

На правах рукописи



ЯДРЫШНИКОВА Ольга Анатольевна

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

**Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

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

Тюмень – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент
Кузяков Олег Николаевич

Официальные оппоненты: **Плавник Андрей Гарьевич,**
доктор технических наук,
Западно-Сибирский филиал Института
нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А.Трофимука СО РАН, заведующий
лабораторией геологии нефти и газа

Дорогобед Алена Николаевна,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ухтинский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой вычислительной техники,
информационных систем и технологий

Ведущая организация: Автономное учреждение Ханты-Мансийского
автономного округа – Югры Научно-
аналитический центр рационального
недропользования им. В.И. Шпилемана

Защита диссертации состоится 28 марта 2019 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.14 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте <https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-14/zashchita/639002/>.

Автореферат разослан «___» января 2019 г.

*Ученый секретарь
диссертационного совета*



А.А. Оленников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оценка запасов углеводородов является одной из основных задач в нефтяной и газовой промышленности, которая производится на большом объеме обработки данных, анализе промысловой и геолого-геофизической информации. Одними из главных направлений развития современной российской экономики и топливно-энергетического комплекса являются развитие технологий, цифровизация экономики, которые на практике должны привести к повышению достоверности запасов углеводородного сырья.

Вероятностные и нечеткие методы оценки запасов в настоящее время представляют значительный интерес, т.к. большое значение имеет геолого-экономическая оценка углеводородов именно на начальных стадиях изучения, которая выполняется в условиях крайней недостаточности геолого-геофизической информации. В то же время происходит стремительное ухудшение качества запасов углеводородов в связи с истощением разрабатываемых месторождений, что требует освоения новых объектов с нетрадиционными запасами углеводородов. Требуется адекватная оценка подсчетных параметров при затрудненных условиях, таких как тонкослоистые и трещиноватые коллекторы, где проявляется недостаток разрешающей способности геофизических исследований скважин.

Разработка методов анализа промысловой и геолого-геофизической информации в условиях неопределенности отстает от практических задач, что является причиной снижения эффективности, надежности работы систем в нефтегазовой отрасли. Для повышения достоверности оценки запасов, обоснования подсчетных параметров необходимо развитие существующих и создание новых методов. Актуальным является исследование процесса оценки запасов в условиях неопределенности с помощью методов математического моделирования, развитие и создание новых методов, так же их реализация в комплексе программ.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов математического моделирования, создание комплекса программ, реализующего новые вычислительные технологии обработки информации при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности, с целью повышения достоверности оценки запасов, обоснования подсчетных параметров.

Задачи работы:

1. Анализ, тестирование детерминированных, вероятностных и нечетких методов для оценки запасов углеводородов и определения подсчетных параметров в условиях различных видов неопределенностей.

2. Развитие вычислительных технологий путем математического моделирования вероятностных и нечетких моделей при подсчете запасов и оценки ресурсов углеводородов.

3. Разработка оригинальных численных методов и алгоритмов оценки некоторых подсчетных параметров в затрудненных условиях.

4. Разработка комплекса программ, в котором реализованы эффективные численные методы и алгоритмы для проведения вычислительных экспериментов и обработки информации при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности.

Объектом исследования являются процессы интерпретации геологической и геофизической информации, подсчета запасов и оценки ресурсов углеводородных систем.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки геолого-промысловой информации при вероятностных и нечетких оценках запасов углеводородов и подсчетных параметров в условиях неопределенности.

Методами исследования являются методы математического моделирования, сформированные из практических задач по оценке запасов в условиях неопределенности: вероятностные методы, методы теории нечетких множеств и нечеткой логики, методы распознавания образов.

На защиту выносятся основные положения и результаты, соответствующие областям исследования паспорта научной специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам:

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

1. Новый метод моделирования распознавания трещин для снятия их экспериментальных геометрических характеристик, определения трещиноватой пористости и проницаемости по микроснимкам петрографических шлифов и томограммам керна.

2. Новый метод моделирования определяющей функции принадлежности при расчете запасов с применением нечетких операций с элементами метода конденсации вероятностных распределений и обратного вычисления путем нечеткого имитационного моделирования.

Пункт 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

3. Численный метод оценки песчанистости и нефтенасыщенности по фотографиям керна, сделанных при дневном свете и при ультрафиолетовом освещении на основе нечетких критериев. Проведено тестирование методики, оценена точность разработанных алгоритмов. Получен патент на изобретение «Способ оценки нефтенасыщенности керна горных пород по фотографиям образцов в дневном свете» (№2654372).

4. Тестирование, обоснование эффективного численного метода матричных операций и выборки по методу латинского гиперкуба при вероятностной оценке запасов углеводородов. Тестированием показана эффективность методов за счет ускорения сходимости устойчивых результатов и сокращения времени вычислений.

Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

5. Автором создан комплекс программ, в котором реализованы разработанные численные методы и алгоритмы для проведения вычислительного эксперимента обработки информации при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности. Комплекс программ состоит из зарегистрированных в Роспатент: Zapas, KernColor, KernFracture, PH-Дата. Получено 5 авторских свидетельства (№2005611167, №2015614441, №2016611934, №2017612180, №2017662359). Комплекс программ практически используется в нефтегазовых компаниях при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности.

Научная новизна основных результатов состоит в разработке численных методов и алгоритмов на основе математического моделирования для решения задач оценки запасов углеводородов в условиях неопределенности, численного решения задач по определению подсчетных параметров, реализация их в комплексе программ для проведения вычислительных экспериментов. Научная новизна входит в три области исследования научной специальности 05.13.18:

В области математического моделирования

1. Математическое моделирование распознавания трещин для снятия экспериментальных данных по снимкам петрографических шлифов и томограммам керна. Для решения задачи предложен математический метод. Научная новизна состоит в том, что для определения длины трещины используется алгоритм скелетизации отображения трещин. Создан эффективный метод автоматического измерения длины и ширины трещин с заданной погрешностью.

2. Математическое моделирование определения результирующей функции принадлежности по запасам с применением метода, который является аналогичным методу конденсации вероятностных распределений. Оригинальность состоит в том, что предлагается применение метода при подсчете запасов с нечеткими параметрами.

3. Разработан метод нахождения функции принадлежности по запасам с нечеткими параметрами с использованием обратного вычисления путем нечеткого имитационного моделирования. Впервые применено для обратного вычисления имитационное моделирование на основе метода Монте-Карло.

В области численных методов

4. Разработаны численные математические методы комплексной оценки песчанности и нефтенасыщенности по фотографиям керна, сделанных при дневном свете и при ультрафиолетовом освещении на основе нечетких критериев. Оригинальность заключается в том, что благодаря разработанной модели, удалось впервые произвести снятие экспериментальных данных с альтернативных источников информации при недостатке данных.

5. Разработаны методики использования матричных операций и выборок по методу латинского гиперкуба при вероятностной оценке запасов углеводородов для ускорения сходимости устойчивых результатов и сокращения времени вычислений. Оригинальным является применение при оценке запасов метода конденсации вероятностных распределений для существенного снижения размерности задачи при вероятностном выводе.

В области создания и реализации комплекса программ

6. На основе предложенных методик и алгоритмов автором спроектирован и создан комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента обработки информации при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности, в котором автоматизированы разработанные научные методы и алгоритмы. Комплекс программ предназначен для повышения точности оценки запасов углеводородов, повышение достоверности определения подсчетных петрофизических параметров при недостатке или отсутствии данных.

Достоверность и обоснованность результатов, сформулированных в диссертации, обеспечиваются корректной реализацией в комплексе программ теории нечетких множеств, нечеткой логики, теории вероятностей, интервального анализа; подтверждается результатами многочисленных вычислительных экспериментов, опытно-промышленными расчетами для месторождений Западной Сибири.

Производилось экспериментальное сравнение результатов расчета с зарубежными аналогами такими как CrystalBall и Techlog. На практике получена приемлемая сходимость результатов. Значения подсчетных параметров, полученных с альтернативных источников информации, сравнивались на практике с результатами, полученными из основных источников данных, расхождение результатов при этом не превышает 3%.

Практическая значимость заключается в создании эффективных методов, алгоритмов, комплекса программ для использования в компаниях, занимающихся разработкой нефтяных и газовых месторождений для повышения точности оценки запасов углеводородов.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Тюменский Нефтяной Научный Центр» - научно-исследовательском институте ПАО «НК«Роснефть» и нефтегазодобывающих предприятиях ПАО «НК«Роснефть». Внедрение

подтверждается актами и справкой об использовании результатов, полученных при исследованиях.

Алгоритмы и комплекс программ использованы:

- В целевых инновационных проектах ПАО НК «Роснефть» (ЦИП №136 Создание технологий изучения керна сложных и нетрадиционных коллекторов)

- В научно-технических платформах ООО «ТННЦ» (2014-2018 г.г.)

С использованием созданного комплекса программ произведены некоторые научные исследования, практически решены задачи по оценке подсчетных параметров и запасов углеводородов месторождений Западной Сибири и других месторождений России. Единая точка доступа «РН-Дата» внедрена в дочерних обществах ПАО «НК«Роснефть»: ТННЦ, Уватнефтегаз, Ванкор, Оренбургнефть, Таас-Юрях.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации представлялись на научно-практических мероприятиях:

1. 36-я международная конференция "Современные информационные технологии в нефтяной и газовой промышленности" (Испания, г. Марбелья, 2007);

2. 4-я корпоративная научно-практическая конференция молодых специалистов (г. Москва, 2007);

3. Семинар «Управление данными ТНК-ВР» (г. Тюмень, 2008);

4. 10-я всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформатика в нефтегазовой и горной отраслях» (г. Сургут, 2009);

5. 8-я научно-практическая конференция «Использование ГИС-технологий ESRI в нефтегазовой отрасли» (г. Тюмень, 2010);

6. 13-я всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли» (г. Тюмень, 2011);

7. Научно-практическая конференция «Промышленная безопасность и геолого-маркшейдерское обеспечение работ при добыче углеводородного сырья» (г. Тюмень, 2012);

8. Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвященная 50-летию создания Тюменского индустриального института (г. Тюмень, 2013);

9. VI-я всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (г. Тюмень, 2015);

10. 44-я научно-практическая конференция «Современные информационные технологии в нефтяной и газовой промышленности» (г. Севастополь, 2015);

11. Результаты представлялись в Тюменском индустриальном университете (2011 - 2018 г.г.);

12. II конференция по импортозамещению (г. Нижневартовск 2018);

13. Международный форум по газовым проектам (г. Тюмень 2018);

14. Научно-технический семинар «Цифровые технологии в разработке месторождений. Современные методы анализа данных» (г. Уфа, 2018);

15. Результаты представлялись и обсуждались на научно-технических советах ООО «ТННЦ», совещаниях и технологических форумах, проводимых нефтегазодобывающими предприятиями компании ПАО «НК «Роснефть» (2010 - 2018 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 11 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus, получены 1 патент на изобретение и 5 свидетельств на программы ЭВМ.

Личный вклад. Представленные результаты в большей части диссертационной работы, основанные на анализе, теоретической проработке решений задач, разработке, тестировании новых методов путем математического моделирования, разработке комплекса программ получены автором самостоятельно. На создание методов исследований большое влияние оказали Алтунин А.Е., Семухин М.В.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 177 страницах, включает 46 рисунков и 10 таблиц. Список литературы насчитывает 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность исследования, необходимость развития методов математического моделирования для оценки запасов нефти и определения подсчетных параметров в условиях недостаточности данных, сформулированы цель и задачи диссертации, перечислены положения, которые выносятся на защиту, показана научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1 посвящена обоснованности развития вычислительных технологий при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности.

Описаны проблемы оценки запасов углеводородов в условиях неопределенности. Рассмотрены методы и исходные данные подсчета запасов углеводородов.

Объемный метод подсчета запасов является основным методом для подсчета запасов углеводородов. В работе рассматриваются формулы расчета для нефти, для газа и для конденсата. Объемный метод оценки запасов для нефти описывается формулой:

$$Q_n = F \cdot h_{н.эф} \cdot k_{н.о} \cdot k_n \cdot \theta \cdot \rho, \quad (1)$$

где Q_n - первоначальный запас нефти;

F - значение площади нефтеносности;

$h_{н.эф}$ - значение эффективной нефтенасыщенной толщины пласта;

- $k_{н.о}$ - значение коэффициента открытой пористости;
- k_n - значение коэффициента нефтенасыщенности;
- θ - значение пересчетного коэффициента, учитывающий значение усадки нефти;
- ρ - значение плотности нефти при стандартном условии.

Детерминированные модели с применением средних значений параметров для расчета начальных запасов не получают объективных знаний о погрешности расчета запасов. Необходимо разработка математических моделей, описывающих процесс подсчета запасов в условиях недостаточности информации, создание эффективных численных методов и алгоритмов для решения задач. Поэтому работа посвящена развитию вероятностных и нечетких методов оценки запасов.

Проанализированы различные типы неопределенностей информации, участвующих в процессе работы сложных нефтегазопромысловых систем. Неполнота геолого-промысловой информации объясняется причинами:

- Сложностью наблюдения необходимых параметров объекта и процессов, происходящих в нем.
- Большими, неоправданными затратами, которые необходимы для полноценной информации (к примеру, бессмысленно в водоносной зоне бурить много гидрогеологических скважин, которые являются наблюдательными).
- Невозможностью одновременной регистрации больших объемов параметров, участвующих в процессе разработки месторождений.
- Незнанием всех закономерностей в процессах, которые происходят в фильтрационной пластовой системе.
- Случайным, непреднамеренным изменением или искажением полученными в большом объеме информации при сборе, передаче или обработке.

Сделаны следующие выводы:

1) Необходимо развитие математических методов для описания и моделирования неполноты данных сложных нефтегазопромысловых систем, которые бы в комплексе использовали все виды данных об этих системах.

2) При неопределенности необходимо применение конструктивных вероятностных и нечетких методов. При недостатке данных большую роль играют оригинальные методы распознавания петрофизических свойств по косвенным данным, интеллектуальный анализ данных.

Во второй главе описаны математические методы и модели для принятия решений в условиях неопределенности. Рассмотрена вероятностная модель и применение известного метода Монте-Карло для оценки значения неопределенности при проведении геолого-промыслового моделирования.

Для определения разных типов неопределенностей геологических и промысловых данных используется общая теория неопределенности, которая создана Л.Заде, основанная на обобщениях ограничений: $X \text{ } isr \text{ } R$, где X – значение переменной, R – изменяемое ограничение на переменную, а isr –

связывающая переменная, в которой значение r - переменной определяет способ, как R ограничивает X . Заданные ограничения применяются в процессе обработки информации в виде правил вывода к исходной информации, т.е. в виде распространения ограничений.

Первым этапом использования информационной модели распространения ограничений Л.Заде является анализ входного отношения (исходного множества данных). Отображения на универсальном множестве U называют отображениями гранулирования, определяющими информационные гранулы объектов из U . Тогда в общем случае все известные методы построения функций принадлежности можно отнести к семейству отображений неопределенности (или гранулирования).

Ко второму этапу обработки входного множества данных (распространение ограничений) можно отнести различные семейства методов теории нечетких множеств. Важную роль среди них играют теоретико-множественные операции над нечеткими множествами. Особую роль играют операции композиции отношений и известное композиционное правило вывода: $B = A \circ F$, при этом знак $\circ$ - это операция композиции. При конечных носителях нечетких множеств A и F , композиция приводится к максимумному произведению матриц.

Другое большое семейство методов обработки нечетких ограничений - это алгебраические операции с нечеткими величинами и использование численных моделей с нечеткими параметрами и коэффициентами. Распространение алгебраических операций на множестве вещественных чисел на нечетких множествах:

$$\mu_{A \circ B}(z) = \sup_U \{ \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \},$$

$$U = \{(x,y) \in \sigma(A \times B) \mid x \circ y = z\}, \quad (2)$$

где $\circ$ - операция из набора $\{+, -, *, /\}$.

В аналитическом случае для вычисления функции принадлежности $\mu_{A \circ B}$ необходимо решить задачу нахождения условного экстремума. Если в методе происходит переформулирование исходной задачи с использованием r -уровней, то вычисление называют "обратным". Рассмотрены также численные методы коррекции нечетких исходных данных - метод коррекции по носителю нечеткого множества и метод коррекция по r -уровням.

В третьей главе рассматривается математическое моделирование процесса оценки запасов углеводородов в условиях неопределенности, развитие численных методов с использованием вероятностных и нечетких математических моделей.

В работе рассматриваются вероятностные модели оценки запасов нефти, газа, конденсата. При вероятностном подходе параметры в формуле представляются случайной величиной, а значение запасов рассматривается в виде функции этих случайных параметров.

Функция распределения вероятностей определяется как кривая, отображающая вероятность наличия запасов в определенном диапазоне. Эта функция $F(Q < Q_0)$ отыскивается по совместной плотности распределения параметров-множителей $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$F(Q < Q_0) = \int \dots \int_{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n < Q_0} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (3)$$

Для плотности вероятностей подсчетных параметров моделируется выбор случайных значений, для каждой комбинации рассчитываются запасы по известной формуле, производится повторение этой операции большое количество раз, т.е. применяется грубый метод Монте-Карло, которому свойственна медленная сходимости, как следствие требуется большое количество времени для получения приемлемых результатов. Кроме того, каждый раз в результате получаются различные гистограммы частот.

Для повышения эффективности метода вводится в функцию выбора параметров некоторая регулярность, т.е. производится более полное сканирование входных параметров. Множество входящих параметров делятся на интервалы, выбор значений производится отдельно для каждого интервала. Выборка латинского гиперкуба - послойная выборка. Достигается более равномерная квазислучайная выборка в пространстве входных значений. При использовании данного метода результат достигается быстрее за меньшее число итераций.

Проведены эксперименты по оценке запасов нефти для реальных месторождений. Для реализации расчетов одновременно были использованы грубый метод Монте-Карло и выборка латинского гиперкуба.

Результаты показывают (рисунок 1), что метод латинского гиперкуба более эффективен по сравнению с грубым методом Монте-Карло, так как для получения стабильных результатов метод требует на порядок меньшее число испытаний.

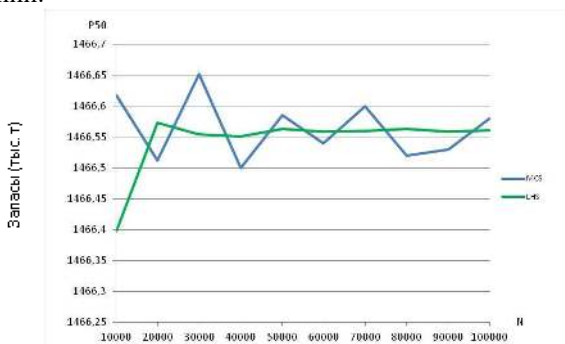


Рисунок 1. Графики стабилизации значений начальных запасов P50 посчитанных с применением грубого метода Монте-Карло (MCS) и с применением метода латинский гиперкуб (LHS).

Использование численных операции над плотностями вероятностей случайных значений взамен моделирования случайным образом величин приводит к устойчивым результатам за меньшее число итераций.

Разбирается вероятностная дискретная модель подсчета запасов (гистограммные распределения входных параметров $f_i(x_i)$)

$$P(Q_i) = \sum_{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n = Q_i} f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_n(x_n) \Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_n \quad (4)$$

На сочетании подсчетных параметров распространено суммирование, которые в итоге дает Q_i при произведении.

При алгебраической операции сложения подсчетных параметров можно использовать регулярную процедуру суммирования вероятностей. При операции умножения предлагается использовать подход, основанный на конденсации вероятностей. Вероятность попадания Q в интервал (Q_i, Q_{i+1}) :

$$P(Q_i < Q < Q_{i+1}) = \sum_{Q_i < x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n < Q_{i+1}} f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_n(x_n) \Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_n \quad (5)$$

В работе предложен один из подходов нахождения результирующей плотности вероятности на основе применения при оценке запасов метода конденсации вероятностных распределений. Объединение случайных переменных (конденсация) производится над промежуточными наборами подсчетных параметров при операции перемножения, а не над итоговым сложно получаемым набором значений.

Допустим, что X и Y – две дискретные независимые величины данного испытания и $z = x \circ y$, где $\circ$ – есть некоторая операция из набора $\{+, -, *, /\}$. Как в методе Монте-Карло интервал результирующей функции Z делим на несколько частей одинакового размера. И в этом случае необходимо суммировать вероятности элементов, попадающих в данный интервал. Вероятность попадания величины z в интервал $[z_i, z_{i+1}]$ определяется:

$$P(z_i < z \leq z_{i+1}) = \sum_{\Omega_i} P(X = x)P(Y = y) \text{ , где } \Omega_i = \{(x, y) | z_i < x \circ y \leq z_{i+1}\}. \quad (6)$$

Этот подход был применен в экспериментальных расчетах для реальных нефтяных залежей. Численный метод конденсации вероятностных распределений эффективнее, т.к. для каждого испытания не моделируются все входные вероятностные распределения. Эффективность еще больше при конденсации промежуточных вероятностных распределений. Представлены относительные расхождения для полученных значений запасов P10, P50 и P90 при числе испытаний 10 млн.

Таблица 1. Относительные расхождения значений запасов P10, P50 и P90

	ММК	Численный метод конденсации	Относительная ошибка, %
P90	317992	317430	0,177
P50	328063	327924	0,042
P10	338369	338243	0,037

Далее в работе рассматривается развитие нечетких моделей объемного метода подсчета запасов газа в условиях неопределенности. Подсчетные параметры - это нечеткие множества и задаются функциями принадлежности.

Для подсчета нечетких запасов нефти объемным методом получаем результирующую функцию принадлежности:

$$\mu_o(Q_n) = \max_U [\mu(F) \wedge \mu(h_{n,эф}) \wedge \mu(k_{n,o}) \wedge \mu(k_n)] . \quad (7)$$

$$U = \{ (F, h_{n,эф}, k_{n,o}, k_n) \mid F \cdot h_{n,эф} \cdot k_{n,o} \cdot k_n \cdot \theta \cdot \rho = Q_n \} .$$

Для оценки запасов нефти в условиях недостаточности геолого-промысловой информации предложено использование алгоритма, основанного на теории нечетких множеств. Параметры представляются в виде нечетких величин, что в отличие от случайных, лучше характеризует геолого-промысловую систему.

В работе выполнена реализация прямого метода определения результирующей функции принадлежности при известном алгоритме расчета получаемого значения. Реализация численного метода приведена на примере сложения двух дискретных величин, которые заданы нечетко.

Таблица 2. Входные параметры для сложения двух нечетких величин.

μ	0,1	0,5	1	0,4
x	2	3	4	5

μ	0,3	1	0,7	0,2
y	4	5	6	7

Минимаксные операции матрицы сложения носителей и значения функции принадлежности представлены в таблице 3.

Таблица 3. Матрицы сложения и значения функции принадлежности для двух нечетких величин

	2	3	4	5		0,1	0,5	1	0,4
4	6	7	8	9	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3
5	7	8	9	10	1	0,1	0,5	1	0,4
6	8	9	10	11	0,7	0,1	0,5	0,7	0,4
7	9	10	11	12	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2

В результате значение функции вычисляется при максимуме значений функции принадлежности в матрице элементов с равными носителями:

μ	0,1	0,3	0,5	1	0,7	0,4	0,2
z	6	7	8	9	10	11	12

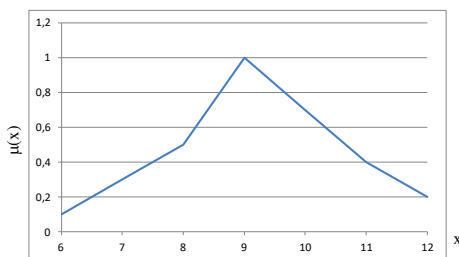


Рисунок 2. Функция принадлежности для суммирования двух дискретных нечетких величин

При использовании произвольного вычисления матричная структура нарушается. Предлагается метод, аналогичный методу конденсации вероятностных распределений. Операция суммы величин вероятностей меняется на максимизацию функции принадлежности на интервалах допустимых значений функции.

Для оценки запасов углеводородов с нечеткими параметрами предлагаемый подход был реализован на практике. Выполнены экспериментальные расчеты для реальных нефтяных залежей. Пример с использованием численного метода приведен на рисунке 3.

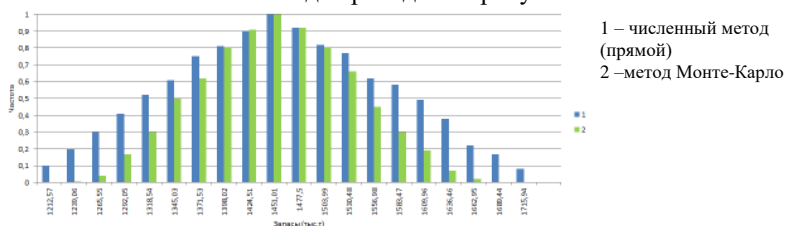


Рисунок 3. Расчет нечетких запасов нефти

Для построения функции принадлежности $\mu_0(v)$ используются численные методы, в частности обратные вычисления. Отрезок $[0, 1]$ разделяем на равные отрезки. Вычисляем r -уровневые интервалы для входных значений.

Параметры моделируем в виде равномерных распределений методом Монте-Карло и имеющейся программой расчета функции. При каждом испытании сохраняем минимальное и максимальное значение переменной y . Определяем выходные переменные как r -уровневые множества (рисунок 4).

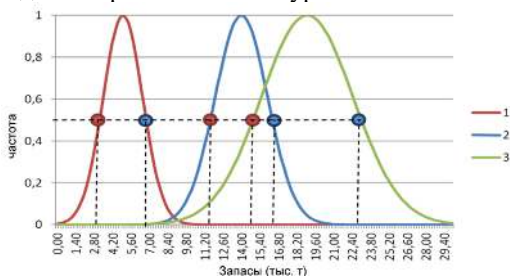


Рисунок 4. Сложение двух нечетких значений по r -уровням

Например, на рисунке 5 приведен результат определения максимально возможного интервала (носителя) нечеткой величины запасов с применением метода Монте-Карло и латинского гиперкуба.

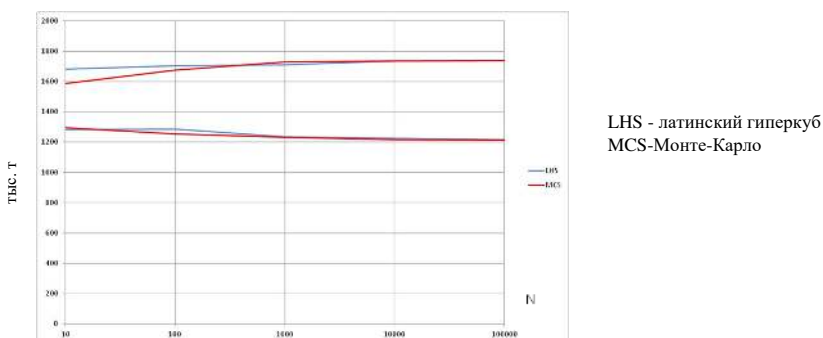


Рисунок 5. Оценка максимально возможного интервала (носителя) нечеткой величины запасов методами латинский гиперкуб и Монте-Карло

Экспериментально показана эффективность метода LHS-латинский гиперкуб, т.к. расчет интервалов r -уровневых множеств с использованием латинского гиперкуба сходится быстрее. Предложенный метод проводит анализ неопределенностей модуля, который моделирует объект, алгоритм реализации которого неизвестен, т.е. представлен в виде «черного ящика». Входные значения могут быть заданы не только вероятностными распределениями, но и нечеткими значениями.

В четвертой главе описываются разработанные автором оригинальные, эффективные численные методы и алгоритмы оценки некоторых подсчетных параметров при обработке геолого-промысловой информации в затрудненных условиях. Так же описан комплекс программ, в котором реализованы рассматриваемые и разработанные методы и алгоритмы. Рассматриваются методы автоматизированной обработки цифровых фотографий керна для комплексной оценки степени песчаности и нефтенасыщенности с применением спектральных преобразований и теории нечетких множеств.

Фотография керна представляет собой растровое изображение массива пикселей с кодом модели RGB (рисунок 6). Используется известная модель цветового зрения для получения яркости пикселей:

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \quad (8)$$

где Y – яркость пикселя.

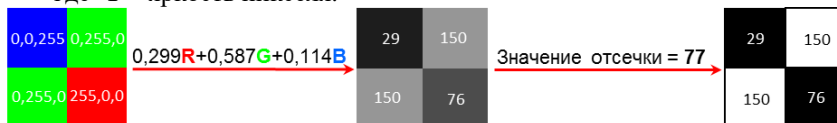


Рисунок 6. Конвертация растрового изображения в Greyscale

По значениям яркости строится гистограмма распределения. Предложено разделение гистограммы накопленных частот яркости по значению 0,5 (рисунок 7).

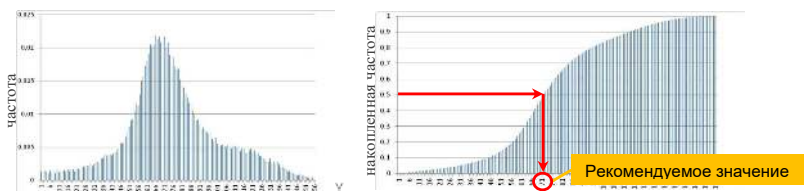


Рисунок 7. Разделение значений яркости

Площадная доля песчаности:

$$NTG = \frac{\sum_{\text{светлых}}}{\sum_{\text{темных}} + \sum_{\text{светлых}}} \quad (9)$$

В области нефтенасыщенных участков наблюдается расхождение цветовых каналов (рисунок 8).



Рисунок 8. Графики цветового спектра фото в дневном свете

K1 - первый критерий, рассчитывается как максимальное значение расхождения цветов. Обработка происходит каждого пикселя построчно:

$$\Delta = \max(R, G, B) - \min(R, G, B); K1 = \Delta / \Delta_{\max} \quad (10)$$

K2 - второй критерий, определяющий участки максимального удаления друг от друга значений цветов R, G, B. Вычисляется абсолютное значение разности цветов (R-G) и (R-B). Далее вычисляют отношение:

$$\lambda = \frac{\min(\text{abs}(R - G), \text{abs}(R - B))}{\max(\text{abs}(R - G), \text{abs}(R - B))} \quad (11)$$

$$\text{Критерий K2 рассчитывается как } K2 = 1 - 2 \cdot \text{abs}(\lambda - 0,5) \quad (12)$$

Критерий K2 лучше использовать совместно с K1, т.е. получить KK1, как комплексный критерий в виде конъюнкции из теории нечетких множеств: $KK1 = \sqrt{K1 \cdot K2}$. (13)

Как показывает практика, комплексного критерия KK1 вполне достаточно для работы с фотографиями в дневном свете.

Для фотографий с нефтенасыщенными участками характерно, что два из трех цветов идут практически вместе с большим расхождением от третьего. По критерию KФ1, аналогичного K1, определяется максимальное расхождение из трех значений цветов.

Комплексная оценка нефтенасыщенных участков вычисляется пересечением значений коэффициентов песчаности, нефтенасыщенности в дневном свете и ультрафиолете:

$$KK = \sqrt[3]{NTG \cdot KK1 \cdot K\Phi 1} \quad (14)$$

Диапазон изменения показателя KK от 0 до 1.

Операция объединения нечетких множеств используется при комплексной оценке степени песчанистости, что позволяет учесть в результате и большие значения по яркости, и большие значения по нефтенасыщенности:

$$KK = NTG \vee KK1 \vee K\Phi1. \quad (15)$$

В итоге, полученные значения трансформируются в кривые долевого содержания песчаников и глинистых включений.

На рисунке 9 приведен метод определения комплексной оценки степени песчанистости и нефтенасыщенных участков на основе разработанных критериев.

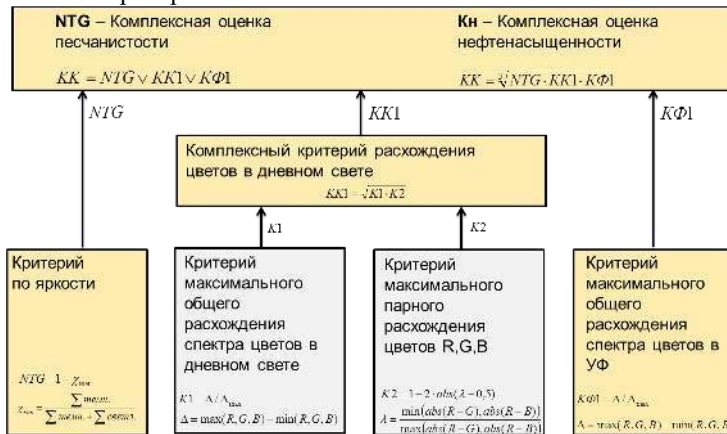


Рисунок 9. Метод определения степени песчанистости, нефтенасыщенности

Рассматриваются разработанные методы распознавания трещин для автоматизации снятия экспериментальных геометрических характеристик, определения трещиноватой пористости и проницаемости по микроснимкам петрографических шлифов и томограммам керна.

Путем математического моделирования создан метод определения геометрической длины трещины с использованием скелетизации ее изображения, т.е. все линии имеют толщину в один пиксель. Необходимо на изображении определить координаты крайних точек x,y (масштаб в 1 пиксель) для скелетизированной кривой трещины В, С (рисунок 10).

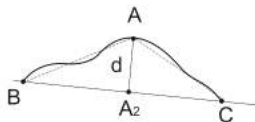


Рисунок 10. Измерение значения протяженности трещины
Вычислим величину d по формуле:

$$d = \frac{|(y_B - y_C)x_A + (x_C - x_B)y_A + (x_By_C - x_Cy_B)|}{\sqrt{(y_B - y_C)^2 + (x_C - x_B)^2}}. \quad (16)$$

Зададим δ , как относительную погрешность для длины трещины.

$$\frac{|BA| + |AC| - |BC|}{|BA| + |AC|} \leq \delta. \quad (17)$$

При результате, меньшем δ , за расстояние берется отрезок ВС, иначе удаленная точка А берется за новую точку и рассматриваются отрезки ВА и АС. Отрезки разбиваются до выполнения ограничения по погрешности.

Рассматривается определение значения средней ширины (раскрытости) трещин. Площадь трещины определяется $S = N \cdot S_{\text{пикс}}$ как количество темных пикселей N на площадь одного пикселя $S_{\text{пикс}}$. Средняя ширина трещины вычисляется отношением S площади трещины на длину трещины l: S/l . Интенсивность вычисляется отношением суммы площадей всех трещин на площадь шлифа.

С применением методики ВНИГРИ можно вычислить значение трещинной пористости и проницаемости пород.

$$\text{Поверхностная плотность трещин (1/м): } P = \frac{\sum l}{S}, \quad (18)$$

где $\sum l$ - общая длина трещин (м), S – площадь (м²).

$$\text{Коэффициент трещинной пористости (\%): } K_{\text{н.пор}} = A \frac{bl}{S}. \quad (19)$$

$$\text{Коэффициент трещинной проницаемости (м}^2\text{): } K_{\text{пр.пор}} = A \frac{b^3 l}{S}, \quad (20)$$

где b – средняя раскрытость трещин (мкм), l – суммарная длина трещин на снимке (шлифа, отпечатка и пр.), A – коэффициент равный $1,71 \times 10^6$ (по методике ВНИГРИ), который зависит от геометрии систем трещин в породе и соответствует хаотически расположенным в породе трещинам.

Проведены численные эксперименты измерения геометрии трещин ручным с помощью микроскопа и автоматизированном вариантах по снимкам шлифов. Относительное расхождение составило менее 3%.

Эффективность автоматизированной обработки данных заключается в быстрой скорости расчета по сравнению с ручным способом с помощью микроскопа.

Реализация численных методов в комплексе программ для проведения вычислительных экспериментов.

Спроектирован и создан «Комплекс специального математического и программного обеспечения для оценки запасов углеводородов и подсчетных параметров в условиях неопределенности», в котором автоматизированы разработанные научные методы и алгоритмы.

Комплекс программ ЭВМ создан для решения одного класса задач по функционалу и предназначен для проведения численных экспериментов.

Созданные компьютерные программы являются комплексом программ, т.к. они предназначены для решения практических задач, связанных с повышением точности при оценке запасов углеводородов, повышением достоверности определения подсчетных петрофизических параметров при недостатке или отсутствии данных. Оригинальность состоит в том, что в основе комплекса программ реализованы разработанные вероятностные и нечеткие методы и методы распознавания образов. На рисунке 11 представлена схема реализованных методов в комплексе программ.

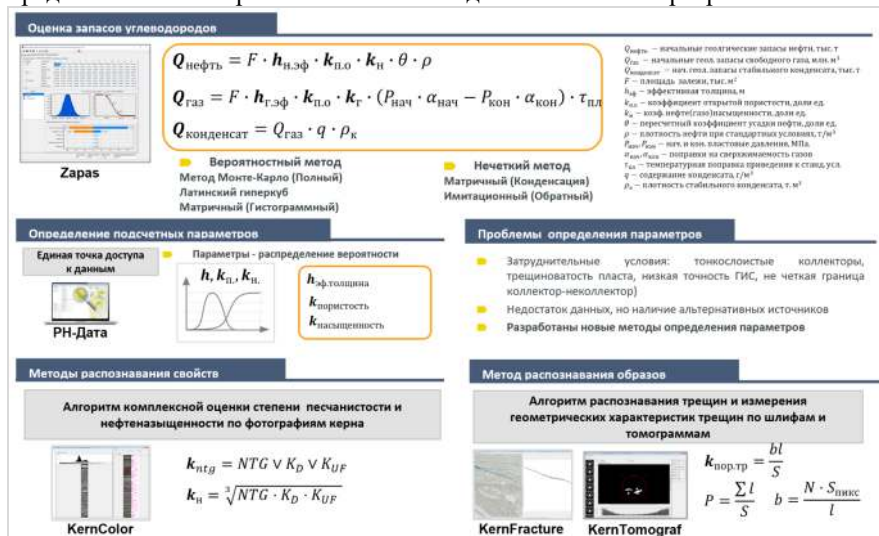


Рисунок 11. Схема реализованных методов в комплексе программ

С помощью комплекса программ решаются практические задачи:

- автоматизация расчета запасов углеводородов по неточным геолого-промысловым данным с применением вероятностной и нечеткой модели подсчета запасов с помощью «ПО Zapas»;
- повышение достоверности определения подсчетных петрофизических параметров при недостатке и отсутствии данных, при затруднительных условиях (тонкослоистые коллекторы, недостаток разрешающей способности ГИС, отсутствие четкой границы коллектор-неколлектор), т.к. созданная программа «KernColor» позволяет проводить оригинальную обработку лабораторных исследований керна;
- распознавание трещин и получение фактических данных о трещиноватости пласта по снимкам шлифов в программе «KernFracture»;
- реализация единой точки доступа к информации - ПО «РН-Дата».

Комплекс программ предназначен для повышения достоверности оценки запасов углеводородов.

На рисунке 12 представлена схема комплекса программ.

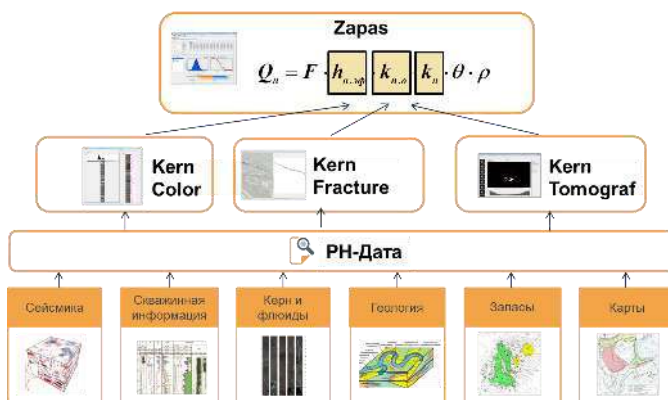


Рисунок 12. Схема разработанного комплекса программ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты диссертационной работы представляют собой развитие вычислительных технологий обработки информации при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности.

1. Проведен анализ, тестирование и сравнение по точности расчетов детерминированных, вероятностных и нечетких методов для задач принятия решений при подсчете запасов и определении подсчетных параметров в условиях различных видов неопределенностей и рисков для газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений.

2. Путем математического моделирования выполнено развитие вычислительных технологий при оценке запасов углеводородов в условиях неопределенности:

- Проведено тестирование и реализация эффективных методов:
 - использование матричных операций и выборок по методу латинского гиперкуба при вероятностной оценке запасов углеводородов для ускорения сходимости результатов и сокращения времени вычислений.
- Разработаны два численных метода:
 - нахождение функции принадлежности при расчете запасов с применением прямого метода расчета результатов нечетких операций с элементами метода конденсации вероятностных распределений;
 - нахождение функции принадлежности при расчете запасов с нечеткими параметрами с использованием обратного вычисления путем нечеткого имитационного моделирования.

3. Разработаны два оригинальных численных метода распознавания петрофизических свойств по фотографиям и томограммам керна для оценки

подсчетных параметров при затрудненных условиях (тонкослоистые коллекторы, недостаток разрешающей способности ГИС):

- комплексная оценка песчанистости и нефтенасыщенности по фотографиям керна при дневном и ультрафиолетовом.
- распознавание трещин для снятия экспериментальных данных по снимкам петрографических шлифов.

4. Разработан «Комплекс программ для оценки запасов углеводородов и подсчетных параметров в условиях неопределенности», в котором реализованы численные методы, предназначенные для компаний, занимающихся разработкой месторождений полезных ископаемых для повышения точности при оценке запасов углеводородов, повышения достоверности определения подсчетных петрофизических параметров. Комплекс программ и отдельные модули внедрены и используются в ООО «Тюменский нефтяной научный центр» и нефтегазодобывающих предприятиях ПАО «НК«Роснефть».

На рисунке 13 представлена схема разработанных, проанализированных численных методов.

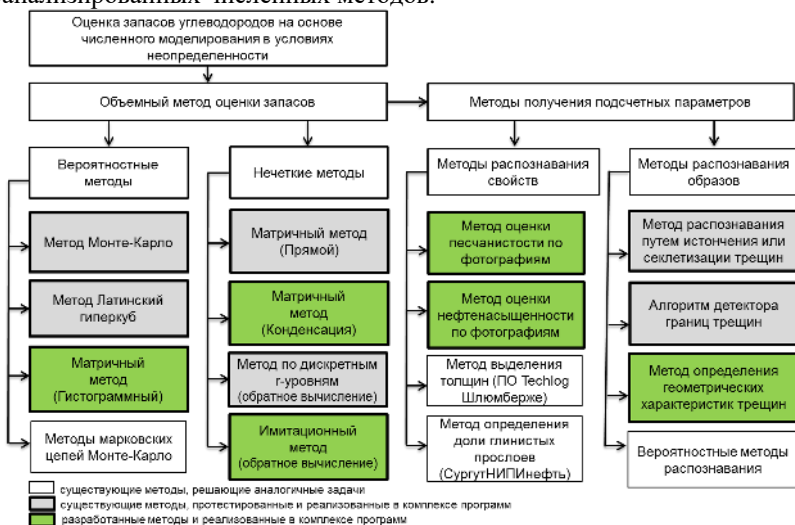


Рисунок 13. Место разработанных методов, входящих в комплекс программ, среди методов, решающих аналогичные задачи

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Ядрышникова О.А. Вероятностные и нечеткие оценки запасов нефти / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова [и др.] // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2003. – № 9. – С. 27-31.

2. Ядрышникова О.А. Вероятностные и нечеткие оценки запасов нефти / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Нефтепромысловое дело. – 2003. – № 10. – С. 54-58.
3. Ядрышникова О.А. Оптимизация инвестиционных планов проведения геолого-разведочных работ на основе нечеткого математического программирования / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 10. – С. 30-32.
4. Ядрышникова О.А. Оценка гидравлических коэффициентов трубопроводной сети с использованием подходов экспериментального дизайна / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 2. – С. 48-50.
5. Ядрышникова О.А. Использование альтернативных и модифицированных вероятностных методов для оценки неопределенностей и рисков при подсчете запасов углеводородов / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Научно-технический Вестник ПАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2013. – № 3. – С. 42-47.
6. Ядрышникова О.А. Методы компьютерной обработки фотографий керна при изучении коллекторских свойств продуктивных пластов /А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А.Ядрышникова [и др.]//Нефтяное хозяйство.–2013.–№11.– С.12-16.
7. Ядрышникова О.А. Методы анализа различных видов неопределенности при моделировании нефтегазовых объектов / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Научно-технический Вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2015. – № 1. – С. 2-8.
8. Ядрышникова О.А. Методы анализа неопределенностей геолого-промысловых систем и нечеткие имитационные модели / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2015. – № 5. – С. 33-43.
9. Ядрышникова О.А. Комплексная оценка степени песчаности по фотографиям керна в дневном и ультрафиолетовом свете / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 48-52.
10. Ядрышникова О.А. Разработка системы распознавания трещин для получения экспериментальных данных по снимкам петрографических шлифов керна / М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова, М.Ф. Серкин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 5. – С. 27-31.
11. Ядрышникова О.А. Вероятностные и нечеткие модели оценки неопределенностей и рисков при подсчете запасов углеводородов / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 85-99.

Авторские свидетельства, дипломы, патенты

12. Ядрышникова О.А. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005611167 «Расчет запаса нефти по неточным геолого-промысловым данным» / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А.Ядрышникова. – 2005.

13. Ядрышникова О.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614441 «KernColor» / О.А. Ядрышникова, М.В. Семухин, А.Е. Алтунин. – 2015.

14. Ядрышникова О.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611934 «Модуль «Поиск и представление данных» информационной системы «РН-Дата Регион» / О.А. Ядрышникова, В.О. Беляков. – 2016.

15. Ядрышникова О.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2017612180 «KernFracture» /О.А. Ядрышникова, М.В. Семухин, М.Ф. Серкин. – 2016.

16. Ядрышникова О.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662359 «Программный комплекс для оценки запасов углеводородов и подсчетных параметров в условиях неопределенности» / О.А. Ядрышникова, А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – 2017.

17. Ядрышникова О.А. Патент на изобретение №2654372 «Способ оценки нефтенасыщенности керна горных пород по фотографиям образцов в дневном свете» / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин, О.А. Ядрышникова [и др.]. – 2018.

Публикации в других изданиях

18. Ядрышникова О.А. Построение карт неопределенностей и рисков при подсчете запасов с использованием теории нечетких множеств / О.А. Ядрышникова//Материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвященной 50-летию создания Тюменского индустриального института. – 2013. – С.252-260.

19. Ядрышникова О.А. Комплексные критерии для получения псевдо-каротажной кривой оценки песчанистости (ntg) по фотографиям керна в дневном свете и ультрафиолетовом излучении / О.А. Ядрышникова // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании. – 2015. – С. 110-114.

20. Ядрышникова О.А. Комплекс программ цифровой обработки информации по керну для повышения достоверности петрофизических параметров / О.А. Ядрышникова // Материалы семинара ООО «РН-УфаНИПИнефть». Цифровые технологии в разработке месторождений. Современные методы анализа данных. – 2018. – С. 23.

Подписано в печать 27.12.2018 г.
Формат 60×80/16. Печ. л. 1,5. Печать ризограф.
Тираж 100 экз. Заказ №1227

Типография ООО «Печатник»
г. Тюмень, ул. Республики, 148 корп. 1/2
Тел. (3452)20-21-91 тел./факс (3452)32-13-86