СБОРНИК ДОКЛАДОВ

НЕФТЕГАЗОВЫЕ РОССИЙСКИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

XII научно-практическая конференция

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ РАЗРАБОТКИ И ОБУСТРОЙСТВА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

23–25 АПРЕЛЯ 2019,
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ (ПЕТЕРГОФ)

Организатор НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО

При поддержке ГАЗПРОМ НЕФТЬ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XII научно-практической конференции

Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений

ЗАО «Издательство «НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО»
Москва
2019

СОДЕРЖАНИЕ

Анкудинов А.А., Полякова Н.С., Радевич Ю.Е.
Мониторинг разработки месторождения с использованием статистических методов анализа на примере перфорационных работ 5

Антонов И.Д.
Квазитрехмерная модель развития трещины при пенном гидроразрыве пласта 6

Асмандияров Р.Н., Зулькарниев Р.З., Воробьев Д.С., Студинский Р.Н.
Цифровизация процессов подбора скважин для проведения геолого-технических мероприятий – достигнутые результаты и планы развития 7

Баюк И.О., Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А.
Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов 8

Вольпин С.Г., Ломакина О.В., Афанаскин И.В., Штейнберг Ю.М., Юдин В.А.
Анализ динамики подвижных запасов нефти в сложных и нетрадиционных коллекторах 9

Вышенская М.И., Оленчиков Д.М., Посвянский Д.В.
Обобщение метода CRM для пластов с упруговодонапорным режимом 10

Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р.
Математическое моделирование динамики выбросов углеводородов в океане и их накопления в куполе-сепараторе 11

Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Хасанов М.К.
Математическая модель теплофизических процессов в пласте при образовании газогидратов 12

Гришагин А.В.
Математическое моделирование коллектора нефтяной залежи.....13

Груздев А.П., Симонов Ю.П., Семенихин А.С., Симон И.В., Корябкин В.В.
Определение литологии на забое скважин в процессе бурения 14

Давлетбаев А.Я., Уразов Р.Р., Синицкий А.И., Нуриев А.Х., Зарафутдинов И.А.
Совершенствование методов и инструментов анализа «малозатратных» гидродинамических исследований скважин по месторождениям с низкопроницаемыми коллекторами.....15

Дивнич С.
Адаптация результатов лабораторных исследований фильтрации полимерного раствора на секторной модели 16

Дубиня Н.В.
Закономерности в пространственной ориентации и положении флюидопроводящих естественных трещин в окрестностях крупных разломов.....17

Евстафьев Д.А.
Сопровождение разработки рифогенных отложений Волгоградской области с применением геолого-гидродинамических моделей.....18

Емельянов В.В.
Доманиковые отложения как потенциальный объект нефтедобычи и источник восполнения ресурсной базы Республики Татарстан.....19

Емченко О.В., Газизов Р.К., Гринин В.О.
Марковские цепи применительно к моделям гетерогенных сред 20

Емченко О.В., Салимгареева Э.М., Маклецов Е.В.
Методика моделирования карбонатных трещинных коллекторов. Обобщенный опыт.....21

Калугин А.А., Алексеева А.Д., Торопов Э.С., Стариков В.С., Касаткин В.Е.
Моделирование петрофизических кубов на примере пластов группы АВ
Ватьеганского месторождения 22

Кашапов Д.В., Продан А.С., Бочкарев А.В., Коробицын Д.А., Торба Д.И.,
Родионов В.В., Янаев А.М., Кузнецов В.А., Буков О.В.
Разработка прогнозной характеристики развития стимулированного
объема пласта (SRV) в баженовской свите при производстве операций
многостадийного гидроразрыва пласта в условиях различных
геолого-геомеханических свойств пласта и технологических параметров
гидроразрыва пласта 23

Крутько В.В., Белозеров Б.В.
Опыт создания инструментов технологии «Цифровой керн» 24

Крыганов П.В., Афанаскин И.В., Вольпин С.Г.
Применение мультискважинной деконволюции при решении
обратной задачи подземной гидродинамики 25

Кульневич А.Д., Егоров Д.В., Белозеров Б.В.
Применение современных цифровых технологий и алгоритмов машинного обучения
в задачах интеллектуальной оцифровки картографических данных.....26

Лапин Р.Л., Цаплин В.А., Кузькин В.А.
Моделирование процесса гидравлического разрыва пласта
в слоистой анизотропной трещиноватой среде методом динамики частиц.....27

Марков Н.С.
Учет разнородности упругих модулей в модели Planar3D 28

Насырова М.И., Имашев Р.Н., Шубин С.С.
Численное моделирование эрозионного износа элементов оборудования системы
сбора газа в условиях выноса механических примесей из пласта.....29

Новиков А.В., Посвянский Д.В.
Оценка неопределенности в задаче построения карт пластового давления 30

Панов В.А., Быков А.А., Завьялова Н.А., Невмержицкий Я.В.
Приближенное выражение для объема нагнетаемой жидкости
в пласт от времени при полимерном заводнении 31

Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Патрушев И.И., Овчинникова А.С.,
Гриф А.М., Насыбуллин А.В., Орехов Е.В.
Разработка программного обеспечения гидротермодинамического
моделирования третичных методов увеличения нефтеотдачи.....32

Подольский А.К., Фомкин А.В., Петраков А.М., Байкова Е.Н., Раянов Р.Р.
Повышение эффективности планирования и контроля мероприятий
по выравниванию профиля приемистости путем автоматизации процесса
подбора скважин-кандидатов.....33

Попкова М.И., Васин С.С., Грезин А.В.
Актуализация геологической модели с учетом анализа разработки и обстановки
осадконакопления на примере залежи 1 пласта $ЮС_1^1$ Кустового месторождения 34

Старобинский Е.Б., Мущак Н.Д.
Методы ускорения явной расчетной схемы в модели Planar3D 35

Тихомиров С.Б., Яковлев А.А.
Моделирование эффекта вязких пальцев при эксплуатации
месторождения горизонтальными скважинами 36

Хафизов Р.Р., Латифуллин Ф.М., Саттаров Рам.З., Шарифуллина М.А., Яртиев А.Ф.
Оптимизация расстановки проектных точек на основе вариативной плотности
сетки скважин с использованием программного модуля
технико-экономической оценки запасов нефти 37

Хисматуллина Ф.С., Демид М.С.
Автомодельное решение задачи нестационарного тепло- и массопереноса
при воздействии высокочастотным электромагнитным полем на залежи
высоковязких нефтей, содержащих твердую углеводородную фазу 38

Хисматуллина Ф.С., Хатмуллина А.И.
Математическая модель фильтрации высоковязких парафиносодержащих
нефтей при воздействии высокочастотным электромагнитным полем 39

Шварёв Н.Г., Марков Н.С.
Генерация микросейсмической активности при распространении
трещины гидроразрыва пласта 40

Шевко Н.А.
Численное моделирование залежей с высокопроводящими разломами 41

Шевко Н.А.
Оптимизация детальности гидродинамической модели для ускорения
процесса адаптации на историю разработки 42

Шишаев Г.Ю., Матвеев И.В., Еремян Г.А., Демьянов В.В., Кайгородов С.В.
Геологически обоснованная автоматическая адаптация гидродинамических
моделей на примере реального месторождения 43

Шляпкин А.С., Татосов А.В.
Математическая модель движения проппанта в трещине гидроразрыва 44

УДК 622.245.142

Мониторинг разработки месторождения с использованием статистических методов анализа на примере перфорационных работ

А.А. Анкудинов, Н.С. Полякова, Ю.Е. Радевич
(Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени)

В условиях длительной разработки месторождения для повышения продуктивности скважин проводят различные геолого-технические мероприятия (ГТМ) по интенсификации притока, в том числе перфорационные работы (дострел неперфорированного ранее интервала и перестрел уже работающего). Особенность данного метода – не высокая стоимость, а прогнозирование эффекта может проводиться по небольшому числу исходных параметров. Часто полученный эффект от мероприятия не соответствует ожидаемому, в связи с чем возникает необходимость прогнозирования результатов с более высокой точностью.

В работе в качестве объекта исследования выбран объект $БВ_8$ Повховского месторождения в связи с достаточным для анализа объемом фактически проведенных дострелов – 1376 мероприятий.

Целью является поиск зависимостей между влияющими параметрами и эффективностью мероприятий для построения математических моделей с применением стандартного пакета «Анализ данных» MS Excel и методов Data Mining (регрессия нейронной сети, линейная регрессия), позволяющих выбирать скважины-кандидаты для проведения данного мероприятия. Подход, используемый в работе, может быть распространен на другие эксплуатационные объекты и месторождения, а также на другие виды ГТМ.

УДК 622.276.66СГ

Квазитрехмерная модель развития трещины при пенном гидроразрыве пласта

И.Д. Антонов
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, НОЦ «Газпромнефть-Политех»; Институт проблем машиноведения РАН)

Предложена ячеистая квазитрехмерная модель пенного гидроразрыва пласта (ГРП), учитывающая сжимаемость газовой фазы аналитически полученными соотношениями и реологию пены путем использования эмпирических соотношений для степенной модели жидкости, определенных в результате экспериментальных исследований. Они связывают коэффициент густоты потока и показатель поведения с изменяющимся вдоль трещины качеством пены – объемной долей газовой фазы. Плотность пены также связана с качеством пены. Таким образом, уравнение, связывающее давление жидкости с качеством замыкает систему уравнений модели, что показано в работе.

Система модельных уравнений сводится к сложному дифференциальному уравнению относительно усредненного по сечению раскрытию трещины и решается неявным методом с использованием внутренних итераций для соблюдения законов сохранения. Представлены численные результаты, их анализ качественно и количественно определяет преимущества пенных жидкостей при проведении ГРП.

УДК 622.276.76

Цифровизация процессов подбора скважин для проведения геолого-технических мероприятий – достигнутые результаты и планы развития

Р.Н. Асмандияров, Р.З. Зулькарниев, Д.С. Воробьев, Р.Н. Студинский
(Научно-технический центр «Газпром нефти»)

В рамках цифровизации процессов геолого-технических мероприятий (ГТМ) в научно-техническом центре «Газпром нефти» с 2015 г. по настоящее время используется информационная система «Подбор ГТМ» (ИС «Подбор ГТМ») по выбору скважин для проведения гидроразрыва пласта (ГРП), многостадийного гидроразрыва (МГРП), зарезки боковых стволов, уплотняющего бурения, переводов скважин на выше- и нижележащие пласты, ремонтно-изоляционных работ.

Цель проекта – повышение эффективности программ ГТМ с использованием цифровых систем в процессах выбора скважин-кандидатов.

Получен опыт и оценены возможности цифровой системы на объектах, различающихся по геологическому строению и стадиям разработки, выбрано направление развития системы.

Новизна проекта заключается в разработке алгоритмов и критериев выбора ГТМ, реализованных в цифровой информационной системе ИС «Подбор ГТМ». Цифровизация позволяет автоматизировать процессы выбора скважин для проведения ГТМ по критериям, задаваемым пользователем, оценивать потенциал, формировать рейтинг мероприятий для проведения ГТМ. Интеграция и обновление ИС «Подбор ГТМ» в «ГРАД» увеличит долю автоматизации процессов ГТМ еще на один порядок, это позволит сделать систему единой, гибкой и развивающейся.

УДК 550.8.072

Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов

И.О. Баюк, Н.В. Дубиня, С.А. Тихоцкий
(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН)

Проанализированы основные проблемы петроупругого моделирования трещиноватых карбонатных пород. К таким проблемам относится выбор метода теории эффективных сред (Rock Physics) для связи параметров математической модели эффективных упругих свойств коллектора со скоростями упругих волн, полученными в эксперименте. Показано, что даже в простой модели трещиноватого коллектора различие в скоростях упругих волн, полученных разными методами, может достигать 40 %.

Другой проблемой является построение модельной среды, адекватно отражающей особенности внутреннего строения породы в рассматриваемом масштабе. В связи с этим уделено внимание сложнопостроенным карбонатным коллекторам, в которых неучет особенностей распределения изометричной пористости изменяет скорости упругих волн, что может быть ошибочно объяснено влиянием трещиноватости. К коллекторам такого типа относятся оолитовые известняки и коллекторы, содержащие каверны.

Рассмотрена также проблема соответствия масштабов, на которых строится петроупругая модель породы, и измерены ее упругие свойства. Показано, что разница значений импедансов (как акустических, так и сдвиговых), полученных на одной и той же глубине в масштабе геофизических исследований скважин (ГИС) и сейсморазведки, может достигать 20 % и более.

Проанализирована проблема различия петрофизических зависимостей, например, скорость – пористость, полученных на керне и по данным ГИС, в связи с чем рассмотрен сложнопостроенный карбонатный коллектор Юрубчено-Тохомской зоны.

Особое внимание уделено проблеме обнаружения и характеристики флюидопроводящих трещин в масштабе сейсморазведки. Для решения предложен подход, который основан на результатах геомеханического и петроупругого моделирования и дает возможность не только выделить системы флюидопроводящих трещин, но и охарактеризовать их, используя количественные параметры ориентации, объемную концентрацию, относительное раскрытие и степень связности.

УДК 622.276.1/.4(571.1)

Анализ динамики подвижных запасов нефти в сложных и нетрадиционных коллекторах

С.Г. Вольпин, О.В. Ломакина, И.В. Афанаскин, Ю.М. Штейнберг, В.А. Юдин
(«Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»)

Поскольку разработка нефтяных залежей, приуроченных к нетрадиционным коллекторам, примером которых являются отложения баженовской свиты, осуществляется при упругом режиме, информативными средствами получения данных о пласте являются гидродинамические исследования пластов и скважин, а также мониторинг энергетического состояния залежи.

Диагностика кривых восстановления давления, зарегистрированных в скважинах, которые вскрыли баженовские отложения на некоторых нефтяных месторождениях Западной Сибири, указывает на то, что коллектор представляет собой пласт, состоящий из двух сред различной проницаемостью и с разными текущими пластовыми давлениями. Для расчетов добычи нефти необходимо знать энергетическую обстановку залежи. Для решения этого вопроса использованы материалы ранее проведенного эксперимента по длительной остановке скважин на Салымском месторождении.

Анализ результатов эксперимента подтвердил то, что пласт-коллектор баженовской свиты представляет собой систему, состоящую из сообщающихся между собой высокопроводящей среды малого объема и низкопроницаемой среды большого объема. При этом основная добыча нефти осуществляется из низкопроницаемой среды.

УДК 622.276.1/.4

Обобщение метода CRM для пластов с упруговодонапорным режимом

М.И. Вышенская, Д.М. Оленчиков, Д.В. Посвянский
(Компания Roxar)

Одним из перспективных подходов к построению упрощенных (по сравнению с 3D гидродинамическими) моделей месторождений, позволяющим проводить экспресс-анализ разработки месторождений, является применение емкостно-резистивных моделей (CRM), которые основаны на совместном использовании уравнения материального баланса и уравнения притока к скважинам. Однако все они неявно предполагают отсутствие перетоков через границу области моделирования. Использование таких подходов для моделирования пластов с упруговодонапорным режимом приводит к заметным ошибкам при прогнозных расчетах. Работ, посвященных явному учету наличия водоносного горизонта в рамках CRM подхода, не так много. Показано, что изменение режимов эксплуатации скважин при прогнозных расчетах может изменять коэффициенты интерференции скважин, что в свою очередь снижает прогнозную точность моделирования.

Целью работы является модификация стандартного подхода CRM, позволяющая увеличить точность оперативного прогноза показателей разработки в условиях упруговодонапорного режима при существенном изменении режимов эксплуатации скважин.

На синтетических примерах, использующих в качестве эталона гидродинамические модели, показано, что:

– предложенные модификации улучшают сохранение прогнозной способности модели при изменении режимов эксплуатации скважин;

– CRM модели могут быть использованы для экспресс-оценки различных гипотез геологического строения месторождения, а также для грубой идентификации ряда некоторых параметров гидродинамических моделей.

Предложенный подход опробован на данных разработки одного из месторождений. Показана эффективность метода для краткосрочных (около года) прогнозов показателей его разработки. При вводе новых скважин или существенном перераспределении зон дренирования может потребоваться переобучение модели.

УДК 502.65:622.276

Математическое моделирование динамики выбросов углеводородов в океане и их накопления в куполе-сепараторе

И.К. Гималтдинов
(Уфимский государственный нефтяной технический университет),
С.Р. Кильдибаева
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)

Техногенное распространение затопленных струй связано с повреждением скважины или трубопровода при глубоководной добыче. Для того, чтобы устранить такую утечку, необходимо рассчитать траекторию распространения струи, а также ее параметры, например, температуру, плотность и скорость. Эти данные необходимы для прогнозирования динамики струй в океане. Исследование особенностей течения струй позволит выдвинуть предварительную гипотезу относительно поведения струи и уменьшить время ликвидации утечки. Одним из эффективных методов быстрой ликвидации подводных разливов является установка купола-сепаратора над местом их утечки. Такие устройства способны проводить сбор и дальнейшую транспортировку накопленных углеводородов.

Согласно принятому для рассмотрения интегральному лагранжевому методу контрольного объема (ИЛМКО) струя рассматривается в виде последовательности элементов цилиндрической формы с известными линейными размерами. В результате расчетов ИЛМКО получены зависимости теплофизических характеристик многофазной затопленной струи, а также вид ее траектории. Предложена математическая модель накопления и расслоения углеводородов в куполе-сепараторе.

УДК 622.276.76

Математическая модель теплофизических процессов в пласте при образовании газогидратов

И.К. Гималтдинов, М.В. Столповский
(Уфимский государственный нефтяной технический университет),
М.К. Хасанов
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)

Построена математическая модель образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности с формированием протяженной области фазовых переходов. Рассмотрена одномерная задача об образовании газогидрата в пористом пласте конечной протяженности при закачке холодного газа через левую границу пласта. Для теоретического описания процессов тепломассопереноса в пористой среде приняты следующие допущения: пористость среды постоянна, ее скелет, гидрат и вода несжимаемы и неподвижны. Кроме того, принимается однотемпературная модель пористой среды, т.е. модель, в которой температура среды и насыщающего ее вещества в каждой точке совпадают. В рассмотренной задаче выделяются три характерные области: ближняя (поры заполнены газом и гидратом), промежуточная (газ, гидрат и вода находятся в равновесии), дальняя (заполнена газом и водой). В промежуточной зоне происходит процесс гидратообразования. Соответственно, образуются две подвижные поверхности: между дальней и промежуточной областями, где начинается переход воды в гидрат; между ближней и промежуточной областями, на которой процесс образования гидрата заканчивается.

Численными расчетами получены распределения по координате для температуры и гидратонасыщенности. Установлено, что нагнетание холодного газа, сопровождающееся образованием гидрата, приводит к нагреву пласта. При этом образование гидрата происходит в два этапа: на первом этапе происходит частичное образование в объемной зоне, на втором – полная гидратация пористой среды.

Получена зависимость температуры на ближней границе от давления нагнетаемого в пласт газа. Установлено, что при увеличении давления нагнетаемого газа и проницаемости пласта температура на ближней границе гидратообразования становится выше начальной пластовой температуры. Это обусловлено тем, что давление в пласте значительно превышает равновесное давление, соответствующее исходной температуре. При этом равновесная температура гидратообразования повышается с ростом давления, а с увеличением давления закачиваемого газа и снижением проницаемости пласта давление возрастает. Таким образом, подача холодного газа в пласт приводит к его нагреву.

УДК 622.276.1/4+551.252+658.012.011.56:519.2

Математическое моделирование коллектора нефтяной залежи

А.В. Гришагин
(ООО «СамараНИПИнефть)

Формализация и анализ коллектора нефтяной залежи с использованием математической теории множеств с обеспечением ковариантного перехода на прикладное моделирование позволяет рассмотреть тип исследуемого объекта (поровый, трещиноватый, порово-трещиноватый и трещиновато-поровый). В качестве конкретных характеристик при теоретико-множественном моделировании использованы значения поровой, трещинной проницаемости и общей проницаемости матрицы породы коллектора. Анализ в координатах таких характеристик, приведенных к безразмерным параметрам, позволяет интерпретировать исследуемый коллектор по степени сложности.

В процессе перехода от теоретико-множественного моделирования к прикладной области при решении задачи прогнозирования типа коллектора учтена характеристика значительного элемента случайности, что предопределило использование вероятностных методов.

Статистические исследования проводились с использованием вычислительной программы POISK, специально разработанной автором. Исследовано 70 факторов, характеризующих залежи углеводородов. По результатам исследований получена модель нефтяной залежи с группами главных факторов (поисковыми признаками – 20 признаков); разработана и сертифицирована программа прогноза типа коллектора по косвенным поисковым признакам PROGNorm.

УДК 622.24(4/9)

Определение литологии на забое скважин в процессе бурения

А.П. Груздев, Ю.П. Симонов, А.С. Семенихин
(IBM),
И.В. Симон, В.В. Корябкин
(Научно-технический центр «Газпром нефти»)

В процессе бурения высокотехнологичных нефтяных и газовых скважин информация о типе породы и ее свойствах на забое поступает от каротажных приборов. Решения о корректировке траектории скважины или режима бурения принимаются на основе данных, поступающих с существенной задержкой. Недостаточно оперативное решение о корректировке траектории после выхода из целевого интервала может привести к негативным последствиям при геонавигации.

В данной работе предложен подход к определению литологической разности на забое скважины в процессе бурения на основании анализа технологических данных геолого-технологических исследований в режиме реального времени при помощи методов машинного обучения. Кроме того, представлены подходы к прогнозированию показаний каротажей ГГКп и ННКТ на забое скважины.

Апробация результатов проведенных исследований выполнена на исторических данных бурения Новопортовского месторождения. Установлено, что система, разработанная на основании данных исследований, может корректно распознать два из трех изменений литотипов в процессе бурения. Достигнутое качество определения литологической разницы делает возможным применение методологии для решения задач геонавигации при бурении скважин.

УДК 622.276.5.001.5

Совершенствование методов и инструментов анализа «малозатратных» гидродинамических исследований скважин по месторождениям с низкопроницаемыми коллекторами

А.Я. Давлетбаев, Р.Р. Уразов, А.И. Синицкий, А.Х. Нуриев, И.А. Зарафутдинов
(ООО «РН-БашНИПИнефть»)

В настоящее время существует ряд коммерческих программных продуктов, позволяющих анализировать и интерпретировать результаты анализа дебита и давления (АДД) и мини-гидроразрыва пласта (мини-ГРП) в горизонтальных скважинах (ГС) с многостадийным ГРП в горизонтальных скважинах (ГС с МГРП). Проанализированы причины невысокой информативности исследований методом АДД и миниГРП в ГС с МГРП. Так, при АДД необходимо восстанавливать значительное число параметров модели (начальное пластовое давление, проницаемость пласта, проводимость трещины, полудлину трещины и др.). При анализе данных мини-ГРП необходимо знать высоту трещины, модель ее развития, которая описывает изменение геометрии трещины ГРП при нагнетательном тесте. Массовое внедрение «малозатратных» методов исследований скважин требует расширения существующих инструментов и дополнения подходов к интерпретации АДД и миниГРП.

Предложена методика интерпретации данных АДД в ГС с МГРП, которая реализована и апробирована в расчетных модулях. Представленная методика позволяет комбинировать имеющиеся источники информации, а также учитывать результаты промыслово-геофизических исследований по определению профиля притока в ГС с МГРП при расчете полудлин трещин на каждой стадии. Апробация предложенного подхода на промысловых данных показала хорошее совпадение модельных и промысловых зависимостей изменения дебита и накопленной добычи.

УДК 622.276.43:678

Адаптация результатов лабораторных исследований фильтрации полимерного раствора на секторной модели

С. Дивнич
(НТЦ НИС а.д.)

Одним из эффективных методов увеличения нефтеотдачи (МУН) является полимерное заводнение эксплуатационного объекта, позволяющее выравнивать фронт вытеснения и вовлечь в дренирование низкопроницаемые прослои.

Опция моделирования полимерного заводнения реализована в большинстве коммерческих симуляторов. Однако применение результатов лабораторных исследований фильтрации раствора непосредственно в гидродинамических моделях не всегда корректно. Это связано, во-первых, с ограничением и допущением математического описания фильтрации вязкого раствора в комбинации с моделью черной нефти, во-вторых, с отношением объема, исследованного в лаборатории, к объему резервуара. Неполный анализ с учетом вышеизложенного может привести к ошибочной оценке прогнозных результатов воздействия на эксплуатационный объект.

Для месторождения J, находящегося в Паннонском бассейне, был выбран соответствующий полимер и проведены реологические исследования. Основная задача исследования – оценка главных параметров неопределенности и разработка подхода к их снятию. Актуальность работы состоит в авторском подходе к решению задачи.

Полный цикл лабораторных исследований еще не завершен. Для имеющегося набора данных проведена настройка параметров для более точного отображения фильтрации вязкого флюида в поровом пространстве.

УДК 622.276.1/.4.001.57

Закономерности в пространственной ориентации и положении флюидопроводящих естественных трещин в окрестностях крупных разломов

Н.В. Дубиня
(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН)

Рассмотрена проблема моделирования трещиноватости, развивающейся в карбонатных породах в окрестности крупного разлома. Изучено влияние разлома на основные закономерности, наблюдаемые при изменении предпочтительной пространственной ориентации и положения естественных трещин. Отдельное внимание уделено возможности выделения из множества трещин флюидопроводящих. Такое выделение выполнено на основании принятой в геомеханических исследованиях гипотезы о наличии связи критически напряженных и флюидопроводящих трещин.

Представлен алгоритм, согласно которому результаты трехмерного геомеханического моделирования могут быть использованы для определения относительного числа флюидопроводящих трещин и их предпочтительной пространственной ориентации.

Работа алгоритма показана на ряде синтетических моделей коллекторов, характеризующихся наличием крупного разлома. Продемонстрировано, как по мере приближения к разлому увеличивается число трещин, являющихся флюидопроводящими, а их предпочтительная пространственная ориентация оказывается непосредственно связанной с ориентацией разлома относительно направлений действия тектонических напряжений. Показано, что разломы различных типов существенно по-разному влияют на закономерности пространственной ориентации и положения трещин. Полученные результаты соответствуют результатам аналогичных работ, выполненных для одного из нефтегазовых месторождений России.

Представленный алгоритм использования результатов геомеханического моделирования для построения модели трещиноватости с возможностью выделения флюидопроводящих трещин существенно расширяет возможности геомеханики для решения задач оптимизации разработки трещиноватых коллекторов.

УДК 622.276.1/.4(470.4)

Сопровождение разработки рифогенных отложений Волгоградской области с применением геолого-гидродинамических моделей

Д.А. Евстафьев (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть» в г. Волгограде)

Представлен опыт применения геолого-гидродинамического моделирования с целью сопровождения разработки залежей евлановско-ливенского и семилукско-рудкинского горизонтов месторождений Волгоградской области. В зависимости от задач, которые решаются с применением геолого-гидродинамического моделирования (ГГДМ) на каждом конкретном месторождении создаются двух- или трехфазные модели двойной или одинарной среды. Построенные ГГДМ позволяют детально воспроизвести фактическую добычу нефти и жидкости, динамику пластового и забойного давлений, фактическую скорость подъема водонефтяного контакта (ВНК).

На примере сопровождения разработки залежи евлановско-ливенского горизонта Памятно-Сасовского месторождения предложены методы повышения нефтеотдачи и рациональной разработки пластов: бурение боковых стволов; проведение ремонтно-изоляционных работ; закачка воды ниже уровня ВНК; закачка водогазовой смеси.

Сопровождение разработки рифогенных залежей с применением ГГДМ обеспечивает высокую степень выработки запасов нефти.

УДК 622.276.1/.4(470.4)

Доманиковые отложения как потенциальный объект нефтедобычи и источник восполнения ресурсной базы Республики Татарстан

В.В. Емельянов
(НГДУ «Прикамнефть» ПАО «Татнефть»)

В условиях высокой степени выработки запасов основных крупных месторождений одним из методов повышения прибыли является ввод в разработку объектов с нетрадиционными запасами нефти, в том числе слабопроницаемых доманиковых коллекторов, которые ранее классифицировались как неколлекторы.

В рамках программы опытно-промышленных работ 2016–2018 гг. по выявлению и разработке залежей нефти доманиковых отложений в экспериментальных скважинах были проведены и отработаны различные методы стимуляции пластов. Полученные результаты подтвердили их эффективность.

Для определения закономерностей распространения залежей были проведены сбор и анализ исходной информации по скважинам Бондюжского месторождения, из которых получены притоки нефти. Проведено моделирование. На основании результатов выполненной работы и анализов сделаны выводы о перспективности разработки карбонатных коллекторов саргаевского горизонта на территории северо-востока Республики Татарстан. Перспективными для испытания и ввода в разработку являются северный и центральный блоки Бондюжского месторождения, где будут проведены основные работы.

За большой период изучения доманиковых отложений накоплен значительный фактический материал, обобщение и переинтерпретация которого на основе современных технологий и достижений геологической науки позволят перейти к научно-обоснованному прогнозированию, оконтуриванию и освоению продуктивных зон. Ожидаемые результаты позволят сосредоточить геолого-разведочные работы на высокоперспективных участках, отличающихся улучшенными фильтрационными свойствами и соответственно повышенными добычными возможностями скважин. Кроме того, будут геологически обоснованы технологические решения по эффективному освоению нефтяного потенциала доманиковых отложений.

УДК 551.7.022

Марковские цепи применительно к моделям гетерогенных сред

О.В. Емченко
(ООО «Уфимский НТЦ»),
Р.К. Газизов, В.О. Гринин
(Уфимский государственный авиационный технический университет)

В современном геологическом моделировании на уровне работы любого геологического симулятора неиспользуемым остается огромный пласт давно и хорошо структурированной информации о порядке и правилах взаимосочетания фаций в определенных условиях осадконакопления.

Марковский процесс, так же как и гауссов, случайный процесс, но с учетом истории состояний на предыдущем шаге процесса. Идея использования марковских цепей – частного случая марковского процесса, когда пространство его состояний дискретно, в геологическом моделировании не нова, подобные попытки (на уровне анализа и обработки данных) предпринимались еще в 70-х годах двадцатого столетия. Эта методика не получила распространения, что, по-видимому, связано с широким распространением идей Жоржа Матерона и его работ по прикладной геостатистике.

Суть предлагаемой и успешно отработанной на ряде месторождений методики сводится к заданию правил перехода между фациями с вероятностью, определяемой при статистической обработке данных геофизических исследований скважин (ГИС). Большое число работ, связанных с выделением фаций в определенных условиях осадконакопления, позволяют задать строго ограниченные рамки выбора соседних фаций, т.е. идея марковской цепи, в которой «будущее» процесса зависит от «прошлого» лишь через «настоящее» для счетного числа состояний (фаций), четко ложится в логику фациального моделирования. Это с учетом рассчитанной для конкретных условий осадконакопления на реальных данных ГИС матрицы перехода наилучшим образом вписывается в концепцию фациального моделирования, причем не в режиме ручного выделения фаций и дальнейших попыток распространения свойств в «фациях» стохастическим гауссовым процессом, а прямым распространением свойств на основе рассчитанной матрицы перехода.

УДК 553.98.061.43

Методика моделирования карбонатных трещинных коллекторов. Обобщенный опыт

О.В. Емченко, Э.М. Салимгареева, Е.В. Маклецов
(ООО «Уфимский НТЦ»)

Каждый трещиноватый коллектор требует своих подходов к разработке концептуальной и технологической моделей. Многолетний опыт работы с такими коллекторами показал необходимость создания комплексного подхода с использованием всех данных, начиная с сейсмических и заканчивая показателями разработки и верификации данных одного класса другими. Система трещин имеет масштабы, существенно отличающиеся от керновых, что не позволяет при типовом подходе корректно использовать стандартную схему выделения коллектора при интерпретации данных масштаба керн – геофизические исследования скважин; оценивать петрофизические параметры коллектора, а, следовательно, возможный коэффициент извлечения нефти, потенциал скважин; проектировать систему поддержания пластового давления.

Существенную роль в создании гидродинамической модели на основе сети трещин играет параметр смачиваемости, который фактически определяет вид капиллярных кривых в системах вода – нефть – газ. Капиллярное давление в свою очередь определяет возможность вовлечения в разработку матрицы трещиноватого пласта.

Накопленный опыт позволил создать методический подход к моделированию таких коллекторов, проектированию их разработки с учетом всех типов данных. Опыт показал, что комплексирование всех исследований с привязкой к динамическим данным дает возможность с достаточно высокой долей уверенности разрабатывать концептуальные и технологические модели трещиноватых коллекторов.

УДК 550.8.072

Моделирование петрофизических кубов на примере пластов группы АВ Ватьеганского месторождения

А.А. Калугин, А.Д. Алексеева
(ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»),
Э.С. Торопов, В.С. Стариков, В.Е. Касаткин
(Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
«КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени)

Пласты $АВ_{6-7}$ Ватьеганского месторождения сформированы прибрежно-морскими песчано-глинистыми отложениями и осложнены многочисленными палеоканалами. На основе созданной новой концептуальной модели меловых отложений и 2D геологического моделирования Ватьеганского месторождения на этих пластах была опробована технология объемного параметрического моделирования седиментационных врезов. Сложность условий осадконакопления и новая концептуальная модель вызвали необходимость изменения стандартных подходов к 3D моделированию.

Применение предложенной технологии позволило корректно воспроизвести в объеме седиментационные врезы с точки зрения как геологии, так и последующего расчета фильтрационных моделей. В геологической модели врезы реализованы на уровне распределения коллекторов и фильтрационно-емкостных свойств, сеточная модель отражает особенности структурного каркаса. Это позволило исключить проблемы в процессе ремасштабирования в части появления выклинивающихся и сильно деформированных ячеек, которые традиционно возникают при наличии резкого изменения толщины слоев. Обеспечивается гидродинамическая связь между «руслом» и «поймой» на уровне как геометрии, так и распределения коллектора, которую можно регулировать при настройке гидродинамической модели. Кубы коэффициента нефтенасыщенности построены с учетом модели переходной зоны и принятых уровней водонефтяного контакта.

УДК 622.276.66СМ

Разработка прогнозной характеристики развития стимулированного объема пласта (SRV) в баженовской свите при производстве операций многостадийного гидроразрыва пласта в условиях различных геолого-геомеханических свойств пласта и технологических параметров гидроразрыва пласта

Д.В. Кашапов, А.С. Продан, А.В. Бочкарев, Д.А. Коробицын, Д.И. Торба, В.В. Родионов, А.М. Янаев
(ООО «Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым»),
В.А. Кузнецов
(Научно-технический центр «Газпром нефти»),
О.В. Буков
(ООО «Технологический центр «Бажен»)

Целью проведения многостадийных гидроразрывов пласта (МГРП) в условиях баженовской свиты являются инициация, развитие и закрепление связанной системы трещин за счет взаимодействия техногенной трещины с естественной трещиноватостью и хрупкого разрушения пласта с образованием вторичной техногенной трещиноватости – образования стимулированного объема пласта (Stimulated reservoir volume – SRV), по которому происходит приток углеводородов к скважине.

Целью исследования являлось моделирование прогнозной характеристики развития SRV при различных механических свойствах пласта и технологических параметрах обработки. Моделирование МГРП проводилось с использованием специализированного отечественного программного обеспечения, позволяющего выполнять расчеты развития SRV – взаимодействия как техногенных, так и естественных трещин. Базовый план обработки для проведения расчетов выбран аналогично используемому в российской и зарубежной практике при стимуляции сланцевых объектов.

Ввиду необходимости большой вычислительной мощности, а также большого числа расчетов, они проведены при изменении только одного параметра обработки на трех различных вариантах реологии жидкости, всего 64 расчета. Результаты расчетов для построения характеристики развития оценивались по коэффициенту детерминации с последующим построением линии тренда, использование которой для данных механических свойств позволит определить степень влияния технологических параметров обработки на развитие SRV. Вследствие начала масштабной разработки баженовской свиты с применением МГРП разработанная прогнозная характеристика позволяет оценить степень влияния геолого-механических свойств и технологических параметров обработки на развитие SRV. На этапе подготовки работ данная оценка позволяет инженеру ГРП выбирать и проводить прогнозные расчеты с учетом указанных параметров.

УДК 550.822.3

Опыт создания инструментов технологии «Цифровой керн»

В.В. Крутько, Б.В. Белозеров
(Научно-технический центр «Газпром нефти»)

Вовлечение в разработку объектов с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов и повышение коэффициента извлечения нефти в некоторых случаях требуют увеличения коэффициентов вытеснения углеводородов и детального знания о фильтрационно-емкостных свойствах сложнопостроенных или низкопроницаемых коллекторов. Одним из методов быстрой и относительно дешевой оценки фильтрационно-емкостных свойств и коэффициентов вытеснения является численное моделирование течений в поровых каналах на цифровых моделях пористых сред горных пород. Основными задачами, которые были поставлены перед технологией цифрового керна, являются численное моделирование гидродинамических и физико-химических процессов на масштабе пор с восстановлением эффективных относительных фазовых проницаемостей моделей пластовых жидкостей и коэффициентов вытеснения углеводородов.

Рассмотрены основные подходы к решению поставленных задач, приведены первые результаты разработки численных алгоритмов. Во-первых, показан процесс разработки, оптимизации и валидации численного симулятора многофазных многокомпонентных течений в поровых каналах. Разработан и протестирован алгоритм двухфазного несмешивающегося течения на цифровых моделях 400x400x400 вокселей, полученных с помощью компьютерной микротомографии на образцах терригенных отложений. Во-вторых, разработан и протестирован прототип алгоритма 3D реконструкции порового пространства из 2D сканов микротомографии и микроскопии. Это позволяет использовать двумерные изображения шлифов горных пород для восстановления 3D топологии порового пространства, эквивалентных микротомографическим высокоразрешающим снимкам.

Полученные результаты являются во многом уникальными. Они показывают как преимущества технологии цифрового керна по сравнению с традиционными методиками лабораторного определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород, так и принципиальные ограничения технологии.

УДК 622.276.5.001

Применение мультискважинной деконволюции при решении обратной задачи подземной гидродинамики

П.В. Крыганов, И.В. Афанаскин, С.Г. Вольпин
(«Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»)

Важной проблемой при проведении численного гидродинамического моделирования является повышение достоверности исходных данных, в частности сведений о межскважинных свойствах пласта. С целью изучения этих свойств при интерпретации продолжительных кривых изменения давления, зарегистрированных датчиками ТМС, необходимо учитывать работу соседних скважин и высокую зашумленность данных. Для решения этих вопросов использовалась мультискважинная деконволюция с целью изучения всех составляющих кривой изменения давления. Мультискважинная деконволюция позволяет выделить конкретную реакцию на изменение режима работы скважины, обработать ее традиционными способами, оценить и учесть влияние шумов на кривую давления. Кроме того, такой подход существенно упрощает обработку кривой, поскольку позволяет проще и более достоверно диагностировать интерпретационную модель пласта.

Предложен новый подход к построению функции самовлияния и функций влияния: представление их в виде суммы элементарных функций, характеризующих отдельные режимы фильтрации в пласте. Влияние ствола скважины отражено в виде экспоненты, билинейный поток – в виде корня четвертой степени, линейный поток – в виде квадратного корня, радиальный поток – в виде логарифма, влияние границ – в виде линейной функции. При таком подходе коэффициенты функций влияния и самовлияния представлены линейно, поэтому для их определения может использоваться метод Ньютона.

Данный способ апробирован при использовании кривой забойного давления, полученной путем моделирования. Достижение хорошего совмещения смоделированной и деконволюированной кривых забойного давления показало, что заданные при моделировании и определенные при обработке кривых самовлияния и взаимовлияния параметры пласта практически совпали, что характеризует высокую эффективность предлагаемого подхода.

УДК 550.8.072

Применение современных цифровых технологий и алгоритмов машинного обучения в задачах интеллектуальной оцифровки картографических данных

А.Д. Кульневич
(ООО «Эко-Томск»),
Д.В. Егоров, Б.В. Белозеров
(Научно-технический центр «Газпром нефти»)

Целью работы являлось построение системы, позволяющей проводить автоматическую оцифровку картографических материалов с извлечением всей информации независимо от времени их создания, качества или формата.

Представленная методика объединяет множество математических моделей в единую цифровую систему или платформу, позволяет повысить качество картографических материалов, использовать даже данные в низком разрешении, извлекать имеющуюся в них метаинформацию (авторство, время, тип и др.), оцифровывать всю геолого-геофизическую информацию (геологические параметры, выделение контуров, расположение разломов и профилей), точно привязывать их к координатной сетке на основе выделенных географических сущностей, получать статистические заключения или подбирать аналоги. Основой большинства моделей являются зарекомендовавшие себя во многих задачах компьютерного подхода сверточные искусственные нейронные сети, способные адаптироваться к широкому классу задач и не требующие жестко прописанных алгоритмических действий, что позволяет использовать их для любых типов карт независимо от содержащейся в них информации.

В рамках проведенного исследования разработанное решение тестировалось на большом массиве картографических данных, включающем материалы в широком диапазоне качества (разрешение), форматов (растровые и векторные), типов (карты толщин, структурные, времен отражений, геологические и др.) и источников (открытые источники, журнальные статьи, приложения к отчетам). Качество оцифровки сравнивалось с традиционными алгоритмами, доступными в различном коммерческом ПО, и мануальной оцифровкой специалистами в метриках точности и скорости. Установлены сопоставимый уровень точности, но значительно большие скорости, что свидетельствует о преимуществе предлагаемого алгоритма.

УДК 622.276.66.001.57

Моделирование процесса гидравлического разрыва пласта в слоистой анизотропной трещиноватой среде методом динамики частиц

Р.Л. Лапин, В.А. Цаплин, В.А. Кузькин
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Представлена модель с использованием метода динамики частиц, которая может быть использована для моделирования развития трещины гидравлического разрыва пласта в слоистой анизотропной трещиноватой среде. Порода представляется набором частиц, соединенных линейными и угловыми пружинками. Варьирование параметров последних позволяет задавать различные упругие, прочностные свойства породы и пластовые напряжения. В частности, это дает возможность задавать слоистость и анизотропию свойств в материале. Для моделирования жидкости используются жидкостные элементы, которые соединены каналами. Течение жидкости между элементами определяется уравнением течения Пуазейля. Учитываются свойства жидкости, проппанта, а также скорость, объем и параметры закачки. Проведена серия тестовых расчетов развития трещины гидравлического разрыва пласта в средах с различными свойствами.

УДК 622.276.66.001.57

Учет разнородности упругих модулей в модели Planar3D

Н.С. Марков
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
НОЦ «Газпромнефть-Политех»)

Планарная трехмерная модель (Planar3D) трещины гидроразрыва пласта (ГРП) является одной из наиболее часто применяемых для численного расчета геометрии трещины. За последние несколько лет модель была существенно доработана для более глубокого учета различных физических эффектов. Несмотря на это, слоистость горной породы моделируется с учетом разнородности сжимающих напряжений в слоях. При необходимости учета разнородных упругих модулей используется средневзвешенное значение модулей по слоям, что не позволяет полностью учесть влияние слоистости при моделировании трещины ГРП.

Рассмотрен разработанный оптимальный метод учета разнородности упругих модулей горной породы при моделировании трещины ГРП. Данная проблема легко сводится к задаче о нахождении функции Грина слоистой среды с использованием метода прогонки и быстрого преобразования Фурье. Найденная функция Грина используется при расчете давления в модели Planar3D в качестве добавки к матрице влияния.

Результаты расчетов по модели Planar3D с использованием функции Грина для слоистой среды свидетельствует о необходимости учета влияния упругих модулей для точного расчета финальной формы трещины. Сравнение с данными, полученными с применением полной трехмерной модели трещины, демонстрируют качественное и количественное совпадение. Разработанный подход может быть использован для решения широкого спектра задач, для которых применяется метод граничных элементов.

УДК 620.193:622.279.012.05

Численное моделирование эрозионного износа элементов оборудования системы сбора газа в условиях выноса механических примесей из пласта

М.И. Насырова, Р.Н. Имашев, С.С. Шубин
(ООО «РН–БашНИПИнефть»)

Поскольку во время эксплуатации скважины нельзя полностью исключить наличие механических примесей, в частности, песка, возникает необходимость принятия мер по оптимизации режима работы скважины, т.е. подбору наилучшего сочетания технологических параметров эксплуатации скважины, при которых количество примесей, выносимых на поверхность, будет минимальным.

Целью работы является прогнозирование износа элементов системы сбора газа и определение зависимости скорости эрозии элементов оборудования от скорости потока смеси газа с механическими примесями, угла атаки частиц, массового расхода, диаметра и округлости частиц примесей, физико-механических свойств стали и др.

Моделирование явления эрозии выполнено в программе ANSYS Fluent. Установлены зависимости скорости эрозии от скоростей потока газа, угла атаки частиц, овальности и массового расхода примесей для разных марок сталей. Проанализированы основные причины появления эрозии в соответствующих узлах оборудования системы сбора газа, получены численные значения скорости эрозии при разных условиях эксплуатации скважины и установлены зависимости между скоростью эрозии и основными факторами, влияющими на интенсивность износа. Предложены методы минимизации риска возникновения разрушения конструкции за счет снижения скорости эрозионного износа.

УДК 622.276.031:532.11.001.24

Оценка неопределенности в задаче построения карт пластового давления

А.В. Новиков, Д.В. Посвянский
(Компания Roxar)

Карты давлений широко используются при анализе состояния разработки месторождений и планировании геолого-технических мероприятий. Расчет полей давления нужно проводить с учетом изменчивости фильтрационно-емкостных свойств (ФЭС) пласта. В данной работе фильтрация жидкости в коллекторе со случайными фильтрационными свойствами описывается с помощью дифференциального уравнения со стохастическими коэффициентами. Такой подход позволяет записать уравнения непосредственно на статистические моменты случайного поля давления: его среднее значение и дисперсию. Решение уравнений является менее трудоемким по сравнению с методом Монте-Карло. Используемая модель позволяет учесть результаты гидродинамических исследований скважин (ГДИС), а также историю разработки. В рамках предложенной модели получены выражения для притока жидкости к скважине в случайно неоднородном пласте.

Предлагаемый подход использован для оценки неопределенности давления в пластах случайной проницаемостью с логнормальным распределением. На ряде синтетических моделей выполнены численные расчеты полей давления и их дисперсии. Проведен сравнительный анализ полученных карт дисперсии с аналогичными результатами, полученными по методу Монте – Карло. Исследовано изменение неопределенности давления при настройке поля проницаемости на результаты ГДИС отдельных скважин. Это позволяет оценивать степень влияния проведенных ГДИС на неопределенность пластового давления.

УДК 622.276.43:678

Приближенное выражение для объема нагнетаемой жидкости в пласт от времени при полимерном заводнении

В.А. Панов, А.А. Быков, Н.А. Завьялова, Я.В. Невмержицкий
(Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет))

Целью работы является поиск приближенного аналитического выражения для фронта вытеснения степенной жидкостью при полимерном заводнении.

Описание фильтрации степенной жидкости в пласте можно получить из закона сохранения массы для сжимаемой жидкости, фильтрующейся в поровом пространстве. Можно также утверждать, что при малых скоростях фильтрации эффективная вязкость степенной жидкости намного больше вязкости пластового флюида, поэтому происходит поршневое вытеснение водой нефти. Давление в пределах части пласта, занятой нефтью, выравнивается практически мгновенно, в связи с чем можно считать, что давление на фронте вытеснения равно пластовому давлению или близко к нему.

Анализ уравнения пьезопроводности для степенной жидкости показывает, что путем замены переменных его можно привести к дифференциальному уравнению второго порядка от одной переменной. Итоговое уравнение допускает аналитическое интегрирование и получение зависимости давления в пласте при условии постоянства забойного давления.

В результате можно утверждать, что положение контура заводнения зависит от времени в степени, равной $n/(n+1)$, а объем закачанной жидкости – в степени $1/(n+1)$. Остальные коэффициенты зависят от сжимаемости жидкости, коэффициента консистенции, пористости и проницаемости пласта.

УДК 622.276.1/.4.001.57

Разработка программного обеспечения гидротермодинамического моделирования третичных методов увеличения нефтеотдачи

М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, И.И. Патрушев, А.С. Овчинникова, А.М. Гриф
(Новосибирский государственный технический университет),
А.В. Насыбуллин, Е.В. Орехов
(Альметьевский государственный нефтяной институт)

Работа посвящена созданию программного обеспечения (ПО) для построения цифровых моделей месторождений высоковязкой нефти и сопровождения их разработки путем синтеза оптимального управления воздействием на пластовую систему с использованием вязких вытесняющих агентов. Основой ПО является система моделирования процессов многофазной фильтрации, в том числе неизотермической, которая базируется на использовании метода конечных элементов, что позволяет детально учитывать неоднородности как пластовой системы, так и скважин и процессов, происходящих в их окрестности.

В разработанном ПО синтез оптимального управления предлагается проводить при заданных ограничениях на режимы добычи. При этом целевая функция включает минимизацию обводненности добывающих скважин, количества агентов и воды, закачиваемой в нагнетательные скважины. Каждый из компонентов входит в целевую функцию с коэффициентом, возможно зависящим от времени и определяемым соотношением стоимости нефти и затратами на закачиваемые агенты и воду. Для всех параметров возможно задание ограничений, определяемых технологическим процессом, в том числе ограничений на суммарный объем нагнетания и концентрацию используемых агентов.

На вход системы синтеза подается геолого-гидродинамическая модель, находящаяся в состоянии, с которого требуется проводить синтез управления, т.е. с распределением насыщенностей фаз в пластовой системе, соответствующих текущему времени.

При подборе оптимальных параметров влияние каждого из них и значение целевой функции для текущего набора параметров вычисляется на основе трехмерного гидродинамического моделирования процессов неизотермической многофазной фильтрации. Для прогнозной 3D модели состояния пласта сохраняются расчетные значения данных по скважинам на очередной период добычи, которые в процессе разработки, выполняемой согласно синтезированной схеме, сравниваются с практическими. Если различия между данными превышают допустимые, то снова выполняется адаптация модели к новым данным и осуществляется синтез оптимального режима управления добычей на следующий период.

Возможности разработанной системы анализировалась на модели месторождения высоковязкой нефти для технологий полимерного заводнения. Показано, что в результате синтеза может быть получена схема управления, позволяющая в определенные периоды времени при фиксированной добыче увеличить дебит нефти на 30–50 % практически при тех же затратах на вытесняющие агенты.

УДК 622.276.43.001

Повышение эффективности планирования и контроля мероприятий по выравниванию профиля приемистости путем автоматизации процесса подбора скважин-кандидатов

А.К. Подольский, А.В. Фомкин, А.М. Петраков, Е.Н. Байкова, Р.Р. Раянов
(АО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А.П. Крылова»)

При всей значимости выбора скважин-кандидатов для выравнивания профиля приемистости (ВПП) сам процесс остается во многом слабоформализованной задачей, поэтому в данной работе рассматривается автоматизированный алгоритм принятия решения о выборе скважин-кандидатов для ВПП, разработанный в АО «ВНИИнефть».

Цель алгоритма – оптимизация процесса формирования программ работ по ВПП и снижение риска возникновения ошибок из-за влияния субъективного фактора. Создание данного алгоритма инициировали:

– низкая оперативность оценки потенциала по числу и эффективности мероприятий по месторождению/залежи с ранжированием мероприятий;

– большие затраты времени на рутинные работы при ручных аналитических методиках подбора скважин-кандидатов и обработке полученных результатов;

– потребность использования широкого набора исходных баз данных, качество и наполнение которых позволяет автоматизировать их систематизацию;

– необходимость оперативного учета постоянных изменений и корректировок программ ВПП во время их реализации.

Разработанная программа позволяет в автоматизированном режиме проводить многофакторный анализ месторождения и подбирать скважины-кандидаты для ВПП по предложенному алгоритму.

Результаты тестирования алгоритмов формирования адресных программ ВПП показали увеличение производительности процесса формирования программ мероприятий, скорости расчетов – на 47 %; возможность оперативно вносить изменения в программы мероприятий с учетом технических и технологических ограничений без нарушения принципов методики формирования программ ВПП, повышение устойчивости прогноза технологической эффективности ВПП, возможность работы с любым размером базового фонда скважин.

УДК 550.8.072

Актуализация геологической модели с учетом анализа разработки и обстановки осадконакопления на примере залежи 1 пласта $ЮС_1^1$ Кустового месторождения

М.И. Попкова, С.С. Васин, А.В. Грезин
(Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени)

В качестве объекта исследования выбрана залежь 1 пласта $ЮС_1^1$ Кустового месторождения. Залежь пластово-сводовая, литологически ограниченная в северной части, состоит из двух блоков, разделенных между собой тектоническим нарушением, разделяющим залежь на два блока с разными уровнями водонефтяного контакта (ВНК). По степени и характеру выработки залежь можно разделить на три участка, которые вводились в разработку одновременно. Из сопоставления удельных показателей следует, что первый и третий участки (краевые части залежи) вырабатываются существенно эффективнее второго (центр залежи).

Для определения причин неравномерной выработки и актуализации геологической модели в скважинах рассматриваемого участка по методике В.С. Муромцева проводился анализ формы кривой ПС, по результатам которого выделены и прослежены по площади три различных по литолого-фациальному признаку тела, каждое из которых приурочено к отдельному участку разработки. Для картирования и определения свойств каждого литолого-фациального тела построена 3D геологическая модель, которая в полной мере отразила границы распространения и характер залегания продуктивных коллекторов.

При построении модели насыщения в результате анализа геолого-геофизической информации на залежи были установлены достаточно закономерное погружение ВНК с севера на юг, тесная связь между отметками кровли коллектора и ВНК в скважинах. По модели ВНК принят наклонным.

В результате актуализированная геологическая модель позволяет не только обеспечить прирост запасов, но и выделить перспективные участки для проведения геолого-технических мероприятий.

УДК 622.276.66.001.24

Методы ускорения явной расчетной схемы в модели Planar3D

Е.Б. Старобинский, Н.Д. Мущак
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
НОЦ «Газпромнефть-Политех»)

Рассмотрена модель Planar3D, которая позволяет оценить геометрию и динамику распространения трещины гидравлического разрыва пласта (ГРП) в слоистой породе. Для решения системы дифференциальных уравнений данной модели традиционно использована неявная схема интегрирования по времени, что обусловлено в первую очередь скоростью вычислений. Преимуществом применения явной схемы являются простота учета ряда физических эффектов, отсутствие необходимости использования матриц, проведение параллельных вычислений. Описываемые методы позволяют ускорить расчеты по явной схеме интегрирования и компенсировать необходимость выбора значительно меньшего по сравнению с неявной схемой шага по времени.

Увеличение шага по расстоянию в расчетной сетке позволяет использовать более крупный шаг по времени без потери схемой устойчивости. Масштабирование сетки можно проводить без пересчета матрицы влияния, если предварительно выполнить соответвующую нормировку величин. Шаг по времени также можно повысить, если сочетать явную и неявную схемы интегрирования (IMEX-схема).

Применение статистического метода для отслеживания фронта трещины и универсальных асимптотик позволяет существенно снизить время расчета как для явной, так и для неявной схемы.

УДК 622.276.1/.4.001.57

Моделирование эффекта вязких пальцев при эксплуатации месторождения горизонтальными скважинами

С.Б. Тихомиров
(Санкт-Петербургский государственный университет),
А.А. Яковлев
(Научно-технический центр «Газпром нефти»)

При вытеснении высоковязких нефтей водой даже в однородной среде часто наблюдается неустойчивость фронта вытеснения с образованием сложных, так называемых «вязких пальцев». Данный эффект может существенно снизить коэффициент охвата и привести к преждевременному прорыву воды к добывающей скважине. Это мотивирует использование полимерного заводнения, поскольку оно снижает различие в подвижностях вытесняющего и вытесняемого флюидов.

Показано, что вязких пальцев нет для конкретного месторождения, разрабатываемого с применением горизонтальных скважин. При этом давление меняется почти линейно в межскважинном пространстве и можно говорить о характерной линейной скорости движения флюидов, что существенно отличает эксплуатацию горизонтальных скважин от вертикальных.

Предложена численная модель, построенная на классическом понятии капиллярного давления. Для исключения численных эффектов с учетом неустойчивости задачи реализованы две схемы, основанные на методе конечных элементов и методе конечных объемов. Размер решетки выбирается исходя из данных о месторождении с учетом резкого изменения водонасыщенности и составляет 0,1–1,0 м в зависимости от варьируемых параметров, в коммерческих симуляторах обычно используется размер решетки 10–50 м.

Для различных относительных фазовых проницаемостей (ОФП) и капиллярного давления проведено исследование фронта вытеснения до прорыва воды к добывающей скважине. Для пластовых условий вязких пальцев не обнаружено. Предложена классификация вязких пальцев по местонахождению (внешние и внутренние) и типу поведения неоднородностей (сохраняющаяся, увеличивающаяся, разветвляющаяся). Проанализированы появление вязких пальцев и их характер при варьировании параметров пласта. Для ОФП, соответствующих керновым испытаниям, эффект вязких пальцев не обнаружен даже при значительном изменении параметров пласта и большом различии подвижностей.

УДК 622.276.1/.4.001.57

Оптимизация расстановки проектных точек на основе вариативной плотности сетки скважин с использованием программного модуля технико-экономической оценки запасов нефти

Р.Р. Хафизов, Ф.М. Латифуллин, Рам.З. Саттаров, М.А. Шарифуллина, А.Ф. Яртиев
(ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина институт «ТатНИПИнефть»)

Разработаны подходы и инструменты для автоматизированного размещения проектных скважин по неравномерной сетке, удовлетворяющей технологическим и экономическим ограничениям и имеющей максимально возможную плотность. Методика реализована в программном модуле технико-экономической оценки запасов нефти, который включен в программный комплекс «КИМ Эксперт».

Блок поиска оптимальных решений формирует массив планируемых геолого-технических мероприятий (ГТМ) по скважинам из возвратного фонда и новых с учетом заданных ограничений по минимально необходимой экономической эффективности ГТМ и допустимому уровню геологических рисков. Программа в автоматизированном режиме выполняет поэтапную расстановку проектных скважин по критериям применимости для ввода в промышленную эксплуатацию с использованием предложенного алгоритма.

Выбор оптимальных вариантов по заданным целевым функциям сводится к выполнению двух этапов:

– генерация на каждый горизонт собственной (индивидуальной) оптимальной сетки проектных скважин;

– расстановка проектных точек с учетом объединения проектных скважин при их совпадении в общем плане и экономии затрат на бурение, обустройство и оборудование.

С использованием программного модуля приведены расчеты по 208 объектам разработки. По каждому объекту выполнены расстановка проектных скважин, расчет базовых показателей и технико-экономической эффективности планируемых ГТМ. Результаты расчетов также позволили ранжировать объекты разработки по экономическому потенциалу в сопоставимых исходных условиях.

УДК 622.276.6Пр.М

Автомодельное решение задачи нестационарного тепло- и массопереноса при воздействии высокочастотным электромагнитным полем на залежи высоковязких нефтей, содержащих твердую углеводородную фазу

Ф.С. Хисматуллина
(ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»),
М.С. Демид
(РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина)

Одним из перспективных методов разработки залежей высоковязких нефтей является технология высокочастотного электромагнитного воздействия, эффективное с точки зрения объемного теплового воздействия на пласт, которое появляется из-за диэлектрической природы углеводородов.

Рассмотрен процесс фильтрации смешивающихся жидкостей и фазовых переходов при воздействии на флюиды высокочастотным электромагнитным полем. В условиях плоскорадиального потока этот процесс описывает система уравнений пьезопроводности, теплопроводности, диффузии, начальных и граничных условий, условий непрерывности давления, температуры и концентрации на подвижной границе фазового перехода. Основным уравнением, анализ которого позволяет оценить эффективность проведенного мероприятия, является уравнение теплопроводности с объемными источниками тепла, которое учитывает конвективные процессы.

Проанализирована возможность существования автомодельного решения для различных случаев, так как не для всех вариантов с внешним источником тепла оно может быть составлено. Кроме того, в результате решения указанной системы уравнений в автомодельных переменных, кроме распределений давления, температуры, концентраций растворителя, расплава твердой фазы и несущей жидкости, получено выражение для определения движения границы фазового перехода.

Разработан алгоритм расчета задачи. Варьирование параметров позволяет выявить наиболее значимые для процесса параметры, а также термобарическую характеристику в пласте при воздействии высокочастотным электромагнитным полем.

УДК 622.276.72

Математическая модель фильтрации высоковязких парафиносодержащих нефтей при воздействии высокочастотным электромагнитным полем

Ф.С. Хисматуллина
(ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»),
А.И. Хатмуллина
(РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина)

Рассмотрено влияние высокочастотного электромагнитного нагрева на характеристики вытеснения высоковязких парафиносодержащих нефтей. Предположено, что вытесняющий агент является диэлектрической жидкостью с температурой ниже температуры плавления парафинов. При этом кристаллизованный парафин занимает определенную долю эффективной пористости.

Предложен новый подход, при котором плавление парафина происходит в некотором объеме среды. Поскольку парафин является аморфным веществом, принято, что процессы плавления и кристаллизации парафина описываются заданным кинетическим законом (скорость изменения содержания парафина пропорциональна его концентрации). В уравнении теплопроводности появляется дополнительный член, характеризующий поглощение (выделение) тепла при плавлении (кристаллизации парафина), в уравнении конвективной диффузии – член, характеризующий появление (исчезновение) источников массы при этом.

Расчет фильтрации выполнен на основе численной модели, учитывающей процессы тепло- и массопереноса многокомпонентной системы, а также фазовые превращения парафина. Проведены расчеты в рамках линейной модели фильтрации с принятыми допущениями. Показано, что в процессе высокочастотного нагрева происходит эволюция пространственного распределения начальной концентрации парафина. Установлено, что в пласте можно выделить область улучшения эффективной пористости за счет плавления парафина и две области с ухудшением эффективной пористости (первая – за тепловым фронтом, вторая – на фронте вытеснения за счет переноса и дальнейшего застывания расплавленного парафина в низкотемпературной зоне).

Отмечено, что результаты исследований могут использоваться для выбора оптимальных способов и режимов воздействия на призабойную зону пласта высокочастотным электромагнитным полем и нагнетаемым растворителем.

УДК 622.276.66.004.58

Генерация микросейсмической активности при распространении трещины гидроразрыва пласта

Н.Г. Шварёв, Н.С. Марков
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
НОЦ «Газпромнефть-Политех»)

Микросейсмические события, возникающие во время гидроразрыва пласта (ГРП) и отслеживаемые с помощью (микро-) сейсмического мониторинга, индуцируются распространением трещины ГРП. Численное моделирование является основой для количественного изучения и интерпретации результатов сейсморазведки в терминах механики деформируемого твердого тела. С его помощью можно принимать более точные решения по разведке и разработке недр, месторождений, добыче нефти и газа.

В ходе работы создана программа генерации микросейсмической активности при распространении трещины ГРП, в которую были интегрированы модели трещины Planar3D и Pseudo3D. Проведен ряд исследований, на основании результатов которых можно сделать вывод, что большинство событий происходит вокруг распространяющейся трещины ГРП. Это позволяет определить изменение положения фронта во времени на основании (микро-) сейсмического мониторинга.

УДК 622.276.1/.4.001.57

Численное моделирование залежей с высокопроводящими разломами

Н.А. Шевко
(«Газпром нефть Бадра»)

Предложена методика моделирования фильтрационных потоков в высокопроводящих разломах. С учетом их нерегулярного расположения выполнена оптимизация численного алгоритма решения системы уравнений фильтрации. Показана эффективность реализации метода на полномасштабной гидродинамической модели «черной нефти» одного из месторождений Ирака.

Использован стандартный способ описания разломов через геометрию corner-point и набор несоседних соединений (NNC). Вследствие появления множества NNC потоков, приводящих к нарушению регулярной структуры матрицы системы уравнений, возникают проблемы со сходимостью численных схем и увеличением времени расчетов, поэтому предложены дополнительные приемы и алгоритмы решения матриц с нерегулярной структурой. Учет течения вдоль разломов выполняется на основе численного моделирования потоков, при этом физические процессы соответствуют фильтрации флюидов в породе. Для улучшения моделирования пластов, осложненных системой разломов, предложен подход, позволяющий учесть наличие проводимости разломов вдоль их простирания. Предложена схема дискретизация таких разломов для описания течения как вдоль, так и перпендикулярно к их направлению. Для сохранения эффективности численного алгоритма в условиях множества NNC и высоких скоростей течения система разломов выделена в отдельный от регулярной структуры сетки объект моделирования, который успешно решается в рамках полностью неявного симулятора итерационным методом с предобусловливателем.

Преимущества подхода показаны на примере улучшения качества адаптации к истории разработки, а также прогнозирования поведения карбонатного пласта с интенсивной системой разломов, которые делят его на множество полуизолированных участков.

Предложенный подход адресного фильтрационного моделирования проводящих разломов является перспективным направлением улучшения качества прогнозирования вытеснения углеводородов в пластах, осложненных высокопроводящими тектоническими нарушениями.

УДК 622.276.1/.4.001.57

Оптимизация детальности гидродинамической модели для ускорения процесса адаптации на историю разработки

Н.А. Шевко
(«Газпром нефть Бадра»)

Предложен подход advanced coarsening создания нерегулярных укрупненных ячеек на базе готовой гидродинамической модели, который позволяет более чем на порядок уменьшить размерность модели, минимизировав возможные погрешности дискретизации, и существенно ускорить расчет. Для этого строится вспомогательная триангуляционная сетка с зонами измельчения (возле скважин, трещин) и укрупнения ячеек (законтурная зона, межскважинные интервалы). Для каждого узла вспомогательной сетки определяются ячейки новой сетки (Upgridding) и выполняются перенос свойств (Upscaling) на созданную неравномерную сетку, расчет ее проводимостей, коэффициентов продуктивности скважин и законтурной зоны. Рассматриваемый подход может быть реализован в виде опции в любом гидродинамическом симуляторе, который разработан как для сеток Corner Point, так и для нерегулярных сеток.

Для проверки реализованных алгоритмов выполнена апробация на нескольких полномасштабных моделях залежей нефти и газа с различными размерностью и фазовым состоянием. Установлены хорошая устойчивость решения и сходимость к результатам на первоначальной регулярной детализированной сетке.

Предложенная методика построения сложных неравномерных расчетных сеток, реализованная как опция advanced coarsening позволяет достичь значительного ускорения расчетов по времени, что является критичным при выполнении многовариантных расчетов и моделировании крупных залежей.

УДК 550.8.072

Геологически обоснованная автоматическая адаптация гидродинамических моделей на примере реального месторождения

Г.Ю. Шишаев, И.В. Матвеев, Г.А. Еремян
(Томский политехнический университет),
В.В. Демьянов
(Heriot-Watt University),
С.В. Кайгородов
(Научно-технический центр «Газпром нефти»)

Рассмотрен подход к автоматической адаптации гидродинамических моделей, обеспечивающий геологический контроль путем сохранения выявленных взаимозависимостей петрофизических и геологических неопределенностей, которые существенно влияют на динамику процессов, происходящих в пласте при его разработке.

На первом этапе реализации указанного подхода с использованием результатов измерений и природных аналогов были определены фактические границы изменения каждого из определяющих модель параметров и зависимостей. Далее с целью сохранения геологической обоснованности гидродинамической модели в рамках заданной геологической концепции изменение одной из зависимостей в процессе адаптации приводит к одновременному изменению других связанных с ней параметров модели в обоснованных пределах неопределенности.

Для автоадаптации использован итеративный алгоритм эволюционной стратегии. В процессе адаптации минимизируется целевая функция, привязанная к данным о добыче из более чем 50 скважин выбранного сектора модели месторождения. В результате было получено множество адаптированных моделей, которые демонстрируют удовлетворительное качество адаптации, характеризуются обоснованными соотношениями определяющих геологических параметров по сравнению с моделью, полученной в результате ручной адаптации, не противоречат исходным данным и геологической концепции. На основе множества моделей выполнен прогноз параметров работы скважин/групп скважин/месторождения с учетом неопределенности исходных данных и геологических характеристик.

Особенностью предложенного метода является отказ от единственной детерминированной зависимости между связанными параметрами в пользу интервала возможных вариаций зависимостей для неопределенных геологических параметров. Подход позволяет ускорить процесс адаптации гидродинамических моделей и контролировать их геологическую обоснованность. В результате повышается уверенность при прогнозировании на основе множества геологически обоснованных адаптированных моделей.

УДК 622.276.66.004.58

Математическая модель движения проппанта в трещине гидроразрыва

А.С. Шляпкин
(Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени),
А.В. Татосов
(Тюменский государственный университет,
Институт математики и компьютерных наук)

Рассмотрен процесс формирования трещины гидроразрыва при закачке в скважину вязкой жидкости с примесью частиц. Предложена модель развития трещины с учетом потерь жидкости на просачивание в пористую среду и падения взвешенных частиц под действием силы тяжести. Проведен детальный анализ скорости роста осадка, обусловленного просачиванием жидкости гидроразрыва в пористую среду. Показано, что наличие частиц существенно влияет на процесс раскрытия трещины. Рост трещины при наличии частиц ограничен, окончательная ее форма зависит от состава смеси и способа закачки: давления на входе, объемного содержания частиц, объема оторочки (чистой жидкости гидроразрыва без примеси). Эти факторы учитываются в предложенной модели. Исследование выполнено для безразмерной формы уравнений движения. Результаты расчетов позволяют охарактеризовать остаточную форму трещины или подобрать технологические параметры для достижения желаемых результатов при гидроразрыве пласта.