

Кононов Юрий Михайлович

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ
УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКИХ
ВХОДНЫХ ДАННЫХ

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Гольдштейн Александр Ефремович

Официальные оппоненты: Удод Виктор Анатольевич,
доктор технических наук, профессор;
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
профессор кафедры математических
методов и информационных технологий в
экономике.

Авдеенко Татьяна Владимировна,
доктор технических наук, профессор;
Новосибирский государственный
технический университет, заведующий
кафедрой экономической информатики.

Ведущая организация: Тюменский научно-исследовательский
институт проектирования разработки и
эксплуатации нефтяных и газовых
месторождений

Защита состоится «22» октября 2013 года в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «__» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Юркевич Валерий Дмитриевич

Актуальность темы исследования. Задача выбора и принятия решений, в такой сложноструктурированной информационной системе как нефтяной пласт, требует анализа и обработки значительных объемов разнородной информации, для учета системных связей и закономерностей функционирования ее элементов. Планирование мероприятий по применению *методов увеличения нефтеотдачи* (МУН) является сложным процессом и требует комплексного подхода для его реализации, включающего проведение системных исследований. Необходимость применения методов системного анализа обуславливается большим объемом, разрозненностью и разнородностью информации в данной области.

Совершенствование алгоритмов и методик выбора методов увеличения нефтеотдачи и их более четкая формализация позволяет повысить эффект от применяемого метода. На нынешнем этапе развития нефтяной отрасли анализ информации для качественного принятия решения по выбору МУН является важнейшей и в то же время слабо изученной проблемой. В России до сих пор недостаточно развиты алгоритмы и программы подбора необходимых МУН, созданные для геологических условий рассматриваемого объекта.

Процесс поиска эффективных методов и определения оптимально подходящего из них значительно усложняется вследствие неоднозначности критериев выбора, неточностей и неполноты входных данных, а также необходимости обработки как количественной, так и качественной информации. Пластовые системы вместе с насыщающими их флюидами представляют собой сложную систему, в которой физическая неопределенность объекта связана как со стохастической неопределенностью (ситуация случайности), так и с невозможностью точного определением конкретных физических параметров среды (ситуация нечеткости), и выбор МУН представляет процедуру принятия решений в нечеткой среде.

В этой связи, анализ и обработка информации для разработки алгоритмов и программ, реализующих экспертную систему, обладающую достаточной гибкостью в принятии решений по выбору методов увеличения нефтеотдачи в условиях нечетких входных данных, является актуальной задачей.

Объектом исследования являются связи и взаимовлияния компонентов системы «пласт-метод увеличения нефтеотдачи» функционирующие в условиях нечеткой информации. Рассматриваются физический объект «пласт», представляющий собой систему с набором параметров, и физический объект «агент воздействия».

Предметом исследования выступают аналитический и численный анализы разнородной информации, с целью описания поведения исследуемого объекта и создания алгоритмов оценки применимости методов увеличения нефтеотдачи пластов, обеспечивающих подбор наиболее эффективных решений.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и программ, реализующих экспертную систему для оперативного выбора и оценки применимости методов увеличения нефтеотдачи пластов в условиях нечетких входных данных, на основе анализа, обработки и систематизации разнородной информации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования**.

1. Провести анализ алгоритмов и систем принятия решений, в том числе по оценке применимости МУН.

2. Выполнить комплексный анализ накопленной информации по МУН, включающий проведение системных исследований.

3. Разработать базу данных, включающую в себя предшествующий опыт внедрения методов увеличения нефтеотдачи. Создать базу знаний, включающую в себя описания, ограничения и рекомендации для основных методов увеличения нефтеотдачи.

4. Осуществить анализ информации по опыту внедрения МУН ведущими нефтедобывающими компаниями международного уровня, с целью определения и корректировки критериев применимости МУН. Вывести критерии применимости для основных методов увеличения нефтеотдачи в условиях нечетких входных данных.

5. Разработать структуру экспертной системы, технологию оценки МУН и реализующие ее алгоритмы, способные работать в условиях нечеткости исходных данных.

6. Программно реализовать алгоритмы оценки применимости МУН – технологию принятия решений, позволяющую повысить эффективность решения задач выбора оптимального метода на нефтяных месторождениях в условиях нечетких входных данных.

7. Провести апробацию созданных алгоритмов реализующих экспертную систему, выведенных критериев применимости при решении задач выбора МУН на месторождениях Томской области.

Методы исследования базируются на использовании методов системного анализа, аналитического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, методов вычислительной математики, теории нечетких множеств и теории принятия решений.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивалась сопоставлением решений, полученных с помощью разработанных алгоритмов, с результатами реальных примеров внедрения методов увеличения нефтеотдачи, лабораторных исследований и математического моделирования. Полученные результаты и экспериментальные данные опубликованы в различных журналах, в том числе и в изданиях из перечня российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание степеней доктора и кандидата наук. Получено свидетельство о государственной регистрации разработанных базы данных и алгоритмов реализующих программу для ЭВМ.

Научная новизна результатов работы:

1. На основе систематизации и структурирования результатов применения МУН на нефтяных месторождениях в мире и в России созданы входящие в состав экспертной системой (ЭС) актуальные база данных «Мировые и отечественные МУН» и база знаний, конкретизированы критерии применимости МУН.

2. Впервые на базе методов теории нечетких множеств, использования комплексного подхода при анализе экспертной и статистической информации для оценки всех влияющих геолого-физических свойств каждого из заложенных в программе методов увеличения нефтеотдачи, сформированы функции принадлежности, позволяющие получать более корректные решения сложных задач выбора МУН в условиях нечетких входных данных.

3. Предложен алгоритм принятия решений по выбору МУН в нечеткой среде, позволяющий осуществлять выбор оптимального МУН для конкретных геолого-

промысловых условий разработки месторождения в условиях нечетких входных данных.

4. Разработано специальное программное обеспечение, реализующее экспертную систему «Матрица применимости МУН», интегрирующее новый алгоритм принятия решений по выбору МУН в нечеткой среде, новые базы данных и знаний.

Положения, выносимые на защиту.

1. Сформированные на основе комплексного анализа информации и теории нечетких множеств функции принадлежности по 15 МУН, учитывающие актуализированную информацию в области МУН, позволяют осуществить оценку применимости МУН и ранжировать методы по приоритетности в условиях нечетких входных данных.

2. Предложенная многоэтапная технология (алгоритм) принятия решений по выбору МУН в нечеткой среде, сочетающая в себе оценку применимости методов на основе теории нечетких множеств, использование лингвистической и статистической информации в области МУН, позволяет более корректно осуществить выбор наиболее эффективного МУН для конкретных геолого-физических условий пласта.

3. Разработанный алгоритм оценки и специальное программное обеспечение «Матрица применимости МУН», реализующие нечеткую экспертную систему оценки применимости МУН и интеграции знаний в области МУН, позволяют оперативно осуществлять оценку применимости методов для конкретных геолого-физических свойств пласта и выбирать оптимальный метод для применения в условиях нечетких входных данных с меньшими временными затратами.

4. Предложенные решения, для новых проектов применения МУН на месторождениях Томской области, полученные с помощью разработанного программного комплекса, позволили более корректно и эффективно выбрать перспективные методы и подготовить рекомендации для их реализации.

Практическая ценность работы. В результате поэтапно реализованного системного подхода к обработке информации разработано специальное программное обеспечение, реализующее экспертную систему, для оценки применимости МУН.

Предложенный в работе комплексный подход к оценке МУН позволяет оперативно оценивать степень их применимости, получать рекомендации и ссылки на литературу, тем самым ускоряя процесс принятия решения, за счет снижения времени на поиск и анализ информации о применимости МУН для конкретных геолого-физических характеристик пласта. Содержащиеся в программе модули позволяют проводить анализ информации по опыту применения технологий, сравнивать с месторождениями-аналогами, что дает возможность произвести целостную оценку применимости метода.

Результаты диссертационной работы были использованы при разработке производственной программы применения МУН на месторождениях Томской области. Предложенный алгоритм выбора МУН в настоящее время активно используется в ОАО «ТомскНИПИнефть» (г. Томск) при выполнении проектов разработки нефтяных месторождений.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась на кафедре информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета. Разработанные в диссертации методические, алгоритмические и информационные средства, реализованные в

экспертной системе, были использованы при оценке и выборе МУН для целевых месторождений Томской области. Результаты исследования в виде программно-методического комплекса используются на предприятии ОАО «ТомскНИПИнефть» для принятия решений по выбору МУН, а так же в учебном процессе в Томском политехническом университете при обучении студентов специальности «Нефтегазовое дело».

Разработанная экспертная система дополнительно содержит модуль поиска месторождений-аналогов, который базируется на геолого-физических и промышленных данных 537 месторождений различных геологических условий.

Личный вклад. В диссертационной работе использованы результаты, в которых автору принадлежит определяющая роль. Разработана технология оценки МУН в нечеткой среде, собраны и сформированы основные части базы знаний (БЗ) и базы данных (БД) используемые в ЭС. Сформирована основная часть функций принадлежности для оценки МУН в нечеткой среде. Автор лично провел вычислительные эксперименты по применимости МУН на месторождениях Томской области. База данных разработана в 2011-2012 гг. коллективом авторов Ю.М. Кононов, Е.Н. Иванов, Ю.А. Сивов, А.Т. Росляк на основе открытых мировых литературных источников о проектах внедрения МУН. При разработке базы данных автор осуществлял подбор и расположение материалов базы данных, разработку рубрикатора, корректировку БД, проверку качества данных. При создании экспертной системы автор выполнял разработку нечеткого алгоритма оценки МУН и формирование базы знаний.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях, в том числе на: международной НПК «Робототехника и искусственный интеллект» (РИИ-2012), (Железногорск, 2012); XIV и XV Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», (Томск, 2012, 2011); XVI и XVII Международной НПК «Современные техника и технологии» (Томск, 2012, 2011); Всероссийской конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа», (Москва, 2011); Международной НПК «Увеличение нефтеотдачи – приоритетное направление воспроизводства запасов углеводородного сырья», (Казань, 2011); IV Научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений, добычи и переработки нефти», (Уфа, 2011); всероссийской НПК «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», (Томск, 2012); всероссийской конференции «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», (Томск, 2012); IV, V и VI региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ТомскНИПИнефть», (Томск, 2013, 2012, 2011).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 15 работах, в том числе: 2 статьи в изданиях из перечня российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание степеней доктора и кандидата наук; одно свидетельство об официальной регистрации базы данных; одно свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ; одна статья в рецензируемом журнале

не вошедшем в перечень журналов рекомендованных ВАК; 10 публикаций в трудах и материалах международных и российских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 209 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 103 наименования, и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 182 страницах, включает 72 рисунка и 20 таблиц.

Содержание работы. Во *введении* дается общая характеристика работы, обсуждается актуальность решаемых задач, сформулированы цель и задачи работы, а также ее научная новизна.

В первой главе представлен аналитический обзор информации из научно-технических источников о развитии, принципах работы и использовании алгоритмов и программ принятия решений в различных областях промышленности и науки. Обоснована необходимость разработки алгоритмов и специального программного обеспечения, реализующего экспертную систему для решения задач выбора МУН, осуществлены обзор и анализ программ, используемых для оценки МУН в России и за рубежом, выявлены причины, затрудняющие их использование.

Для качественного создания экспертных систем необходим комплексный подход, важнейшим элементом которого является системный анализ. Применение методов системного анализа к рассмотрению проблемной области делает возможным ее всестороннее изучение и формирует целостное представление о взаимосвязях ее элементов и принципах принятия решений в условиях разнородной и разрозненной информации.

При оценке применимости методов увеличения нефтеотдачи приходится оперировать со специфическими характеристиками данных, позволяющими отнести выбор МУН к классу неформализованных задач: неоднозначность, неполнота, противоречивость и ошибочность исходных данных и знаний о проблемной области и решаемой задаче; задачи не могут быть заданы в числовой форме; характеризуются большой размерностью пространства решения, т. е. перебор при поиске вариантов решения весьма велик. Для решения такого рода задач все большее применение в мировой практике находят алгоритмы принятия решений, реализуемые в экспертных системах. Цель исследований в данной области состоит в комплексной обработке информации с целью разработки алгоритмов и специальных программ, имитирующих процессы принятия решения человеком и позволяющих получать результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, принимаемым экспертом.

В нефтяной отрасли наиболее известными системами, реализующими алгоритмы оценки МУН и применяемыми за рубежом, являются SWORD, EORgui, SelectEOR (PRIze), Screening 2.0. Методики и программное обеспечение для аналитического моделирования используются в многочисленных проектах в таких странах, как США, Мексика, Венесуэла, Колумбия, Египет и другие. Основные разработки систем оценки МУН выполнены в работах Л.М. Сургучева, Р.Р. Ибатулина, М. Trujillo, В. Альварардо, А.М. Shindy, Е.М. Shokir и других. В таблице 1 представлены характеристики систем, используемых для оценки МУН.

В результате анализа выявлены причины, затрудняющие использование существующих алгоритмов и программ для оценки МУН на месторождениях Томской области:

- недоступность программных средств (являются корпоративными или используются внутри конкретной организации, имеют высокую стоимость);
- оценка применимости МУН производится по традиционной логике, что приводит к большой погрешности оценки;
- алгоритмы оценки, реализованные в существующих программах, созданы для конкретных видов пластов, адаптированы под конкретные МУН и не могут быть использованы для месторождений других геологических условий;
- недостаточно гибкая структура программных средств и интерфейса: фиксированное количество оцениваемых МУН и критериев оценки, трудности с оперативным изменением критериев выбора МУН, несвоевременная актуализация БД и отсутствие динамической корректировки программного пакета в зависимости от НИР;
- БД имеют недостаточно широкий объем актуализированной информации по геологическим условиям пластов-аналогов, что затрудняет процесс использования опыта применения МУН, в частности для месторождений Томской области.

Таблица 1– Характеристики экспертных систем для выбора МУН

Название программы	Авторы публикаций	Компания	Используемые критерии	Бинарный скрининг	Нечеткая логика	Нейронные сети	Доступность	Возможность увелич. числа МУН	Возможность увелич. числа критериев	Исп. данных включенных 2012 г.
SWORD	Л.М.Сургучев и др.	PETEC Software	База данных	-	+	-	-	-	-	-
EORgui	М.Trujillo и др.	Petroleum Solutions	Taber, Martin, Seright	+	-	-	+	-	-	-
SelectEOR (PRIze)	В.Альварado и др.	Alberta Research Centre	База данных, авторские	+	-	-	+	-	-	+
Screening 2.0	М.Trujillo и др.	I.C.P. ECOPEOTROL	Lewin, Farouq, Taber, Seright и др.	+	-	-	-	-	-	-
Экспертная система	А.М.Shindy и др.	Ciaro University	База данных	+	-	-	-	-	-	-
Экспертно-аналитическая система	Р.Р.Ибатулин и др.	ТатНИПИнефть	База данных	-	-	+	-	-	-	-
Экспертная система	Е.М. Shokir и др.	King Saud University	База данных	-	-	+	-	-	-	-

Во второй главе описана специфика МУН, выполнен анализ неопределенностей информации при принятии решений и выборе МУН, обоснована целесообразность применения аппарата нечеткой логики при оценке характеристик пласта. Дано определение системного подхода при выборе МУН. Приведены необходимые для понимания объекта исследования основы теории принятия решений и теории нечетких множеств. Проведен комплексный анализ существующих критериев применимости МУН, экспертной и статистической информации по опыту внедрения

методов, и на его основе сформированы функции принадлежности для оценки применимости МУН.

При принятии решения о выборе метода воздействия на пласт человек сталкивается с разнородной, противоречивой и неформализованной информацией. Систематизация, анализ и формализация подобного рода информации является сложным процессом, связанным с ее устареванием и изменением, особенно в такой стремительно развивающейся сфере как разработка месторождений нефти и применение МУН.

Эффективность применения метода определяется способностью вытесняющего агента увеличить коэффициент вытеснения по сравнению с заводнением в определенных геолого-физических условиях исследуемого пласта и для конкретных характеристик насыщающих его флюидов.

Неопределенности при выборе МУН обусловлены следующими факторами.

1. Неточность входных данных для анализа применимости МУН (результаты измерения параметров пласта и их интерпретация).

2. Некоторые характеристики пласта имеют качественный характер и не всегда корректно могут быть выражены в числовой форме.

3. О некоторых физических процессах, протекающих в пласте при применении различных методов увеличения нефтеотдачи, можно судить только косвенно – по результатам промысловых данных, лабораторных исследований и математического моделирования, что неточно отражает картину реально происходящего в межскважинном пространстве и затрудняет использование жестких границ критериев применимости.

4. Практически все протекающие в пласте физические процессы, отражающие применимость либо неприменимость какого-либо воздействия, не изменяются скачкообразно, а имеют «переходный интервал», границы которого точно не определены.

5. Отсутствие единого стандарта окончательно сформированных критериев применимости МУН.

Для обработки таких данных и принятия решения по выбору МУН необходим комплексный подход. Подходы к обработке информации в условиях неопределенности, оптимизация этапов системного анализа объектов исследования, способы формализации разнородной информации рассмотрены в работах М.В. Симухина, Е.А. Дубинина, Р.Е. Захарова, О.И. Гревцева, А.С. Федулова, И.А. Шпехт, Ю.М. Урличича, О.М. Полещук, А.С. Чувеляевой, О.О. Варламова, И.А. Минакова. Подробные обзоры методов для задач принятия решений приведены в работах Б.Б. Оразбаева, Е.Б. Абарниковой, А.Е. Алтунина, Н.А. Еремина, Л. Заде.

Для принятия решений по выбору МУН рассмотрены различные подходы к оценке информации, в том числе статистические, экспертные методы, применение нейронных сетей, методы теории нечетких множеств. Вследствие неоднородности и разрозненности информации целесообразно использовать лингвистический подход и методы теории нечетких множеств, что дает возможность формализовать процедуру принятия решения при выборе МУН.

Для физической реализации лингвистической переменной необходимо определить физические значения термов этой переменной, которые могут задаваться различными функциями. Выбор конкретного метода увеличения нефтеотдачи зависит от набора критериев, которым должна удовлетворять скважина, участок или пласт.

Например, если $X = [0; 20]$ – множество числовых значений лингвистической переменной «мощность пласта», то на оси X могут быть определены нечеткие множества для термов: «низкая мощность пласта», «средняя мощность пласта», «высокая мощность пласта». На рисунке 1 показаны возможные способы представления термина «высокая мощность пласта» с помощью характеристической функции обычного множества и функции принадлежности нечеткого множества.

В настоящее время используется стандартный подбор МУН путем сопоставления характеристик пласта с табличными (дискретными) критериями. Например, если при выборе МУН отобрать скважины по традиционным критериям в отдельные группы (множества), а затем произвести операцию пересечения полученных множеств, в результирующем пересечении может оказаться либо мало скважин, либо ни одной. Это происходит из-за того, что условия, присутствующие в вышеописанных критериях, являются дискретными и бескомпромиссными.



Рисунок 1 – Переход от четкой логики оценки к нечеткой: а) характеристическая функция обычного множества; б) кусочно-линейная функция нечеткого множества (S -типа); в) нелинейная функция принадлежности нечеткого множества (S -типа).

При использовании теории нечетких множеств не обязательно рассматривать промежуточные множества для последующего их пересечения. Нужно четкие критерии преобразовать в нечеткие, сопоставляя каждому критерию соответствующую функцию принадлежности, затем комплексировать их в единственный критерий, который будет в себе содержать искомое множество. Для вышеописанного примера с выбором высокопродуктивных скважин четкие критерии можно преобразовать в нечеткие следующим образом (таблица 2).

Таблица 2 – Функции принадлежности для термов лингвистических переменных «проницаемость» и «мощность пласта»

Критерий	Название терма	Функция принадлежности
проницаемость пласта не ниже $0,5 \times 10^{-3} \text{ мкм}^2$	высокая проницаемость	
мощность пласта более 10 м	высокая мощность пласта	

Для оценки применимости метода рассматриваются такие характеристики как тип пласта, глубина залегания, проницаемость, пористость, температура, вязкость и плотность нефти, коэффициент начальной нефтенасыщенности, угол падения пласта, содержание легких углеводородов, наличие трещиноватости, наличие высокопроницаемых пропластков, текущая обводненность добываемой продукции и т. д., которые необходимо оценить по специальным критериям для каждого из методов. На основе комплексного подхода при анализе информации определены взаимодействия и взаимосвязи всех элементов системы «пласт-метод». Такой подход позволил формализовать значительный объем накопившейся нечеткой информации.

Для формирования базовых критериев применимости (функций принадлежности) выполнены систематизация экспертных оценок в области методов увеличения нефтеотдачи и анализ мнений экспертов. В диссертации собраны, проанализированы и переработаны критерии, предложенные в работах Р.Х. Муслимова, Е.Д. Подымова, Г.С. Степановой, Н.А. Еремина, J.J. Taber, F.D. Martin и др., Aladasani и др., В. Альварардо, Э. Манрик. Это позволило определить интервалы применимости МУН, сформировать функции принадлежности для 15 основных методов, по которым осуществляется оценка применимости.

На следующем этапе формирования функций принадлежности с целью использования опыта внедрения МУН и конкретизации интервалов применимости собрана информация по опыту применения МУН, выполнены систематизация, структуризация и анализ статистических данных по проектам применения МУН. Для этого автором разработаны база данных, содержащая сведения по применению МУН и база знаний с описанием, ограничениями и рекомендациями по методам. БД содержит информацию по более 600 проектам применения МУН на зарубежных и Российских нефтяных месторождениях и включает в себя название месторождения, местоположение, наборы характеристик пластов и пластовых флюидов, технологический эффект и экономическую эффективность проекта. Наличие такой базы данных в экспертной системе позволяет сравнивать исследуемое месторождение с аналогами, методы увеличения нефтеотдачи которых определены и результаты известны.

Использование системного подхода при формировании функций принадлежности дало возможность определить критерии применимости, учитывающие опыт экспертов и статистику применения МУН, что в свою очередь позволяет более корректно производить оценку применимости МУН.

Третья глава посвящена разработке и описанию алгоритмов, реализующих нечеткую экспертную систему принятия решений. Приводится описание разработанных программного комплекса «Матрица применимости МУН» и схемы работы ЭС.

Экспертная система включает в себя систематизированный и структурированный массив знаний и данных, сформированный на основе поэтапно реализованного системного подхода в области выбора и оценки применимости МУН.

Технология оценки МУН в разработанной программе включает несколько этапов: обычный скрининг и ранжирование методов; анализ применимости методов по геолого-физическим свойствам; детальный скрининг методов (анализ БД, месторождений-аналогов). Такие алгоритмы оценки могут быть применены для нескольких групп методов: гидродинамических (циклическая закачка, форсированный отбор жидкости); термических (закачка пара, внутрипластовое горение); химических (закачка щелочей, поверхностно-активных веществ, полимеров,

полимерное заводнение); закачки газа (азота, широкой фракции легких углеводородов, водогазовое и газовое воздействие, закачка CO₂); потокоотклоняющих (вязкоупругие системы, сшитые полимерные системы, полимер-дисперсные и гелевые системы); термогазового воздействия.

Оценка каждого метода осуществляется по набору функций принадлежности, отражающих желательные интервалы значений свойств пласта для успешного применения конкретного метода.

Схема взаимосвязи используемых методов, функций принадлежности и свойств пласта изображена на рисунке 2.

Взаимодействие блоков программы происходит следующим образом: массив данных (характеристик пласта) поступает на вход системы; определяется связь каждого метода и конкретного свойства пласта; конкретным свойствам пласта для каждого метода, ставится в соответствие функция принадлежности.

В данной схеме использование нечеткой логики позволяет уйти от жестких границ критериев и определить степень применимости методов к конкретным геолого-физическим свойствам пласта.

Всего в программе заложено более 100 функций принадлежности, как с односторонним, так и с двусторонним интервалом. Наклон ребер функций в переходном интервале задается, исходя из анализа экспертных и статистических данных. В частности, используется функция $\mu_A(X)$ вида:

$$\mu_A(X) = \left(1 + \left[\left(\frac{X_{max_i} - X_i^*}{X_i^* - X_{min_i}} \right)^2 \left(\frac{X - X_{min_i}}{X_{max_i} - X} \right)^2 \right]^{(-1)^i} \right)^{-1}$$

где X_{min_i} , X_{max_i} – минимальное и максимальное значение переменной X для левой ($i=1$) и правой ($i=2$) ветвей функции применимости; X – переменная (значение исследуемого геолого-физического параметра); X_i^* – точка перегиба.

Для каждого метода лингвистическими переменными служат названия свойств пласта, по которым определяется применимость метода («глубина», «температура», «мощность пласта», «плотность нефти», «вязкость нефти» и т. д.). В качестве термов использованы уровни значений свойств пласта («низкий», «средний», «высокий», «очень высокий» и т. д.). Для каждого из термов в работе подобрана специальная функция принадлежности. В ЭС «Матрица применимости МУН» предусмотрен самостоятельный модуль, позволяющий пользователю уточнять и корректировать вид любой функции принадлежности, заложенной в программе, в интерактивном режиме.

Концептуальная модель оценки применимости методов увеличения нефтеотдачи в разработанной экспертной системе схематично представлена на рисунке 3.

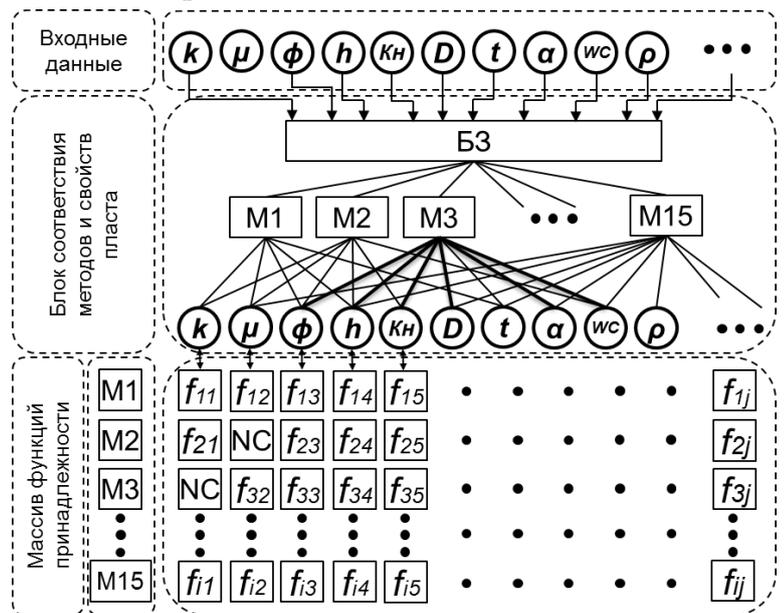


Рисунок 2 – Схема взаимосвязи методов, функций принадлежности и свойств пласта в ЭС

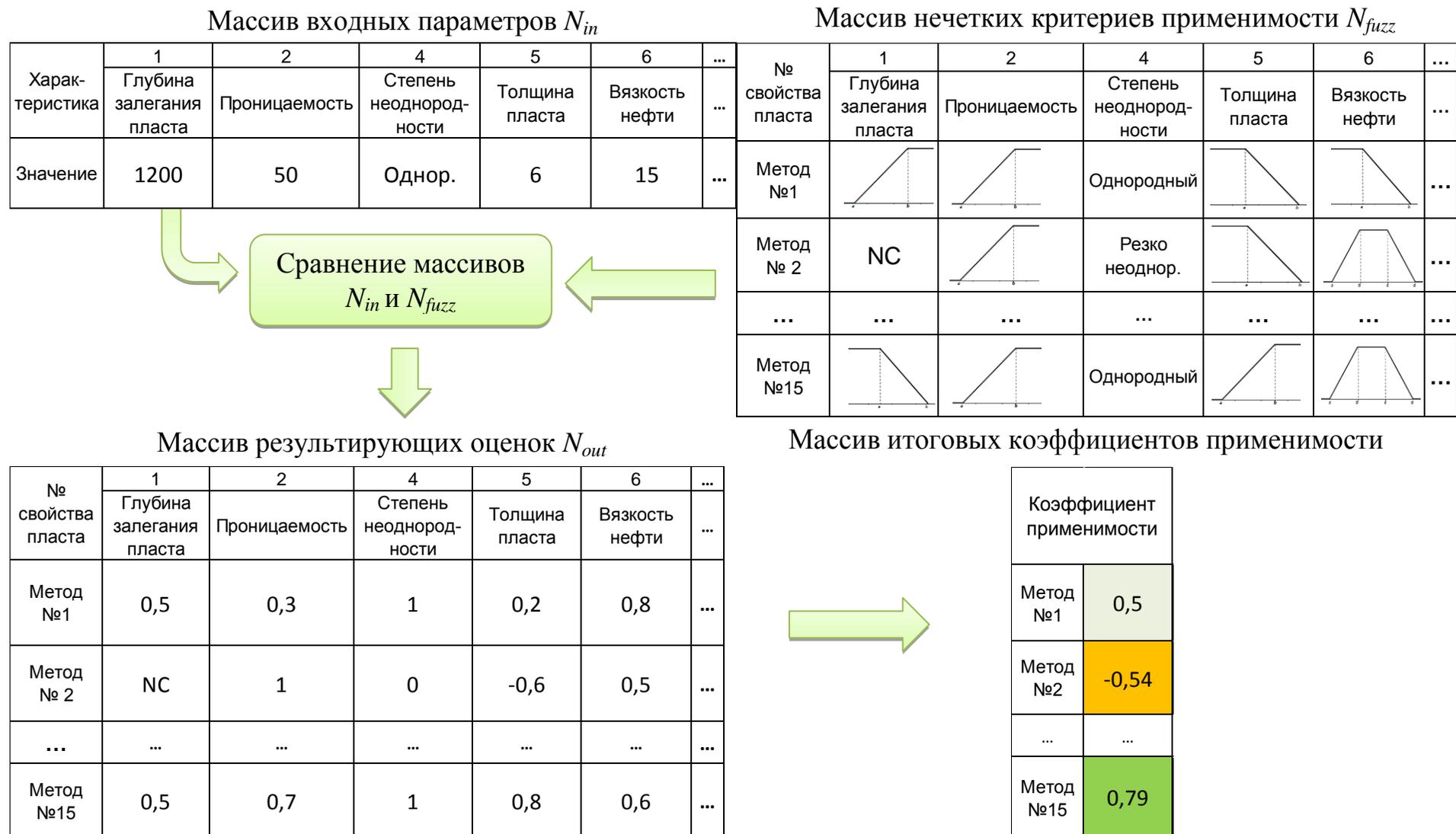


Рисунок 3 – Концептуальная модель оценки применимости методов увеличения нефтеотдачи в разработанной экспертной системе.

Массив входных данных N_{in} сравнивается с массивом функций принадлежности (нечетких критериев) N_{fuzz} , в результате чего определяется степень принадлежности данных входного массива соответствующим функциям принадлежности массива N_{fuzz} , что формирует матрицу результирующих оценок N_{out} , на основе которой вычисляется коэффициент применимости для каждого метода. В экспертной системе заложены критерии применимости 15 МУН. В качестве исходных данных вводятся геолого-физические характеристики целевого пласта. Далее программа вычисляет для каждой характеристики степень принадлежности по заданной функции, на основе которых складывается общий коэффициент применимости.

В результате производится ранжирование методов по степени их применимости к конкретным условиям коллекторов, и определяются приоритетные методы.

Проведение системных исследований накопленной информации позволило разработать технологию принятия решений по выбору МУН (рис. 4).

Предложенная технология оценки МУН позволяет моделировать степень влияния конкретных свойств пласта на выбранный метод.

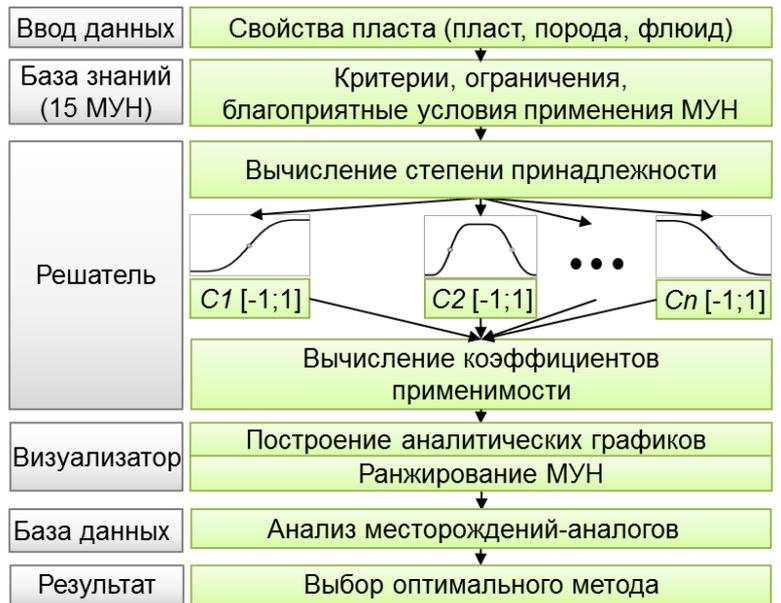


Рисунок 4 – Алгоритм оценки МУН в ЭС

Существует определенный переходный интервал входных значений параметров. Механизм нечеткой логики реализуется в этой переходной области (рис. 5).

Исследуемым коллекторам, значения свойств которых попадают в переходный интервал, присваивается более низкий коэффициент применимости.

На примере рисунка 5 степень принадлежности вычисляется как:

$$c_j = \begin{cases} -1, & x \leq 3 \\ x - 4, & 3 \leq x \leq 5 \\ 1, & 5 \leq x \leq 8 \\ 9 - x, & 8 \leq x \leq 10 \\ -1, & 10 \leq x \end{cases}$$

Коэффициент применимости

определяется как: $K_n = \left(\frac{p}{n}\right) \sum_j c_j$, при всех

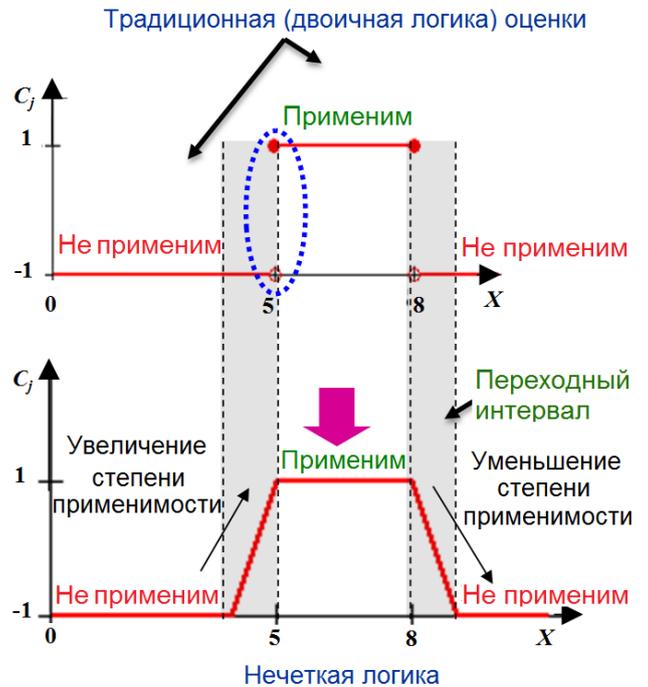


Рисунок 5 – Сравнение традиционной и нечеткой логики вычисления степени принадлежности

$c_j > 0$ и $K_m = \left(\frac{p}{n}\right) \sum_j^m c_j$, при условии, что хотя бы один $c_j < 0$.

Здесь c – степень принадлежности значения оцениваемого свойства заданной функции принадлежности; j – порядковый номер свойства пласта; m и n – количество отрицательных и общее количество коэффициентов принадлежности параметров для метода соответственно; p – фактор, определяющий границы интервала коэффициента применимости.

Коэффициент применимости варьируется в фиксированном интервале от -1 до 1 , который в свою очередь разбит на субинтервалы, отражающие степень применимости метода (рис. 6). После обработки входных данных экспертной системой вычисляются коэффициенты применимости и методы ранжируются в соответствии с диаграммой.

К приоритетным для внедрения система относит методы со значением коэффициента применимости более $0,25$. Чем ближе коэффициент применимости к единице, тем более предпочтительным является метод. Для разных методов с коэффициентами близкими (равными) по значению, возникает задача выбора оптимального метода из приоритетных. Происходит обращение к базе данных месторождений-аналогов и проектов МУН, предпочтение отдается методу, который эффективно применялся на месторождении-аналоге. Рассчитанные коэффициенты выносятся на диаграмму «методы – коэффициенты».

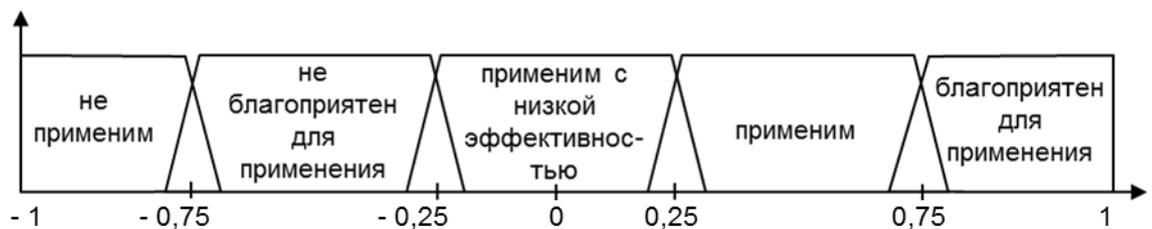


Рисунок 6 – Диаграмма функций принадлежности термов лингвистической переменной «степень применимости метода»

В четвертой главе описываются возможности разработанных алгоритмов оценки, работа модулей программы, приводятся основные характеристики экспертной системы.

В основу экспертной системы выбора МУН положен обширный фактический материал, сформированный в результате комплексного анализа накопленной информации, составляющий информационное наполнение базы данных и базы знаний по 15 методам увеличения нефтеотдачи и опыту их применения на нефтяных месторождениях. База данных экспертной системы представляет собой матрицу (48×834 из 24772 признаков), которая реализована в программном пакете MS Access. База данных содержит информацию о более чем 600 проектах внедрения МУН в России и мире в период с 1994 по 2012 гг. Также в программу заложена база функций принадлежности для оценки применимости МУН, выведенных в процессе выполнения работы.

Программная оболочка системы реализована в среде разработки программных приложений Microsoft Visual Studio 2010, в основе которой лежит использование языка C# для выполнения логических и математических операций.

Программа позволяет производить *оценку применимости 15 методов* и получать оперативные графики «методы – коэффициенты применимости». Отличительной особенностью ЭС является ее свойство иллюстрировать процесс поиска решений.

Разработанная программа выводит подсказки – рекомендации и ограничения для свойств пласта относительно каждого метода, а также строит ряд аналитических графиков и визуально выделяет благоприятные и неблагоприятные свойства. Это помогает оперативно и комплексно анализировать исследуемое месторождение.

В ЭС заложена уникальная авторская база данных использования МУН. На основе заложенной в ЭС базы данных существует возможность формировать и корректировать критерии применимости методов путем анализа успешных проектов применения МУН.

Экспертная система выполняет следующие функции: расчет степени принадлежности к заданным функциям принадлежности для каждого геолого-физического параметра исследуемого пласта; расчет коэффициента применимости для метода увеличения нефтеотдачи; вывод информации о методе, влиянии геолого-физического параметра пласта; построение аналитических графиков, лепестковых диаграмм для визуального анализа; поиск месторождений-аналогов в базе данных и вывод информации по данным месторождениям и опыту применения МУН.

На первом этапе в главном окне программы выводится оценка применимости МУН на исследуемом месторождении (рис. 7), дальнейшие этапы детального анализа выполняются в специальных модулях программы. Влияние свойств пласта на метод отображается с помощью лепестковых диаграмм.

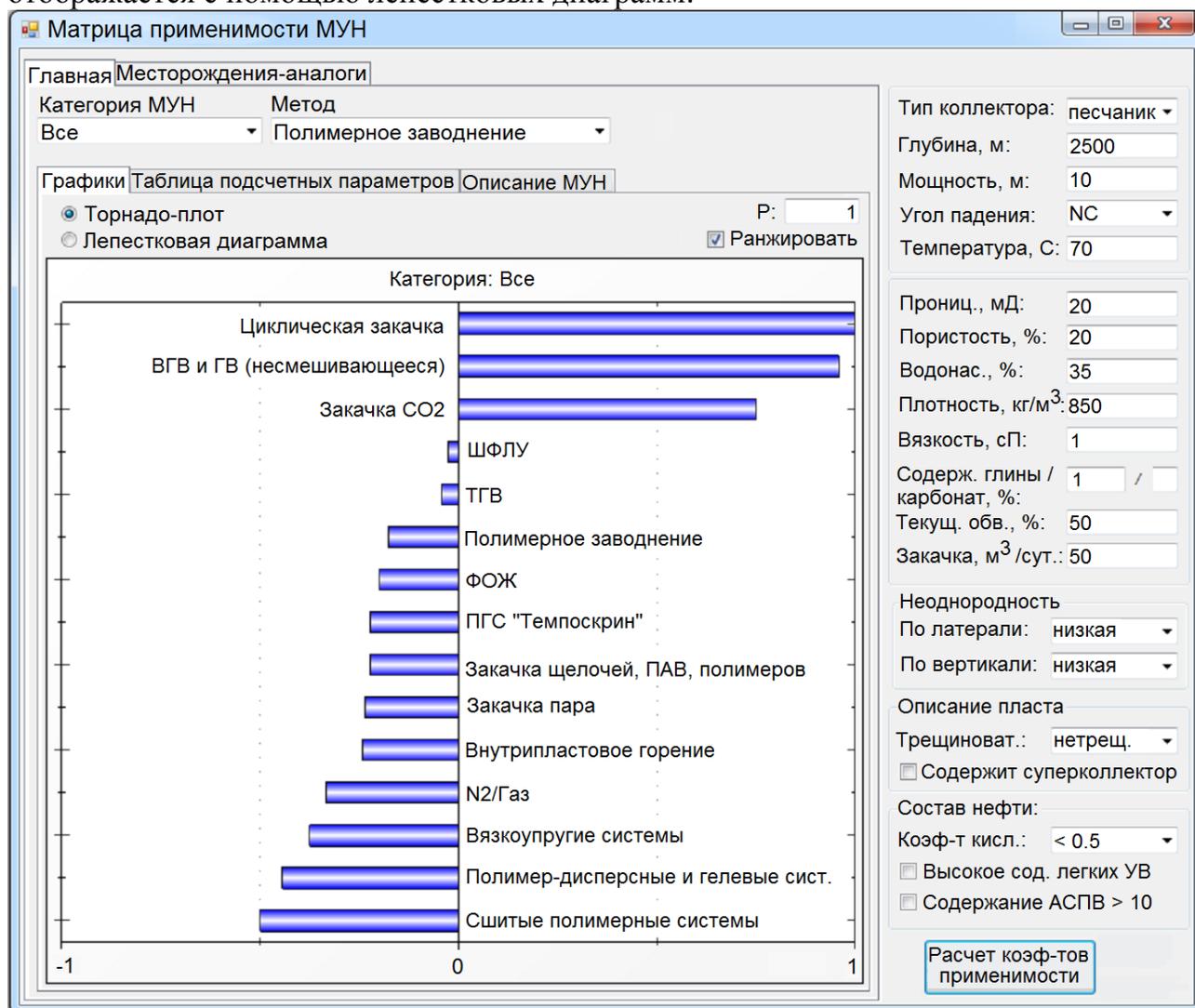


Рисунок 7 – Главное окно пользовательского интерфейса экспертной системы «Матрица применимости МУН»

В модуле «*Таблица подсчетных параметров*» визуализируется в цветовой шкале степень влияния свойства пласта на эффективность метода. Могут быть выведены рекомендации и ограничения относительно выбранного свойства для метода, а также ссылки на литературу. Модуль «*Кросс-плот*» позволяет оценить находятся ли свойства исследуемого пласта в диапазоне распределения свойств по опыту успешного внедрения метода и выбрать наиболее подходящий (рис. 8).

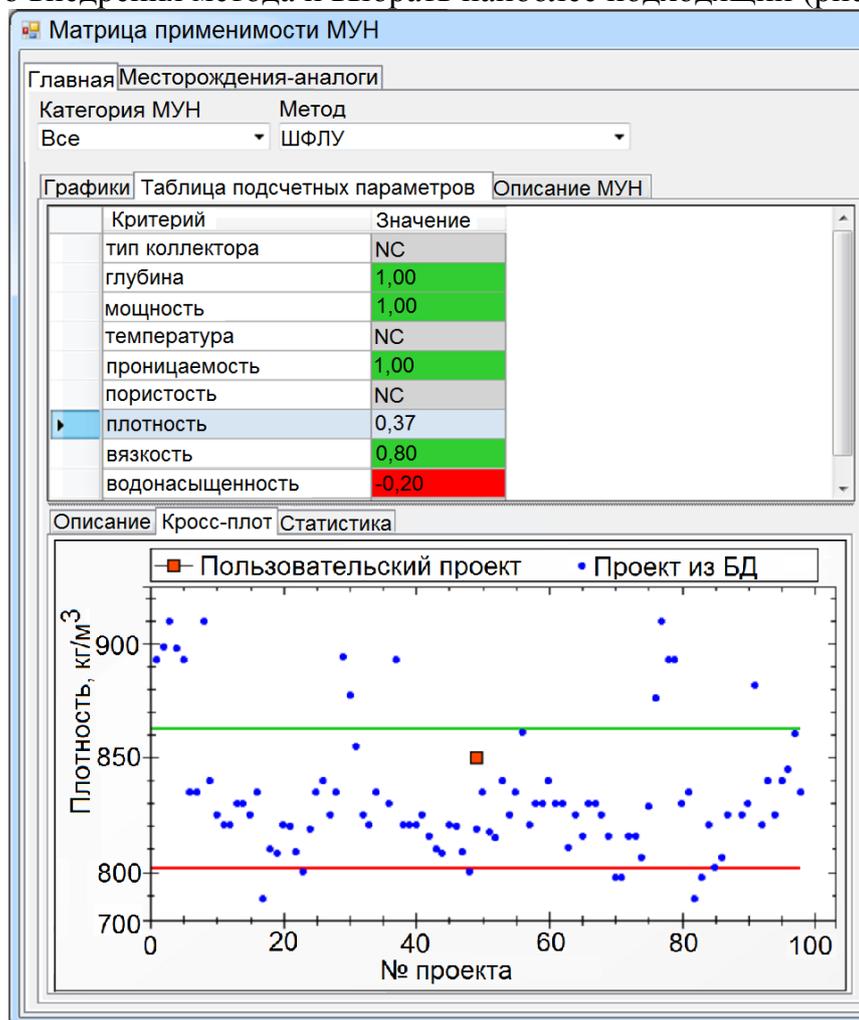


Рисунок 8 – Модули «Таблица подсчетных параметров» и «Кросс-плот»

Модуль «*Статистика*» выполняет следующие функции: вывод статистики по данным содержащимся в БД по геолого-физическим свойствам; расчет «Подходящего», «Возможного» интервалов применимости и вывод процента концентрации проектов в этих интервалах; расчет набора статистических параметров (среднеарифметическое, минимальное и максимальное значения, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации и др.). Модуль «*Поиск месторождений-аналогов*» (рис. 9) дает возможность использовать



Рисунок 9 – Структура системы поиска месторождений – аналогов

накопленный опыт применения МУН на Российских и зарубежных месторождениях.

В случае нахождения аналога в БД, выводится информация по месторождению-аналогу: название, локация и начало разработки месторождения, применяемый МУН, эффект от метода, а также полезные ссылки на литературу, где содержится информация о специфике реализации метода на конкретном месторождении.

В пятой главе представлены результаты апробации разработанных алгоритмов экспертной системы, обоснована корректность и эффективность выдаваемых решений. Проведен анализ ряда российских и зарубежных нефтяных месторождений. Выделены наиболее перспективные методы для внедрения на месторождениях Томской области.

В результате системных исследований разработанные алгоритмы оценки МУН адаптированы для месторождений Томской области и протестированы на результатах реальных примеров внедрения методов увеличения нефтеотдачи.

Решения, выдаваемые экспертной системой, сопоставлены с данными лабораторных исследований, математического моделирования и опыта применения МУН. Совпадение результатов подтверждает корректность и эффективность выдаваемых решений.

С помощью разработанных алгоритмов и специального программного обеспечения, реализованных в ЭС, проанализированы месторождения, в том числе, на которых уже проводили работы по применению МУН (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты экспресс-оценки месторождений в экспертной системе «Матрица применимости МУН»

№	Месторождение МУН	М 1	М 2	М 3	М 4	М 5	М 6
		Крапивинское, Ю ₁ ³	Игольско-Таловое (Игол. пл.), Ю ₁ ²	Советское АВ ₁	Первомайское, Ю _{10+1+1L}	Западно-Полуденное, АВ ₂	Приграничное (Пригр. площадь), Б ₉
1	N ₂ /Газ	-0,34	-0,29	-0,47	-0,30	-0,31	-0,36
2	СО ₂	0,75	0,76	-0,13	0,78	-0,05	-0,08
3	ШФЛУ	-0,03	-0,05	-0,13	0,65	-0,25	-0,13
4	ВГВ и ГВ несм.	0,82	0,80	-0,08	0,92	0,88	-0,01
5	ТГВ	0,88	0,88	-0,25	0,98	-0,14	-0,10
6	Закачка пара	-0,29	-0,37	-0,16	-0,27	-0,12	-0,34
7	ВПГ	-0,29	-0,26	-0,12	-0,24	-0,11	-0,21
8	Цикл. закачка	1,00	1,00	-0,15	1,00	1,00	0,89
9	ФОЖ	-0,40	-0,20	1,00	-0,20	1,00	-0,20
10	Полимерное заводнение	-0,22	-0,22	-0,09	-0,21	0,91	-0,15
11	Закачка полим., ПАВ, щелочей	-0,39	-0,36	-0,25	-0,28	-0,18	-0,30
12	СПС	-0,38	-0,50	-0,13	-0,50	-0,23	-0,50
13	ВУС	-0,38	-0,38	-0,13	-0,38	-0,13	-0,33
14	ПГС Темпоскр.	-0,22	-0,34	0,96	-0,18	0,89	-0,27
15	ПДС и ГС	-0,34	-0,49	0,94	-0,46	0,99	-0,37
	Число аналогов	12	13	1	13	5	3

Примечание: в таблице представлены значения итоговых коэффициентов применимости по 15 МУН.

Среди третичных МУН перспективными являются газовые методы, а также термогазовое воздействие. Значительная глубина пластов для этих методов играет положительную роль, так как способствует лучшей растворимости газа в нефти. Термические методы, такие как закачка пара и внутривластовое горение, не находят применения на данных месторождениях в связи с низкой вязкостью нефти и сравнительно высокой температурой пластов. Среди вторичных МУН более перспективной является циклическая закачка. Потокоотклоняющие технологии (ПОТ) на основе полимерно-гелевой системы «Темпоскрин», полимер-дисперсных и гелевых систем показали высокий коэффициент применимости на пласте АВ₂ Западно-Полуденного и АВ₁ Советского месторождения, которые имеют меньшую пластовую температуру и более высокую проницаемость, чем другие месторождения.

В некоторых случаях потокоотклоняющие методы (№№ 12 – 15, таблица 3) дают отрицательные значения коэффициентов применимости, что указывает на низкую эффективность метода. На практике потокоотклоняющие технологии показывали незначительную эффективность на ряде месторождений по результатам оценки проведенных МУН.

Для оценки обоснованности решений выдаваемых ЭС, проведено сравнение результатов анализа с результатами оценки эффективности применения МУН на месторождениях Томской области за 2010 г. Результаты, полученные с помощью ЭС, совпадают с показателями эффективности применяемых методов, что подтверждает достоверность решений, выдаваемых ЭС. В частности при оценке пласта АВ₁ Советского месторождения ПОТ показали высокий коэффициент применимости (0,94), в реальности по результатам оценки эффективности получен положительный как технологический, так и экономический эффект, дополнительная добыча на одну скважино-операцию составила 1,6 тыс. т, продолжительность эффекта от 0,5 до 1,5 лет. В случае пласта АВ₂ Западно-Полуденного месторождения коэффициент применимости ПОТ составил 0,99, по результатам оценки также получен положительный технологический и экономический эффект, дополнительная добыча 2,8 тыс. т. на одну скважино-операцию, продолжительностью до 2 лет. С другой стороны ПОТ, примененные на Приграничном месторождении, показали низкую технологическую эффективность 0,15 тыс. т. на одну скважино-операцию, продолжительность эффекта 4 месяца. При этом анализ в ЭС показал коэффициент применимости ПОТ в районе минус 0,25, то есть на границе «применим с низкой эффективностью» и «не применим».

Анализ, проведенный с помощью разработанных алгоритмов, показал, что на коллекторах Томской области не всегда недорогие потокоотклоняющие методы являются эффективными и необходимо рассматривать возможность внедрения современных технологий. Для каждого из указанных выше месторождений ЭС предложила по несколько перспективных для применения методов. Практика эксплуатации месторождений-аналогов, заложенная в БД, позволила выделить оптимальные методы для внедрения: с относительно низкими объемами капитальных вложений – циклическая закачка, ПОТ; высоко затратные – газовое и термогазовое воздействие. Рекомендации, выданные экспертной системой на основе разработанных алгоритмов, учтены при планировании МУН на месторождениях Томской области.

В заключении сформулированы общие выводы и приведены основные результаты, полученные в ходе работы.

В приложении представлены документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы: акт внедрения разработанных алгоритмов, реализованных в специальном ПО «Матрица применимости МУН», в ОАО «ТомскНИПИнефть» (г. Томск); свидетельство об официальной регистрации базы данных и свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе методов системного анализа обработана информация по применимости МУН, разработаны алгоритмы и программные средства, реализующие экспертную систему оценки применимости МУН в нечеткой среде, созданы актуальные базы данных и базы знаний. В работе достигнуты следующие результаты.

1. Проведен комплексный анализ накопленной информации по МУН, что позволило разработать базу знаний, в которой с учетом актуализированной информации по МУН и использования аппарата нечеткой логики сформированы функции принадлежности, дающие возможность получить преимущество над существующими системами – более корректно определять применимость и выделять оптимальный МУН для конкретных геологических условий.

2. Предложен алгоритм выбора и оценки методов увеличения нефтеотдачи на основе оценки геолого-физических характеристик месторождений с применением нечеткой логики, что позволяет эффективно применять разработанную экспертную систему в условиях неточности и неопределенности входной информации и снизить риски при выборе оптимального метода.

3. Разработаны алгоритмы и специальное программное обеспечение, реализующие экспертную систему «Матрица Применимости МУН» для комплексного оперативного анализа месторождений нефти как кандидатов для МУН.

4. В результате проведения системных исследований систематизирован и структурирован опыт применения МУН на нефтяных месторождениях, разработана база данных, содержащая более 600 проектов применения МУН в России и в мире на 537 месторождениях, что позволяет использовать опыт предшествующего внедрения МУН.

5. С помощью алгоритмов реализованных в экспертной системе «Матрица Применимости МУН» проведен анализ месторождений Томской области с целью оценки применимости МУН, что позволило выделить наиболее перспективные методы и разработать рекомендации по применению МУН.

6. Использование результатов диссертационной работы позволило сократить срок разработки производственной программы применения МУН при выполнении проекта разработки Северного месторождения ПР 833. Внедрение предложенных алгоритмов в ОАО «ТомскНИПИнефть» позволило оптимизировать процедуру подбора МУН на объекте ПК18-20.

Публикации по теме диссертации. Издания из перечня российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание степеней доктора и кандидата наук:

1. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М. Выбор методов увеличения нефтеотдачи на основе аналитической оценки геолого-физической информации // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321 – №. 1 – С. 149–154.

2. Мегалов А.Ю., Иванов Е.Н., Кононов Ю.М., Росляк А.Т. Пути решения проблем выбора и оценки эффективности методов увеличения нефтеотдачи на

месторождениях Западной Сибири // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14 – №. 1(8) – С. 2123–2127.

Свидетельства регистрации интеллектуальной собственности:

3. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М., Сивов Ю.А., Росляк А.Т. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Матрица применимости МУН» №2012660944 в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

4. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М., Росляк А.Т., Сивов Ю.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «Мировые и отечественные проекты МУН» №2012620655 в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

В других рецензируемых журналах не вошедших в перечень журналов рекомендованных ВАК:

5. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М. Выбор и оценка применимости методов увеличения нефтеотдачи на основе геолого–физической информации [Электронный ресурс] // Георесурсы, геэнергетика, геополитика. – 2012. – №. 1 (5) – С. 1–10. – Режим доступа: http://oilgasjournal.ru/vol_5/ivanov.html.

В других изданиях:

6. Кононов Ю.М., Экспертная система для выбора методов увеличения нефтеотдачи в условиях нечетких входных данных // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы IV Международной научно–технической конференции / Под ред. В.А. Углева. – Железногорск: Железногорский филиал СФУ, 2012. – С. 109–113.

7. Кононов Ю.М., Иванов Е.Н., Использование нечеткой логики в задачах аналитического моделирования методов увеличения нефтеотдачи // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно–практической конференции. – Томск: Изд–во ТПУ, 2012 – Т. 3 – С. 95–96.

8. Y.M. Kononov, E.N. Ivanov, Application of Fuzzy logic for enhanced oil recovery methods selection // Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the eighteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. – Tomsk: TPU Press, 2012.– P. 107–108. [Применение нечеткой логики для выбора методов увеличения нефтеотдачи].

9. Кононов Ю.М., Иванов Е.Н., Экспертно–диагностическая система для выбора методов увеличения нефтеотдачи в условиях нечетких входных данных // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: труды I Всероссийской конференции. – Томск: Изд–во ТПУ, 2012. – Т. 1 – С. 251–255.

10. Кононов Ю.М., Иванов Е.Н., Экспертно–диагностическая система для выбора методов увеличения нефтеотдачи в условиях нечетких входных данных // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: труды II Всероссийской НПК. – Томск: Изд–во ТПУ, 2012. – Т. 1 – С. 198–204.

11. Y.M. Kononov, E.N. Ivanov, Expert system for enhanced oil recovery methods selection with uncertain input data // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: труды II Всероссийской НПК. – Томск: Изд–во ТПУ, 2012. – Т. 2 – С. 236–239. [Экспертная система для выбора методов увеличения нефтеотдачи в условиях нечетких исходных данных].

12. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М. Программный комплекс для выбора методов увеличения нефтеотдачи на месторождениях Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск: Изд–во ТПУ, 2012. – Т. 2 – С. 80–81.

13. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М. Software tool for selection of enhance oil recovery methods in Western Siberia oil fields // Проблемы геологии и освоения недр:

труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – Т. 2 – С. 808–809. [Программный комплекс для подбора методов увеличения нефтеотдачи на месторождениях Западной Сибири].

14. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М. О возможности применения методов газового воздействия на нефтяные пласты // Проблемы геологии и освоения недр: Сб. науч. тр. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С.85–87.

15. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М., Мухамадиев Р.В. Разработка методики выбора методов увеличения нефтеотдачи на нефтяных месторождениях на основе геолого-физической информации // Увеличение нефтеотдачи – приоритетное направление воспроизводства запасов углеводородного сырья: Сб.науч.тр. – Казань, 2011, – С.229-232.