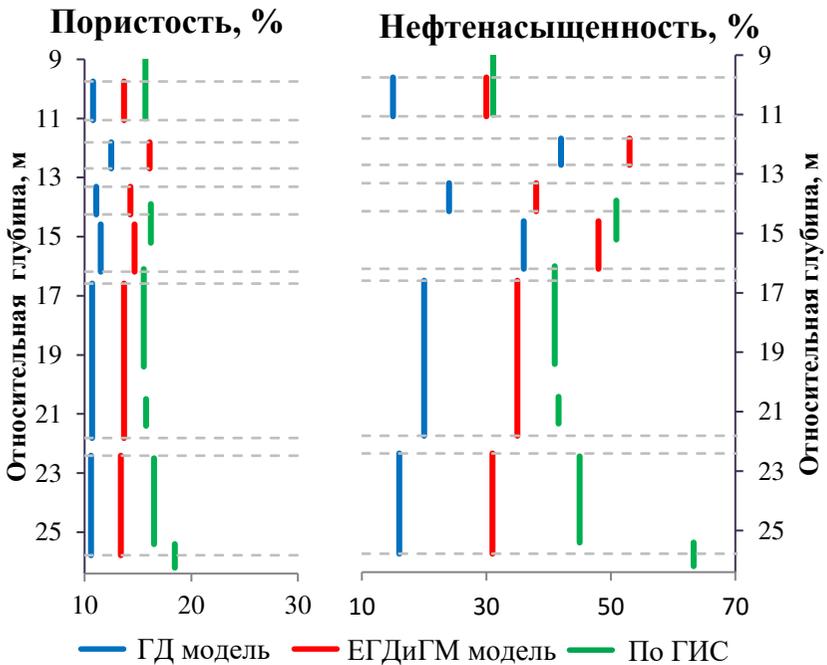


Рисунок 4 – Результат интерпретации каротажных данных для месторождения севера НСО на основе гидродинамической модели с учетом геомеханических свойств (красным) и без учета (синим)

По предложенной автором методике (см. рисунок 2) были проинтерпретированы данные ЭМК с двух скважин разных месторождений Западной Сибири. На рисунке 4 представлен результат интерпретации данных ВИКИЗ со скважины месторождения севера Новосибирской области для отдельных слоев коллектора, расположенного в интервале относительных глубин 9 – 26 м.

Полученные значения пористости и нефтенасыщенности (синие и красные линии) сравниваются с материалами петрофизического заключения геофизической службы (зеленые линии), основанного на принятых для данных пластов зависимостях типа «ГИС-керна» и данных расширенного комплекса ГИС, включающего методы акустического, плотностного и нейтронного каротажей. Разделение коллектора на разные по мощности слои связано с разным набором методов ГИС, используемых при интерпретации. В данном случае значения пористости и нефтенасыщенности, определенные по расширенному комплексу ГИС, имеют смысл эталонных, что позволяет использовать их для контроля полученных коллекторских свойств в условиях отсутствия результатов лабораторных измерений на керне. Сравнение рассчитанных значений и взятых из заключения организации, выполнившей интерпретацию, показывает, что учет геомеханических свойств пород улучшает результат интерпретации для пористости на 1–5 % и нефтенасыщенности – на 5–15 %.

Таблица 3 – Параметры ЕГДиГМ модели

Свойства коллектора	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Тип породы	Песчаник	Алевролит	Песчаник
Глубина отбора образца, м	2820	3324	2979
Пористость, %	22	5	12
Проницаемость, мД	15	1.2	2
Начальная нефтенасыщенность, %	66	55	52
Пластовое давление $P_{пл}$ , МПа	20	20	20
Минерализация пластовых вод, г/л	6	40	30
Минерализация фильтрата бурового раствора, г/л	1.2	25	15
Проницаемость глинистой корки, мД	0.003	0.003	0.003
Коэффициент бокового распора $q$	0.4	0.4	0.4
Прочность на сжатие в пластовых условиях, МПа	78.35	215	50
Угол внутреннего трения пород $\theta$ , °	30	31	25

Для подтверждения вывода о важности учета геомеханических свойств пород при интерпретации данных ЭМК были проведены исследования на синтетических данных. Из базы данных PetroMechBD [Ельцов И. Н. и др., 2015], представляющей собой набор измерений петрофизических и геомеханических свойств образцов, было выбрано три образца пород с условными номерами 1, 2 и 3. Параметры ЕГДиГМ модели задавались с учетом свойств отобранных образцов (Таблица 3).

Коэффициент бокового отпора был определен по модели Итона [Eaton, 1969].

Для оценки влияния геомеханических свойств пород на результат интерпретации синтетических данных вначале рассчитывался радиальный профиль УЭС на основе гидродинамического моделирования с учетом геомеханических свойств пород, а затем подбирался профиль УЭС, максимально совпадающий с первым, на основе гидродинамического моделирования с другими (постоянными для всего пласта, без учета влияния геомеханических факторов) значениями пористости, проницаемости и начальной нефтенасыщенности коллектора. По такому принципу были определены ФЕС для всех трех образцов (Таблица 4).

Расхождение заданных и определенных ФЕС связано с влиянием учета геомеханических свойств на интерпретацию данных ЭМК, и величина расхождения характеризует степень влияния и необходимость учета геомеханических свойств пород при определенных условиях.

Таблица 4 – Результат подбора ФЕС по трем образцам керна

ФЕС коллектора	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
Учет (+) / Не учет (-) геомеханических свойств	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
Нефтенасыщенность, %	66	66	55	54	52	51.2
Пористость, %	22	22	5	4.9	12	11.8
Проницаемость, мД	15	2.7	1.2	0.25	2	0.37

В результате выполненного численного эксперимента удалось количественно описать влияние геомеханических свойств коллектора на процесс интерпретации данных электромагнитного каротажа. Наиболее чувствительным параметром модели коллектора является проницаемость. Так, проницаемость, определенной по ГД модели без учета геомеханических процессов для образца 1 в 5.5 раз меньше, чем заданная проницаемость моделируемой среды, для образца 2 – в 4.8 раза меньше и

для образца 3 – в 5.4 раза. Нефтенасыщенность отличается для образцов 2 и 3 на 1 %, а пористость отличается менее чем на 1 %.

Таким образом, показано, что без учета геомеханических факторов при использовании гидродинамических моделей для интерпретации данных ЭМК для определенных видов пород и сложных геологических условий залегания можно существенно ошибиться при определении ФЕС коллектора.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе проводится интерпретация данных электромагнитного каротажа, зарегистрированных прибором ВИК-ПБ во время бурения. Показано, что интерпретация данных электромагнитного каротажа с использованием гидродинамического моделирования позволяет оценивать ФЕС коллектора еще до окончания бурения скважины.

Получение разновременных данных (на спуске и подъеме бурового оборудования) позволяет повысить точность оценки ФЕС коллектора.

С использованием разработанных соискателем методики и программы на данных каротажа на кабеле (ВИКИЗ + БКЗ) в условиях Когалымского месторождения; каротажа на кабеле и каротажа во время бурения (ВИКИЗ, ВИК-ПБ, БКЗ), проведенного в пласте АС<sub>4</sub> Западной Сибири показана возможность проведения электрогидродинамической инверсии данных ЭМК с определением фильтрационно-емкостных характеристик пород (пористости, нефтенасыщенности). При отсутствии представительных данных ГТИ проницаемость определяется лишь качественно. Возможно, более детальная параметризация модели позволит определить проницаемость породы точнее.

На основе аналитического обзора экспериментальных работ выбрана зависимость проницаемости пород от эффективного напряжения, используемая при интерпретации данных ЭМК на основе ЕГДиГМ модели.

В результате проведенного анализа вариантов соотношения компонент напряжений в окрестности скважины по опубликованным статьям были определены характерные соотношения между горизонтальными и вертикальными напряжениями, что позволило более точно рассчитать параметры ЕГДиГМ модели для терригенных отложений Западной Сибири.

Разработанный способ определения геомеханических параметров пород основан на:

- данных скважинных геофизических измерений,
- данных экспериментов на керне с его разрушением,
- методе нейронных сетей.

Разработана методика интерпретации данных электромагнитного каротажа на основе моделирования гидродинамических процессов с учетом данных каротажа во время бурения, изменения напряженно-деформированного состояния среды, вызванного бурением скважины, и данных, полученных в результате геомеханических экспериментов.

В результате применения разработанной методики для данных двух нефтяных месторождений Западной Сибири (Когалымское, север Новосибирской области) проведено уточнение ФЕС коллектора по сравнению с методикой, основанной только на гидродинамической модели.

На синтетических примерах количественно определено изменение ФЕС коллектора с использованием ЕГДиГМ модели (до 5 раз для проницаемости). Таким образом, появляется возможность снизить погрешность определения фильтрационно-емкостных свойств коллектора, что особенно важно в сложных геологических условиях.

Величина ошибки зависит от поля природных и техногенных напряжений и также связана с гидрофизическими, деформационными и прочностными характеристиками коллектора. Определение области значений параметров единой многофизичной модели пласта, при которых геомеханическими характеристиками породы нельзя пренебречь при интерпретации данных геофизических исследований в скважинах, является предметом последующего исследования.

Дальнейшее развитие этого направления будет также связано с использованием других зависимостей электропроводности среды от ее структурных и фильтрационно-емкостных свойств; созданием конкретных для каждого отложения зависимостей проницаемости от эффективного напряжения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Назарова, Л. А. Некоторые геомеханические аспекты бурения глубоких скважин в массиве горных пород / Л. А. Назарова, Л. А. Назаров, И. Н. Ельцов, В. А. Киндюк // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 6. – С. 3–10.

2. Киндюк, В. А. Экспериментальное определение параметров геомеханической модели околоскважинного пространства на примере данных месторождения Западной Сибири / В. А. Киндюк, И. Н. Ельцов, Л. А. Назаров // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 10. – С. 41–48.

### Свидетельства о государственной регистрации базы данных

3. Ельцов, И. Н. PetroMechBD / И. Н. Ельцов, Н. А. Голиков, В. А. Киндюк, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, Г. В. Нестерова // Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620912. – 2015. – Правообладатель: ИННГ СО РАН.

### Публикации в рецензируемых изданиях

4. Нестерова, Г. В. Моделирование гидродинамических процессов в напряжённо-деформированной прискважинной зоне и геофизические приложения / Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, В. А. Киндюк, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014. – Сборник статей. – М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель». – 2014. – С. 327–344.

5. Ельцов, И. Н. Совместная электрогидродинамическая интерпретация данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и на кабеле / И. Н. Ельцов, А. А. Кашеваров, А. А. Гусеница, В. А. Киндюк // Oil&Gas Russia. – 2010. – Т. 60. – № 4. – С. 60–65.

### Публикации в трудах конференций и сборниках тезисов

6. Киндюк, В. А. Интерпретация каротажных данных с использованием единой электрогидродинамической модели прискважинной зоны / В. А. Киндюк, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов // Сборник материалов XII Международных научных конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь–2016». – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – Т. 2. – С. 102–106.

7. Нестерова, Г. В. Оценка проницаемости пласта на основе совместной электрогидродинамической и геомеханической модели прискважинной зоны [Электронный ресурс] / Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, В. А. Киндюк // Тезисы докладов 18-й научно-практич.

конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2016».– Геленджик, 12–15 сентября 2016. – 4 с.- URL: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=86849>.

8. Нестерова, Г. В. Интерпретация скважинных измерений с использованием баз данных геомеханических свойств пород и пластовой нефти [Электронный ресурс] / Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, Н. А. Голиков, В. А. Киндюк // Тезисы докладов 15-й научно-практич. конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель-2013» – Геленджик, 9–12 сентября 2013. – 4 с. - URL:<http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=71144>.

9. Киндюк, В. А. Восстановление значения модуля Юнга по данным геофизических исследований в скважинах с помощью нейронных сетей / В. А. Киндюк, А. Ю. Соболев // Сборник материалов IX Международной выставки и научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь–2013». – Новосибирск: СГГА, 2013. – Т. 2. – С. 137–142.

10. Киндюк, В. А. Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик породного массива в окрестности глубоких скважин / В. А. Киндюк, Л. А. Назаров, О. М. Усольцева, П. А. Цой, И. Н. Ельцов // Сборник материалов VII Международной выставки и научного конгресса «Гео-Сибирь–2011». – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 2. – С. 146–150.

11. Киндюк, В. А. Идентификация нефтенасыщенности низкоомных коллекторов с использованием фильтрационного моделирования / В. А. Киндюк, М. Н. Глушенко, А. Ю. Соболев, И. Н. Ельцов // Сборник материалов VI Междунар. выставки и научного конгресса «Гео-Сибирь–2010». – Новосибирск: СГГА, 2010. – Т. 2. – Ч. 2. – С. 128–132.

12. Киндюк, В. А. Синтетические каротажные диаграммы на основе ФЕС модели коллектора / В. А. Киндюк, А. Ю. Соболев, И. Н. Ельцов // Тезисы докладов 4-й Всерос. молодежной научно-практич. конф. «Геоперспектива–2010». – М., 2010. – С. 106–107.

13. Киндюк, В. А. Электрогидродинамическая интерпретация данных каротажа на примере коллекторов Западной Сибири / В. А. Киндюк, В. С. Игнатов, К. В. Сухорукова, И. Н. Ельцов // Сборник материалов VIII Уральской молодежной научной школы по геофизики. – Пермь: ИГД УО СОРАН. – 2007. – С. 114–116.

Технический редактор Т.С. Курганова

---

Подписано в печать 30.05.2017

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 110. Зак. № 157

---

ИНГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3