



X научно-практическая конференция
**Математическое моделирование
и компьютерные технологии
в процессах разработки
месторождений**

18–21 апреля 2017 г.,
г. Уфа

Организатор



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

X научно-практической конференции

**Математическое моделирование
и компьютерные технологии
в процессах разработки
месторождений**

ЗАО «Издательство «НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО»

Москва

2017

СОДЕРЖАНИЕ

Аксаков А.В., Гребельник М.С., Желтова И.С., Ямилев И.М. Модель Pseudo3D. Модели расширения и физические ограничения	4
Белолипецкий П.В., Тузовский М.А., Бондаренко А.С., Фроленков И.В. Оценка оптимальных параметров гидроразрыва пласта с помощью простых моделей	5
Варавва А.И., Татосов А.В., Вершинин В.Е. Моделирование закачки химически активных реагентов в пласты с парафинистой нефтью	6
Вафин А.Р. Проектирование, реализация и оценка эффективности нестационарного заводнения для увеличения коэффициента охвата на Сабанчинском месторождении.....	7
Ветлова А.О., Кузилов И.О. Анализ неопределенности фильтрационно-емкостных свойств при моделировании сложнопостроенного месторождения в карбонатных отложениях.....	8
Галимов Р.Н., Шакшин В.П. Моделирование PVT свойств пластовых флюидов на основе кубических уравнений состояния при гидравлических расчетах систем сбора нефтяных и газоконденсатных месторождений	9
Гарагаш И.А., Боронин С.А., Осипцов А.А., Рожков А.Н. Подходы к моделированию бриджинга при транспорте проппанта в трещинах гидроразрыва пласта: теория и эксперимент	10
Головин С.В., Байкин А.Н. Моделирование гидроразрыва пласта в пороупругой среде	11
Жижимонтов И.Н., Степанов С.В., Свалов А.В. Исследование фильтрационно-емкостных свойств пластов БВ Самотлорского месторождения с использованием стохастической порово-сетевой модели	12
Завьялова Н.А., Быков А.А., Евдокимов А.В., Перепечкин И.М., Шувалов Д.И. Методы моделирования гидроразрыва пласта и последующего притока к скважине.....	13
Иванов А.В., Степанов С.В. Математическое моделирование нестационарной работы нефтяной скважины с учетом неравновесности фазовой проницаемости	14
Киреев Т.Ф., Хатмуллин И.Ф., Загуренко Т.Г., Хатмуллина Е.И. Моделирование на неструктурированных сетках для решения практических задач.....	15
Клийменко А.Н., Кузилов И.О. Влияние температуры и гравитации на распределения давления насыщения нефти газом и газосодержания нефти с глубиной на примере месторождения с большим этажом нефтеносности	16
Костюченко С.В., Савенков С.А., Евланова Ю.А., Ганопольский Р.М., Бадрызов А.А., Чудинов С.С. Программная система ИНТЕРМОД для параллельного сопряжения секторных геолого-технологических моделей	17
Кузьмичев О.Б. Разработка поисковых критериев выявления нефтенасыщенных низкоомных терригенных коллекторов Западной Сибири по данным изучения керна и геофизических испытаний.....	18
Лысь Е.В., Торопецкий К.В., Курмангалев Р.З., Самойлов М.И. Комплексное 3D моделирование процессов гидроразрыва пласта и класса смежных задач оценки напряженно-деформированного состояния месторождения	19

Мазо А.Б., Хамидуллин М.Р., Поташев К.А., Саттаров Р.И., Трифонов Т.В. Идентификация параметров многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах	20
Меледин А.С. Моделирование конусообразования с целью изучения способов снижения его негативного влияния на разработку водонефтяных зон пласта ПК ₁₄ Ван-Еганского месторождения	21
Никитин Р.Н., Бочкарев А.В., Буденный С.А., Митрушкин Д.А., Ерофеев А.А., Демо В.О. Моделирование многостадийного гидроразрыва пласта с учетом особенностей залежей баженовской свиты	22
Падерин Г.В., Шель Е.В. Многообразие подходов к моделированию гидроразрыва пласта: аналитические решения и полуаналитические модели	23
Петухова Ю.А. Математическое моделирование фильтрационно-емкостных свойств коллекторов	24
Савченко П.Д., Федоров А.И., Уразбахтин Р.Ф. Альтернативная методика подбора скважин-кандидатов для проведения повторной операции гидроразрыва пласта на основе эффекта переориентации трещины	25
Саркисов Г.Г., Оленчиков Д.Н. Необходимость точной настройки моделей Brownfields по истории разработки при выполнении прогнозных расчетов в условиях неопределенности	26
Ситников А.Н., Асмандияров Р.Н., Пустовских А.А., Зулькарниев Р.З. Развитие цифровой информационной системы «Подбор ГТМ» – планирование повторных многостадийных гидроразрывов пласта	27
Стародубцев О.В. Повышение эффективности системы заводнения на ачимовских отложениях за счет трансформации системы разработки (на примере Поточного месторождения)	28
Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Зенченко П.В., Тримонова М.А., Барышников Н.А. Лабораторное моделирование влияния градиента порового давления на ориентацию трещин гидроразрыва пласта	29
Хисматуллина Ф.С., Лесной А.Н., Джиджаев Г.В. Концепция интегрированного моделирования на месторождениях Северного Каспия	30
Хисматуллина Ф.С., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Комплексное воздействие электромагнитных полей и смешивающегося вытеснения на залежи трудноизвлекаемых запасов углеводородов с учетом объемных фазовых переходов	31
Ходанович Д.А., Бахтий Н.С. Анализ и оптимизация гидродинамических моделей месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» для оперативного планирования геолого-технических мероприятий	32
Черемисин Н.А., Костюченко С.В. Моделирование нелинейной фильтрации и геомеханики сопряженными разномасштабными моделями	33
Шелухин В.В. Двухфазные гранулированные жидкости	34

Модель Pseudo3D.

Модели расширения и физические ограничения

*А.В. Аксаков, М.С. Гребельник,
И.С. Желтова, И.М. Ямилев
(ООО «РН-УфаНИПИнефть»)*

Одной из задач при разработке пакета моделирования гидроразрыва пласта (ГРП) «РН-ГРИД» компании ПАО «НК «Роснефть» является реализация экспресс-модели расчета ГРП с переносом проппанта, которая позволяет быстро и с достаточной точностью оценить параметры гидроразрыва пластов простого строения.

Рассмотрена проблема выбора математической модели экспресс-анализа ГРП. Приведено описание ячеистой псевдотрехмерной модели (Cell-based Pseudo3D) эволюции трещины ГРП.

Выполнено сравнение существующих математических моделей развития трещины ГРП, показаны их преимущества и недостатки. Приведены обоснование выбора Cell-based Pseudo3D модели, ее краткое математическое описание и ограничения применимости. Дано описание модели переноса многофракционного проппанта с учетом эффектов мостования (bridging), т.е. застревания частиц в областях с малым раскрытием, замедление проппанта относительно жидкости вследствие трения частиц при взаимодействии между собой и со стенками трещины, гравитационное оседание частиц проппанта. Рассмотрены дополнительные подмодели: 1) вертикального трения, описывающая эффекты вязкостной диссипации энергии при движении жидкости в вертикальном направлении; 2) горизонтальной упругости, позволяющая учитывать продольно-упругое взаимодействие ячеек между собой.

Приведены результаты тестовых расчетов на разработанной модели и на моделях Pseudo3D и Planar3D стороннего коммерческого пакета моделирования, а также на модели Planar3D, реализованной в пакете «РН-ГРИД». Приведены примеры дизайна ГРП, демонстрирующие ограничения модели Cell-based Pseudo3D по сравнению с основной моделью Planar3D. Параметрами сравнения служат время работы программного модуля, гидравлическая длина полученной трещины, максимальное раскрытие, чистое давление, распределение проппанта.

Проанализирована эффективность программной реализации при запуске на многоядерных вычислительных системах с общей памятью.

В результате получена Cell-based Pseudo3D модель, демонстрирующая меньшее время расчета по сравнению с Planar3D моделями и хорошее соответствие результатов на простых с точки зрения геологического строения дизайнах ГРП.

Оценка оптимальных параметров гидроразрыва пласта с помощью простых моделей

*П.В. Белолипецкий (Институт вычислительного моделирования СО РАН),
М.А. Тузовский, А.С. Бондаренко (Akadem Petroleum Technology Inc.),
И.В. Фроленков (Институт математики и фундаментальной
информатики Сибирского федерального университета)*

Для принятия предварительных проектных решений и оценки основных результатов обработки эффективным инструментом являются простые модели гидроразрыва пласта (ГРП) описанные Майклом Экономидесом, Роналдом Олайни и Питером Валько в книге Unified Fracture Design (2002). Разработан онлайн-сервис www.pengtools.com с простым и удобным интерфейсом реализующий изложенную методологию унифицированного дизайна ГРП.

В методологии унифицированного дизайна фиксируются объем и свойства проппанта, выделенные для проведения ГРП. Метод позволяет оценить оптимальные параметры трещины, максимизирующие приток, для заданных свойств месторождения и имеющегося проппанта. При этом для оценки оптимального соотношения длины и ширины используются таблицы ранее рассчитанных значений. Полученные значения проверяются с точки зрения технических ограничений. Таким образом, находится целевая оптимальная геометрия трещины. Затем рассчитывается предварительный график закачки, который обеспечивает намеченные размеры трещины и однородное размещение проппанта. Если традиционными средствами не удается добиться оптимального размещения проппанта, намечается ГРП с концевым экранированием.

Упрощенные модели обеспечивают логически последовательную процедуру проектирования и возможности экспресс-оценки проектов. Имеется возможность намечать основные решения, не вдаваясь в излишние подробности механики трещины, реологии флюида или же разработки залежи. В дальнейшем полученные оценки можно корректировать на основании детального моделирования или конкретного опыта. Данные модели посредством варьирования различных параметров месторождения и ГРП позволяют быстро получить интуитивное понимание относительной важности параметров для проектирования и последующей эффективности работы скважины с ГРП. Эта методика не получила распространения из-за широкого использования трехмерных симуляторов, хотя она вполне эффективна. Методика унифицированного дизайна позволяет быстро получить оценку оптимального расписания закачки в идеализированных условиях, которая может быть уточнена на симуляторе.

Приведены основные алгоритмы, математические идеализации и ограничения методики. На конкретных примерах показана работа с программой операторов.

Моделирование закачки химически активных реагентов в пласты с парафинистой нефтью

*А.И. Варавва, А.В. Татосов, В.Е. Вершинин
(ООО «Газпромнефть НТЦ»)*

В последние годы наблюдается тенденция к увеличению доли запасов тяжелой нефти. При разработке таких месторождений возникает множество трудностей, обусловленных как высокой вязкостью нефти, так и содержанием в составе добываемого флюида высокомолекулярных компонентов – парафинов, смол, асфальтенов. Образование в процессе эксплуатации асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) приводит к ухудшению фильтрационных характеристик пласта, в частности призабойной зоны, отказам оборудования, снижению продуктивности добывающих скважин.

Один из перспективных методов борьбы с АСПО в продуктивном пласте – закачка реагирующей энерговыделяющей бинарной смеси, основным компонентом которой является водный раствор нитрата аммония. После закачки смеси в пласт инициируется экзотермическая химическая реакция, в ходе которой расходуется нитрат аммония, выделяются азот и вода. Образующееся тепло прогревает призабойную зону скважины, и большое количество газа под давлением входит в пласт. В результате обработки бинарными смесями снижается вязкость нефти, из призабойной зоны удаляются коагулирующие вещества, вследствие чего повышается продуктивность скважины.

В данной работе на основе численного моделирования исследован процесс закачки водной смеси химически активных компонентов в продуктивный пласт. Предложена математическая модель, позволяющая описать процессы, протекающие при закачке бинарной смеси в пласт: реакцию разложения закачиваемых реагентов, плавление и кристаллизацию парафинов, повышение давления и температуры вблизи скважины. При этом не учитываются диффузия компонентов смеси, перенос жидкости и газа вследствие скачка капиллярного давления в фазах, гравитационное перемещение фаз и перенос тепла за счет теплопроводности. Разработан численный алгоритм решения представленной системы уравнений. Создан симулятор для моделирования закачки химически активных компонентов в пласт. Для расчета массообмена между фазами предложена математическая модель протекающей в пласте химической реакции. На основе экспериментальных данных подобраны константы скорости реакции, позволяющие корректно описать процесс разложения нитрата аммония.

На созданных моделях проведена серия расчетов закачки реагентов в пласты с различными вязкостью нефти, проницаемостью и температурой. Выполнена оценка скачков давления и температуры, возникающих вблизи скважины, размеров и характеристик зоны обработки бинарными смесями.

Проектирование, реализация и оценка эффективности нестационарного заводнения для увеличения коэффициента охвата на Сабанчинском месторождении

***А.Р. Вафин
(Инженерный Центр (ПАО «Татнефть»))***

Основным объектом разработки Сабанчинского месторождения (93 % начальных геологических запасов) является пласт бобриковского горизонта, разрабатываемый путем заводнения. В настоящее время объект выработан на 86 %, средняя обводненность составляет 90 %. Высокая проницаемость пласта и низкий коэффициент расчлененности теоретически должны способствовать высокой степени охвата выработкой запасов объекта. Однако детальное изучение геофизических материалов и керна показало, что от кровли к подошве пласта проницаемость возрастает от 0,3 до 2 мкм²). В совокупности с повышенной вязкостью нефти (22,2 мПа·с) и большими толщинами пластов-коллекторов в условиях отсутствия глинистых перемычек позволяет сделать вывод, что гравитационное распределение является доминирующим эффектом при заводнении объекта.

С учетом полученной картины распределения фильтрационно-емкостных свойств объекта создана геолого-гидродинамическая модель, которая подтвердила предположение, что основные остаточные запасы нефти сосредоточены в кровельной части пласта. Для доизвлечения запасов нефти с учетом экономических требований и данных разработки, а также успешного опыта применения нестационарного заводнения на высокорасчлененных и выработанных пластах ПАО «Татнефть» было решено запроектировать и рассчитать применение этого метода для однородного объекта с учетом полученных данных по распределению проницаемости.

Оптимизация циклического воздействия заключалась в комплексном подходе с корректировкой продолжительности полуцикла и изменением направления фильтрационных потоков. Анализ результатов расчетов на модели показал перспективность такого подхода. В 2014 г. начата реализация программы управления заводнением на опытном участке, а далее – на объекте в целом. Результатом реализуемых работ стала стабилизация добычи нефти в целом по объекту разработки, снижение обводненности в целом по месторождению, сокращение эксплуатационных затрат на добычу и закачку воды. Оценка, выполненная с помощью характеристик вытеснения, показала увеличение прогнозного конечного коэффициента извлечения нефти на 6 %.

Результаты реализации программы подтвердили эффективность предложенных решений, а также позволили расширить границы применимости нестационарного заводнения за счет однородных объектов с низкой расчлененностью, но с различной проницаемостью по разрезу и повышенной вязкостью нефти. Работы по исследованию влияния нестационарных процессов на процесс заводнения продолжаются на других объектах рассматриваемого месторождения.

Анализ неопределенности фильтрационно-емкостных свойств при моделировании сложнопостроенного месторождения в карбонатных отложениях

***А.О. Ветлова, И.О. Кузилов
(ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»)***

Объектом исследования являются карбонатные отложения продуктивной формации сантон-кампанского яруса, характеризующиеся сложным строением коллекторов. Особенностью данного объекта является высокая степень неоднородности фильтрационно-емкостных свойств. Моделирование распределения геолого-физических свойств сложнопостроенных резервуаров и залежей является актуальным вопросом для повышения достоверности прогнозов технологических показателей разработки.

Созданы множественные равновероятные реализации моделей проницаемости в программном продукте Petrel (Schlumberger). Данный подход позволил учесть весь объем имеющихся результатов геолого-физических, петрофизических исследований и по итогам моделирования выбрать модель, максимально согласующуюся с исходной геологической информацией.

В предположении каверно-порового строения коллектора построена точная модель двойной проницаемости в программном продукте Tempest (ROXAR). Полученная модель согласуется с историей разработки по месторождению.

На основе построенной геолого-технологической модели выбраны критерии, влияющие на прогнозные уровни добычи и выполнен анализ чувствительности гидродинамической модели. Проведенный анализ показал, что наибольшее влияние на прогноз технологических показателей разработки оказывают такие параметры, как:

- неподтверждение активности водоносной области;
- неподтверждение проницаемости в объеме пласта как в целом, так и в его не разбуренной части;
- наличие высокопроводящих зон разуплотнения;
- предположение о наличии двойной среды.

С целью оценки технологических показателей разработки по трем вероятностным оценкам (P10, P50, P90) на основе анализа чувствительности создана Pгоху-модель.

Концепция, реализованная в работе, способствует повышению информативности геолого-технологического моделирования и может применяться для любого месторождения.

Моделирование PVT свойств пластовых флюидов на основе кубических уравнений состояния при гидравлических расчетах систем сбора нефтяных и газоконденсатных месторождений

***Р.Н. Галимов, В.П. Шакшин
(ООО «СамараНИПИнефть»)***

При моделировании PVT свойств пластовых флюидов применяются два взаимно дополняющих подхода. Первый основан на представлении о составе нефти, газа и воды без учета компонентного состава флюида – моделирование с помощью модели нелетучей нефти. В данной модели применяются экспериментально полученные корреляции для плотности, вязкости и других свойств нефти, воды и газа. Преимущества такого подхода заключается в низких требованиях к объему входных данных и лабораторных замеров, что бывает важно при практическом моделировании. Главным недостатком является невозможность описания ретроградных явлений и, как следствие, применения данного подхода при моделировании флюидов газоконденсатных месторождений.

Второй подход основан на моделировании PVT свойств с помощью уравнения состояния для нефти, газа и воды – композиционное моделирование. Такая модель описывает все области фазовой диаграммы и применима ко всем типам флюидов, в том числе газовым конденсатам. Для применения этого подхода необходимы данные о компонентном составе нефти и газа, что повышает требования к объему входных данных.

При моделировании с помощью уравнений состояния решается ряд сложных численных задач. Оба подхода успешно применяются в различных задачах моделирования нефтяных и газовых месторождений. В данной работе рассмотрен опыт реализации и практического применения программного модуля для моделирования PVT свойств флюидов с помощью композиционной модели. Данный программный модуль разработан с целью расширения функционала имеющегося программного инструмента для концептуального проектирования систем наземного обустройства нефтяных и газоконденсатных месторождений. Программный модуль апробирован на тестовых задачах. Его планируется широко использовать для гидравлических расчетов, задачах реинжиниринга и мониторинга на газоконденсатных месторождениях Оренбургской области, а также на месторождениях Западной Сибири.

Подходы к моделированию бриджинга при транспорте пропанта в трещинах гидроразрыва пласта: теория и эксперимент

*И.А. Гарагаш (Институт физики земли РАН),
С.А. Боронин, А.А. Осипцов (Сколковский институт науки и технологий),
А.Н. Рожков (Институт проблем механики РАН)*

Известные в литературе двумерные модели транспорта пропанта в трещине гидроразрыва пласта (ГРП) основаны на приближении тонкого слоя. Типичная модель содержит уравнение переноса для концентрации частиц, закон Пуазейля для усредненной скорости жидкости, выраженной через градиент давления с коэффициентом мобильности жидкости, а также квазиэллиптическое уравнение для давления. Замыкающие соотношения включают полуэмпирические выражения для скорости осаждения, вязкости суспензии, и критерий бриджинга.

Детально рассмотрены замыкающие соотношения для бриджинга (запираания) и мобилизации частиц при течении суспензии в трещине ГРП. Поскольку речь идет о потоке округлых частиц, находящихся в контакте, то их упаковка постоянно меняется и, следовательно, меняется занимаемый ими объем. Если это происходит в большом пространстве, то это не влияет на стенки. Если размер щели близок к эффективному объему, то его дилатансия может привести к запираанию просвета и образованию препятствия (бриджинг).

Движение пропанта рассматривается как медленное движение ансамбля обладающих дилатансией кластеров в вязкой среде. Такая жидкость обладает внутренней структурой и может моделироваться моментной средой с несимметричным тензором напряжений. В рамках механики сплошных сред это приводит к предположению, что вектор напряжения на любой площадке имеет некоторый эксцентриситет и, кроме тензора напряжений, вызывающего скорости деформаций элементарного параллелепипеда и его вращения, действуют изгибающие и крутящие моменты, обуславливающие кривизну граней. Учет моментов приводит к асимметрии тензора напряжений (нарушению закона парности касательных напряжений) и появлению наряду с макроскопическими вращениями кинематически независимых микроповоротов отдельных фрагментов. Для такой среды существует внутренний масштабный фактор, который может быть сопоставлен с характерным размером кластеров. Следуя данной методологии и рассматривая случай плоской деформации, можно прийти к конечному соотношению либо численно задаваемой функциональной зависимости, являющейся уточненным критерием бриджинга частиц в трещине ГРП.

Для калибровки замыкающих соотношений для бриджинга предложено проводить эксперименты по моделированию движения частиц в тесненных условиях. В частности, использование имеющихся прозрачных ячеек и каналов в сочетании с визуализационными методами позволяет проследить детали взаимодействия частиц и образование запирающихся структур в ограниченных объемах. Имеются также возможности для измерения скорости жидкости, перепада давления и сдвигающих напряжений.

Моделирование гидроразрыва пласта в пороупругой среде

*С.В. Головин, А.Н. Байкин
(Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН)*

Гидроразрыв пласта (ГРП) является важным компонентом современных технологий интенсификации добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Распространение трещины ГРП обусловлено закачкой в нее вязкой жидкости, которая создает давление на стенках, достаточное для преодоления горного давления и разрушения породы. Процесс развития трещины зависит от нескольких факторов: течения вязкой жидкости по тонкой трещине, упругой реакции стенок трещины, фильтрации жидкости через стенки трещины в пласт, разрыва породы и продвижения кончика трещины. Описание динамики трещины является сложной задачей, которая редко решается в ее полной постановке.

Предложены математические модели физических процессов, происходящих при ГРП. Предметом моделирования являются: 1) динамика развития трещины ГРП с учетом влияния порового давления в пласте на обмен жидкостью и изменение напряжений в окрестности трещины, критериев разрушения горной породы, неоднородности сжимающего горного давления и физических характеристик породы; 2) прогноз дебита скважины с множественными ГРП; 3) определение физических параметров пласта и характеристик трещины на основе анализа нестационарных волновых процессов.

Подход основан на уравнениях пороупругости, позволяет определить фильтрацию поровой жидкости и деформацию горной породы совместно с раскрытием трещины. Положительным качеством модели является описание взаимного влияния давления поровой жидкости и напряжений в пласте, учет неоднородности пласта и сжимающих напряжений. Кроме того, данный подход позволяет описать обмен жидкостью между трещиной ГРП и поровым пространством пласта естественным образом без учета дополнительных предположений типа формулы Картера.

Показано, что поровое давление может существенно влиять на динамику трещины. В частности, моделирование ГРП в рамках полных моделей пороупругости существенно уточняет характеристики трещины, рассчитанной по модели чистой упругости (различие длин трещин может составлять в 1,5–2 раза), неоднородность физических свойств пласта может приводить к несимметричному и немонотонному раскрытию трещины. Рассмотрены возможности расширения модели для описания более широкого круга задач моделирования динамики ГРП.

Исследование фильтрационно-емкостных свойств пластов БВ Самотлорского месторождения с использованием стохастической порово-сетевой модели

***И.Н. Жижимонтов, С.В. Степанов, А.В. Свалов
(ООО «Тюменский нефтяной научный центр»)***

В настоящее время при проектировании и сопровождении разработки месторождений углеводородов широко используется гидродинамическое моделирование. Адекватность гидродинамической модели зависит от количества и качества исходных данных, в том числе при определении фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) горной породы. Часто количество и/или качество исходных данных оказываются недостаточными. Решить данную проблему можно с использованием технологии «Цифровой керн».

В работе дано описание разработанной стохастической порово-сетевой модели, приведены результаты тестирования созданной компьютерной программы и ее применения для обоснования зависимости пористость – абсолютная проницаемость пласта БВ Самотлорского месторождения.

Стохастическая порово-сетевая модель виртуальных образцов горной породы строилась в два этапа. Первый этап заключался в стохастической реконструкции пустотного пространства. Для этого в качестве исходной информации использовались кривые капиллярного давления. Настройка стохастической модели на керновые данные осуществлялась с помощью корреляционных и топологических параметров, таких как максимальные радиус связи (напрямую влияет на координационное число), весовые функции и др. На втором этапе рассчитывалась абсолютная проницаемость, исходя из численной имитации течения однофазной несжимаемой жидкости в поровых каналах. Для этого использовались уравнения гидравлики: баланса массы в порах и для расхода жидкости в каналах (уравнения Пуазейля).

С целью доизучения объекта создано несколько стохастических порово-сетевых моделей с детальной настройкой на керновые данные с учетом литологического описания образцов. В результате усреднения результатов большого числа расчетов уточнена корреляционная зависимость между абсолютной проницаемостью и коэффициентом пористости. В результате получена новая зависимость пористость – абсолютная проницаемость, которая характеризует горную породу как обладающую лучшими ФЕС. Улучшение ФЕС также согласуется с результатами промысловых исследований скважин.

Применение в гидродинамической модели новой зависимости обеспечило заметное улучшение соответствия расчетных данных и фактических, что свидетельствует о правомерности полученной петрофизической зависимости.

Методы моделирования гидроразрыва пласта и последующего притока к скважине

*Н.А. Завьялова, А.А. Быков, А.В. Евдокимов, И.М. Перепечкин,
Д.И. Шувалов (ООО «НГЦ МФТИ»)*

Для выполнения дизайна гидроразрыва пласта (ГРП) и определения целесообразности проведения операции требуется рассчитать последующий приток к скважине. Общий объем оптимизационных расчетов велик, поэтому для решения этих задач необходимо разрабатывать экономичные численные методы для каждой конкретной процедуры. Рассмотрены компьютерные методы корректного расчета ГРП и последующей оценки дебита скважины.

При моделировании ГРП для определения геометрических характеристик трещины необходимо использовать модели типа Planar3D или Full3D. Последние обладают высокой вычислительной сложностью, поэтому практически не применяются.

Характерное время расчетов одного ГРП по модели Planar3D составляет около 10–20 мин. За это время необходимо решить двумерную задачу течения жидкости ГРП в трещине и вычислить давление в каждой точке трещины, используя решение внешней геомеханической задачи. Согласно литературным данным, такие модели, как правило, используют уже готовое решение с вычислением давления через двойной интеграл по поверхности трещины. В работе предложено заменить расчет интеграла на решение гармонического уравнения для давления в трехмерной области с проведением корректного двумерного расчета течения жидкости в трещине и усреднением потока по раскрытию трещины. При этом сокращение времени расчета давления достигает 10 % общего времени. Затем данные геомеханических расчетов используются для определения притока.

Задача расчета фильтрации нефти в области с трещинами является плохо обусловленной из-за существенного различия проницаемости трещины и остальной области. Для сквозного расчета удобно заменить каждую трещину на систему источников, среди которых возможны перетоки. Взаимодействие источников определяется с помощью матрицы влияний, которая строится до начала основных расчетов.

Новизна работы состоит в модели расчета давления при росте трещины, комбинации двумерных и трехмерных расчетов для определения кривизны трещины и комбинации расчетов в скважине, трещине, решения геомеханической задачи и определения последующего притока нефти.

Практическая значимость работы состоит в использовании разработанных эффективных методов для совершения большого числа расчетов и определения оптимальных параметров закачки.

Математическое моделирование нестационарной работы нефтяной скважины с учетом неравновесности фазовой проницаемости

*А.В. Иванов, С.В. Степанов
(ООО «Тюменский нефтяной научный центр»)*

Динамика фактических технологических показателей эксплуатации скважин очень часто характеризуется резко выраженной немонотонностью. Проблема изучения физических и/или технологических факторов, обуславливающих подобную динамику показателей в настоящее время до конца не изучена. Имеются специализированные программные продукты, позволяющие имитировать работу отдельных скважин, однако они не позволяют описать сложность многофазной фильтрации вблизи скважин, в частности, учесть влияние нелинейных эффектов и неравновесности на относительные фазовые проницаемости (ОФП). При этом фактор неравновесности является значительно менее изученным.

Рассмотрены результаты применения разработанной компьютерной программы для численного исследования работы нефтяной скважины пласта БВ₁₀¹⁻³ Самотлорского месторождения. Компьютерная программа создана на основе физико-математической модели, описывающей фильтрацию нефти и воды в пласте, в том числе с учетом неравновесных ОФП по модели Г.И. Баренблатта. Приведены результаты тестирования компьютерной программы, в том числе при использовании расчетных сеток различной конфигурации и детализации. Установлено, что для приемлемого по времени и качеству расчета можно использовать равномерную расчетную сетку. Показаны также результаты исследования влияния способов решения системы линейных уравнений. Отмечено, что итерационные методы при определенных погрешностях вычислений могут обуславливать осциллирующий характер динамики обводненности, однако величина этих осцилляций меньше наблюдаемой на фактической кривой динамики обводненности скважины.

Модель неравновесной фильтрации Г.И. Баренблатта предполагает использование времени релаксации. Поскольку время релаксации невозможно однозначно оценить, в данной работе выполнен анализ чувствительности с различными временами релаксации. Установлено, что для рассмотренной системы пласт – флюиды время релаксации составляет ориентировочно 100 сут.

Приведены результаты исследования динамики обводненности скважины в зависимости от специфики режима ее эксплуатации и особенностей строения пласта. Во всех случаях неравновесность ОФП приводит к выраженным пульсациям обводненности.

Моделирование на неструктурированных сетках для решения практических задач

*Т.Ф. Киреев, И.Ф. Хатмуллин, Т.Г. Загуренко,
Е.И. Хатмуллина (ООО «Уфимский НТЦ»)*

Неструктурированные сетки имеют ряд преимуществ перед классическими прямоугольными сетками: они позволяют лучше описать неоднородность проницаемости, получить более точное решение гидродинамических задач вблизи скважин, сократить эффект ориентации сетки и в некоторых случаях увеличить скорость вычислений за счет уменьшения общего числа ячеек. Сложное структурное строение пласта, геометрия горизонтальных скважин и трещин описываются такими сетками гораздо точнее. Переход от структурированных к неструктурированным сеткам является неотъемлемым этапом в развитии гидродинамического моделирования.

Рассмотрена сетка Вороного (PEBI, Perpendicular Bisector) как одна из наиболее подходящих для задач подземной гидродинамики. Показано, что локальное измельчение сетки Вороного позволяет достаточно точно описать нестационарность процессов в околоскважинной области: получено совпадение численного и аналитического решений для случая вертикальной скважины и трещины ГРП, а также выполнено сопоставление численных расчетов с расчетами в ПО Saphir. В ходе сравнения прямоугольной сетки и сетки Вороного показано, что последняя способна сохранять точность вычисления технологических показателей скважин при существенном сокращении числа ячеек и снижать эффект ориентации сетки. Путем проведения численного моделирования для случая трещины ГРП показано, что нестационарными эффектами в трещине и присутствием ствола скважины можно пренебречь.

Влияние температуры и гравитации на распределения давления насыщения нефти газом и газосодержания нефти с глубиной на примере месторождения с большим этажом нефтеносности

*А.Н. Клийменко, И.О. Кузилов
(ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»)*

Объектом исследования является нефтяное месторождение в карбонатных отложениях сеноманского яруса с большим этажом нефтеносности, характеризующееся сложным строением коллекторов, высокой степенью неоднородности фильтрационно-емкостных свойств и сильной дифференциацией свойств пластовых флюидов по глубине. Этаж нефтеносности составляет 290 м, пластовое давление – 28,7 МПа на абсолютной отметке водонефтяного контакта, равной 2530 м, существенно превышает давление насыщения (15 МПа). Разница температуры от кровли до подошвы – 7 °С, давлений – 20 МПа. На месторождении отобрано значительное число глубинных проб пластовых флюидов, при этом анализ проб показывает сильную дифференциацию давления насыщения и газосодержания по глубине залежи.

Обоснованы основные PVT зависимости пластовых флюидов в условиях сильной дифференциации основных свойств по глубине методом построения PVT-модели, учитывающей изменение по глубине компонентного состава за счет влияния силы гравитации и температуры, термодиффузии молекул системы.

По большинству отобранных проб определен компонентный состав флюида, по ряду проб проведены ступенчатая сепарация, дифференциальное разгазирование, определение вязкости флюидов. Анализ проб показал нелинейные зависимости давления насыщения и газосодержания от глубины. Согласно теории градиент давления насыщения зависит от типа рассматриваемого флюида: модель нелетучей нефти, летучей нефти, околокритической нефти. Нелинейные зависимости давления насыщения и газосодержания от глубины характерны для легких нефтей (летучие и околокритические нефти). В случае изменения компонентного состава, соответствующего случаю изотермической гравитации, модели нелетучей нефти характеризуются постоянным градиентом давления насыщения от глубины, что противоречит зависимости, полученной по результатам исследований глубинных проб. Сделан вывод о необходимости внедрения дополнительного метода анализа фактических данных.

На основе анализа отобранных глубинных проб с привлечением концептуального моделирования получены линейные зависимости давления насыщения и газосодержания от глубины, которые подтверждаются теорией композиционного градиента и имеют меньший диапазон дифференциации свойств нефти по глубине залежи, чем нелинейные зависимости, построенные на данных фактических проб.

Программная система ИНТЕРМОД для параллельного сопряжения секторных геолого-технологических моделей

*С.В. Костюченко, С.А. Савенков, Ю.А. Евланова
(ООО «Тюменский нефтяной научный центр»)
Р.М. Ганопольский, А.А. Бадрызов, С.С. Чудинов
(Тюменский государственный университет)*

Рассмотрены актуальные проблемы моделирования разработки крупных и гигантских нефтегазовых месторождений. Для решения этих проблем разработана параллельная вычислительная технология, основанная на сопряжении секторных гидродинамических моделей по динамическим пластовым давлениям и потокам пластовых флюидов. Это сопряжение необходимо для сохранения гидродинамической целостности моделируемого объекта.

Созданная программная система ИНТЕРМОД предназначена как для вычислительных кластеров, так и для рабочих станций. Она не является самостоятельным гидродинамическим симулятором, но использует для секторного моделирования известные гидродинамические симуляторы (в том числе «РН-КИМ»), существенно расширяя их возможности и позволяя создавать модели с почти неограниченным числом расчетных ячеек (лимит накладывается вычислительными мощностями).

В основу программной системы ИНТЕРМОД положен итерационный алгоритм Iterative Fitting Boundary Conditions (IFBC) сопряжения моделей, разработанный авторами.

Приведены результаты апробации программной системы ИНТЕРМОД на вычислительном кластере (суперкомпьютер «Менделеев» Тюменского государственного университета) для моделей с общим числом расчетных ячеек от 7 до 800 млн. и 15 тыс. скважин.

Разработка поисковых критериев выявления нефтенасыщенных низкоомных терригенных коллекторов в Западной Сибири по данным изучения керна и геофизических испытаний

*О.Б. Кузьмичев (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
«КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени)*

Рассмотрена проблема оценки коэффициента нефтегазонасыщенности низкоомных коллекторов при геологическом моделировании и подсчете запасов углеводородов. К низкоомным относят нефтегазонасыщенные коллекторы, удельное электрическое сопротивление (УЭС) которых, определенное с помощью существующих в настоящее время методов измерений и методик интерпретации, ниже критического УЭС, являющегося границей нефть – вода. В таких коллекторах, определенных при интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) как водонасыщенные, при испытаниях получают значительные притоки нефти или нефти с водой.

При представлении материалов геологического моделирования и подсчета запасов углеводородов в ФБУ «ГКЗ РФ» приняты два способа оценки коэффициента нефтегазонасыщенности:

- с использованием зависимостей Дахнова – Арчи между относительным сопротивлением и пористостью и между параметром насыщенности (коэффициентом увеличения сопротивления) и водонасыщенностью, построенных по представительным результатам анализа керна;

- с использованием связи между УЭС пласта и его объемной влажностью, обоснованной результатами анализа керна и каротажа в скважинах, пробуренных с применением промывочной жидкости на нефилтрирующей основе.

Обе методики используют УЭС нефтенасыщенного пласта, которое может быть занижено в силу различных причин (из-за присутствия в пласте сульфидов железа, оксидов и железистых пленок на поверхности пор и нефтяных капель, межслоевых катионов и др.). Соответственно, коэффициент нефтенасыщенности, определенный по этим методикам, также будет заниженным.

Для оценки коэффициента нефтегазонасыщенности сложнопостроенных, в том числе низкоомных коллекторов, разработана следующая методика. По данным комплекса ГИС и изучения керна определяется коэффициент пористости $K_{п}$ прослоя. По результатам комплексной интерпретации метода ПС и электрометодов ГИС определяется статический потенциал $E_{ПС}$ с помощью программ комплексной интерпретации IntREst[©] (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени) или LogWin-ЭК (ООО «Нефтегазгеофизика», г. Тверь). Рассчитывается объемная влажность $W = K_{п} \cdot K_{в.о}$ ($K_{в.о}$ – коэффициент остаточной водонасыщенности). Строится зависимость $W = f(E_{ПС})$. В итоге коэффициент нефтегазонасыщенности продуктивного коллектора равен $K_{н} = 1 - W/K_{п}$.

Если коэффициент нефтенасыщенности, определенный по предлагаемой методике выше определенного по стандартным методикам (слабое условие) или коэффициент нефтенасыщенности, определенного по предлагаемой методике, больше или равен 50 % (сильное условие), то пласт является нефтенасыщенным.

Приведены результаты интерпретации низкоомных нефтенасыщенных коллекторов некоторых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

Комплексное 3D моделирование процессов гидроразрыва пласта и класса смежных задач оценки напряженно-деформированного состояния месторождения

*Е.В. Лысь, К.В. Торонецкий, Р.З. Курмангалиев
(ООО «НовосибирскНИПИнефть»),
М.И. Самойлов (ЦЭПИТР, ПАО «НК «Роснефть»)*

Основной проблемой секторного моделирования является несогласованность входных/выходных данных между различными классами задач (геомеханическое моделирование, гидродинамическое моделирование, моделирование гидроразрыва пласта (ГРП), устойчивости ствола скважины) и отсутствие единой площадки (базы) для хранения и обработки информации. Каждая задача несогласована в пространственных и временных координатах. Проблема моделирования процессов ГРП заключается в отсутствии достоверных экспериментальных данных о свойствах горных пород, карты пластовых давлений и проницаемости, полях напряжений. Необходимо рассматривать каждую задачу как одну из частей комплекса задач. Предложены три основных подхода. При этом выбор подхода зависит от качества входных данных и геологических условий.

1. Создание модели роста трещины согласно моделям PKN, KGD, P3D с течением жидкости и переносом проппанта. Модель притока в скважину с трещиной ГРП принимается аналитической. Реализация решения не требует «тяжелых» машинных вычислений и достижима путем итеративных алгоритмов. В результате реализации данного подхода полевой инженер может получить модели трещины и рассчитать нужный тоннаж проппанта при помощи персонального компьютера в короткие сроки. Однако данный подход носит сугубо оценочный характер.

2. Создание кубов модели механических свойств (ММС) и напряженно-деформированного состояния (НДС), а также автоматическая выгрузка модели трещины в виде куба с локальной сеткой высокой детальности (LGR) для финальной загрузки в гидродинамический симулятор, так как в настоящее время свойства на детальную сетку переносят вручную. Данное решение реализуемо на базе расчетных алгоритмов, посредством методов конечных разностей или конечных элементов. Таким образом, увеличивается время на разработку одного дизайна, но в итоге определяются распределение давления, концентрации проппанта, раскрытие трещины.

3. Создание физико-математической модели процесса ГРП с использованием бессеточных методов для моделирования трещин сложной геометрии (учет возникновения сетки трещин, а также такого явления, как «искривление трещины»). Примером бессеточного метода является перидинамика, как раздел механики разрушения твердых тел. В совокупности с задачей переноса проппанта, данный подход позволяет точнее определить количество проппанта, нежели подходы, описанные выше, а также оценить рост трещины в высоту с прорывом к водоносному горизонту. Однако данный подход требует привлечения больших вычислительных мощностей и алгоритмов распараллеливания.

Таким образом, используя предложенные подходы, на выходе можно получить все необходимые расчетные данные и рекомендации для реализации процедуры ГРП, а также ввиду комплексности подхода и согласованности входных и выходных данных, оценить влияние гидроразрыва на напряженно-деформированное состояние и фильтрационно-емкостные свойства сектора.

Идентификация параметров многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах

*А.Б. Мазо, М.Р. Хамидуллин, К.А. Потапьев
(Казанский федеральный университет),
Р.И. Саттаров, Т.В. Трифионов (ГК «МИРРИКО»)*

Предложена методика интерпретации индикаторных исследований многозонного гидроразрыва пласта (МГРП) в горизонтальной скважине, основанная на численном моделировании переноса индикатора в прискважинной зоне и решении обратной задачи. Целью интерпретации является уточнение фильтрационных параметров трещин и разделение по интервалам гидроразрыва суммарных дебитов воды и нефти.

При трассерных исследованиях в каждый интервал МГРП закачивается раствор индивидуального индикатора. После запуска скважины измеряются концентрации индикаторов в отбираемой жидкости. Замеры используются для оценки продуктивности каждой трещины, уточнения ее проницаемости, раскрытия, протяженности. Перенос водорастворимого индикатора в пласте описывается численным решением трехмерной задачи двухфазной многокомпонентной фильтрации в области дренирования скважины. Используется оригинальная математическая модель в сочетании с быстродействующими алгоритмами сквозного решения задачи для давления в пласте и трещинах и явно-неявной схемой решения задачи переноса трассера.

Представлена постановка задачи в безразмерных переменных, определены критерии подобия фильтрации, переноса и сорбции индикатора. Исследовано влияние процессов диффузии и сорбции индикатора на его распределение в пласте. Показано, что при типичных условиях реализации технологии индикаторных исследований МГРП диффузионными процессами можно пренебречь, в то время как погрешность задания параметров сорбции может значительно повлиять на результаты интерпретации замеров.

На основе численного моделирования выполнено сравнение различных сценариев закачки индикатора в пласт с точки зрения получения более представительных данных для решения задач идентификации параметров трещин.

Выполнено оснащение технологии индикаторных исследований МГРП в горизонтальной скважине методической базой по обработке результатов замеров. Численное моделирование выполняется с помощью собственного программного обеспечения. Решение задачи идентификации параметров трещин МГРП в разумные сроки обеспечивается использованием оперативной схемы решения обратной задачи и быстродействующих алгоритмов численного моделирования.

Моделирование конусообразования с целью изучения способов снижения его негативного влияния на разработку водонефтяных зон пласта ПК₁₄ Ван-Еганского месторождения

*А.С. Меледин
(ООО «Тюменский нефтяной научный центр»)*

Рассмотрены особенности разработки нефтегазовых залежей, подстилаемых подошвенной водой при периодических процессах конусообразования. Даны рекомендации по повышению эффективности добычи нефти. На основании принятой гипотезы о равенстве горизонтальной и вертикальной проницаемости на цифровой модели воспроизведен прорыв воды в начальный период работы скважин. Осуществлен поиск путей адаптации моделей без использования «запрещенных» приемов для повышения достоверности результатов моделирования.

Рассматриваемый объект характеризуется наличием газовой шапки и давлением насыщения, близким к начальному пластовому. В качестве математической модели использовалась трехфазная модель фильтрации. Построение фильтрационной модели осуществлялось с использованием симулятора Tempest More 7.1.4. Начальное распределение нефтенасыщенности задано в явном виде, при этом начальное равновесие в пласте обеспечивается путем сдвигов начальных капиллярных давлений во всех ячейках модели таким образом, что все фазы распределяются в соответствии с кривыми гидростатических давлений. Имитация взаимодействия залежи с законтурной областью осуществлялась путем увеличения порового объема ячеек, расположенных на боковых гранях модели. Кровля и подошва пласта приняты непроницаемыми.

Адаптированная традиционным способом модель (изменение вида кривых ОФП, дострел водоносных прослоев) не воспроизводила резкий рост обводненности, вызванный конусообразованием, и, как следствие, динамика добычи скважин не соответствовала фактической. Для корректного воспроизведения прорывов воды в начальный период работы скважин рассмотрен альтернативный подход к адаптации модели (использовано предположение о просветности глин): проведена серия расчетов с различной вертикальной проницаемостью до получения максимального схождения с фактом. По результатам расчетов принято, что наиболее достоверно прорывы воды воспроизводятся при равенстве вертикальной и горизонтальной проницаемости. Вскрытия фиктивного слоя не потребовалось благодаря тому, что при восстановлении прорывов воды наряду с приемами, описанными ранее, было определено пороговое значение мощности для выклинивания. Выполнена серия расчетов при мощности для выклинивания от 0,1 до 5. По результатам расчетов определено оптимальное значение, равное 1. На основании полученных данных выполнены адаптация эксплуатации скважин к истории разработки. Динамика расчетных и фактических показателей на всю историю разработки имеет хорошую сходимость, расхождения укладываются в рамки допустимых отклонений.

В результате выполненных вычислительных экспериментов предложен новый способ адаптации гидродинамических моделей, который позволяет более точно моделировать динамику работы скважин и следовательно повышает достоверность фильтрационной модели.

Моделирование многостадийного гидроразрыва пласта с учетом особенностей залежей баженовской свиты

*Р.Н. Никитин, А.В. Бочкарев, С.А. Буденный, Д.А. Митрушкин,
А.А. Ерофеев (ООО «Инжиниринговый центр МФТИ»),
В.О. Демо (ООО «Газпромнефть НТЦ»)*

Представлено описание прототипа специализированного программного комплекса, предназначенного для создания оптимального дизайна многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) в условиях залежей баженовской свиты. Программный комплекс состоит из двух модулей: для расчета процесса формирования трещин МГРП и для расчета притока к скважине с полученной геометрией трещин МГРП с учетом стимулированного объема.

В разработанном прототипе учитываются ключевые особенности баженовской свиты: сильная неоднородность геологического разреза и наличие естественной трещиноватости. Расчетное ядро модуля МГРП базируется на кусочно-заданной псевдотрехмерной модели с равновесным ростом в высоту (P3D cell-based модель). При моделировании МГРП учитываются взаимное влияние (интерференция) трещин в процессе одновременного или последовательного роста, а также взаимодействие трещин ГРП с естественной трещиноватостью для оценки стимулированного объема пласта. Интерференция существенно влияет на форму закрепленной трещины, так как при МГРП происходит локальное изменение поля напряжений, вследствие чего трещины каждой последующей стадии развиваются в измененных геомеханических условиях. В процессе смыкания трещин последующих стадий эффективная площадь контакта с целевым слоем и проводимость трещины могут существенно отличаться от плановых показателей. При моделировании течения смеси рабочей жидкости и проппанта в трещине учитывается возможность задания параметров деструкции геля, а также эффект концевое экранирования, который ведет к остановке роста трещины в длину.

Модуль для расчета притока к скважине позволяет использовать в качестве входных данных геометрию полученной сети трещин при МГРП, которая используется для построения сетки расчетной области с локальным измельчением вблизи трещин. Кроме того, в данном модуле учитываются такие эффекты, как неоднородность параметров расчетной области, нелинейная фильтрация, диффузия и десорбция газа из нефтематеринской породы.

Модель описывает изотермическое течение двухфазного потока (газ и нефть) с учетом фазовых переходов в трехмерном пласте. Для описания изменения состояния системы со временем используются уравнения для законов сохранения массы для каждого компонента в пористой среде с несжимаемым скелетом. В ячейках, через которые проходят трещины ГРП и естественные трещины, задаются эффективные значения проницаемости в зависимости от числа, геометрии и проводимости трещин. Для более корректного описания процессов, происходящих вблизи скважины и в области стимулированной трещиноватости, осуществляется также локальное измельчение расчетной сетки на основе октодера (octree).

Многообразие подходов к моделированию гидроразрыва пласта: аналитические решения и полуаналитические модели

*Г.В. Падерин, Е.В. Шель
(ООО «Газпромнефть НТЦ»)*

Разработаны полуаналитические инструменты для быстрого расчета геометрии трещины гидроразрыва пласта (ГРП) с удовлетворительной точностью в упрощенной постановке в рамках Pseudo3D модели. Создание дополнительных способов проверки более сложных моделей ГРП.

Последние аналитические решения в простейших постановках в теории ГРП получены в 70-х годах XX века: для моделей Перкинса – Керна-Нордгрена, Христиановича – Гиртсма – де-Клерка и радиальной трещины. Дальнейшее развитие моделирования ГРП преимущественно заключалось в развитии численных моделей, таких как Lumped pseudo3D, Cell-based Pseudo3D, Planar3D, Full3D и др. В данной работе описаны два подхода к моделированию ГРП: первый основан на связывании существующих аналитических решений для их обобщения на Pseudo3D постановку; второй заключается в получении приближенного аналитического решения методом выделения малого параметра в Pseudo3D постановке.

Прокси-подход к моделированию ГРП был представлен М. Экономидисом, но разработанная им модель не учитывала ряд аспектов, например, влияние барьеров напряжений на раскрытие трещины ГРП. В результате точность модели была существенно ниже, чем у коммерческого программного обеспечения (ПО). После устранения ряда недочетов прогнозная способность в упрощенной постановке стала сопоставима с коммерческим ПО.

Аналитическое решение для Pseudo3D модели позволяет строить зависимости длины, высоты, распределения раскрытия трещины и давления в ней от объема/времени закачки. Так как решение выполнено в безразмерных переменных и зависит от трех безразмерных параметров, оно позволяет определить степень влияния литологии пласта и реологии жидкости на достижимые геометрические параметры трещины ГРП. Отличительной особенностью данного решения является принципиальная возможность задавать реологические свойства на забое.

Разработанные модели могут быть применены для получения экспресс-оценок геометрии трещины ГРП, а также для проверки более сложных моделей и коммерческих симуляторов ГРП в упрощенной постановке.

Предлагаемые подходы и приемы, показали свою эффективность, и могут быть использованы для дальнейшего расширения применения разработанных моделей.

Математическое моделирование фильтрационно-емкостных свойств коллекторов

*Ю.А. Петухова (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
«ПермНИПИнефть» в г. Перми)*

Математическое моделирование фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов проводилось в связи с необходимостью опробования метода гидравлической единицы потока на месторождениях Пермского края. Главная задача состояла в выявлении закономерностей и особенностей каждого класса коллекторов, выделенного при помощи индикатора гидравлической единицы потока. Графическая и геологостатистическая обработка информации выполнена с использованием программ MS Excel, Statistica и IRAP RMS. Для исследования выбрана геологическая модель бобриковского пласта Москудьинского месторождения.

Для фациального комплекса проток дельт, выделенного при анализе керна и материалов геофизических исследований скважин, при помощи индикатора гидравлической единицы потока определены некоторые зависимости снижения ФЕС с увеличением глубины. Выделены группы значений, формирующие линейные уравнения с близкими угловыми коэффициентами. Рассмотрены особенности каждой группы с учетом их соответствия тому или иному классу коллекторов. Сформирован ряд факторов, влияющих на различия изменений свойств коллектора.

Наиболее тщательно исследовано предположение о наличии глинистого материала. Анализ распределения коэффициента глинистости с глубиной для каждой выделенной группы подтвердил гипотезу, что с увеличением глубины коэффициент глинистости повышается, а следовательно, ухудшаются ФЕС.

Верхняя часть разреза представлена в большей степени породами, принадлежащими группе, обладающей лучшими ФЕС. В нижней части преобладают породы, относящиеся к группам с меньшими показателями свойств.

Сделан вывод, что выделенные группы имеют разную степень накопления глинистого материала. Большая глинизация прослеживается ниже уровня водонефтяного контакта. Изменение свойств глинистого материала в процессе разработки месторождений будет ухудшать ФЕС пласта. Такое разуплотнение, в свою очередь, является источником энергии пласта по выделенным группам. Дифференциация данных групп позволяет уточнить, на каких участках коллекторов будут проходить данные процессы, а в каких они будут незначительны. Это позволит в дальнейшем точнее оценивать процессы разработки месторождений, проектировать бурение новых скважин и адаптировать геолого-гидродинамические модели.

Альтернативная методика подбора скважин-кандидатов для проведения повторной операции гидроразрыва пласта на основе эффекта переориентации трещины

*П.Д. Савченко, А.И. Федоров, Р.Ф. Уразбахтин
(ООО «РН-УфаниПИНефть»)*

В настоящее время одним из основных методов заканчивания скважин при выработке трудноизвлекаемых запасов углеводородов является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Основными проблемами данного типа заканчивания являются деградация трещины во времени (глинизация, вдавливание проппанта, и др.), ошибки при проектировании дизайна трещины, прорывы трещин в нагнетательных скважинах (автоГРП). Кроме того, наблюдается естественное падение темпов добычи, связанное с истощением запасов и/или повышением степени обводненности продукции. Как следствие, возникает проблема повышения темпов добычи углеводородов, а также снижения степени обводненности, которая решается, в частности, проведением повторных операций ГРП. Данный вид геолого-технических мероприятий сопряжен с существенными рисками, такими как прорыв через фронт нагнетаемых вод или прямой прорыв в трещину нагнетательной скважины. В связи с этим множество скважин-кандидатов для проведения повторного ГРП не согласуются контролирующими подразделениями.

Представлена технология подбора скважин-кандидатов, основанная на принципиально новом методе образования трещин повторной операции ГРП – в направлении, отличном от направления трещины первой операции. Данная технология основана на локальном изменении напряженно-деформированного состояния пласта в непосредственной близости от добывающей скважины в процессе добычи за счет возникновения дополнительной объемной силы. Физически объемная сила описывается производением градиента давления, изменяющегося в результате разработки, и коэффициента Био, характерного для пород исследуемого региона. Эта сила приводит к изменениям не только величины компонентов тензора напряжения, но и направления действия максимального главного напряжения, контролирующего направление образования и развития трещины. Показана необходимость рассмотрения инновационных методов увеличения числа геолого-технологических мероприятий. Кроме того, проведен статистический анализ предложенных скважин-кандидатов. Обоснован новый подход к проведению повторного ГРП в скважинах с риском прорыва трещины через фронт нагнетаемых вод. Продемонстрирована оценка рисков и способ их решения. Показаны результаты интегрирования проекта на примере реальных скважин.

Предложенный подход позволяет увеличить число скважин-кандидатов для проведения ГРП, повысить коэффициент извлечения нефти и снизить риски при проведении геолого-технологических мероприятий.

Необходимость точной настройки моделей Brownfields по истории разработки при выполнении прогнозных расчетов в условиях неопределенности

*Г.Г. Саркисов, Д.М. Оленчиков
(Roxar Software Solutions)*

Традиционно к точности настройки гидродинамических моделей по истории разработки предъявляются достаточно жесткие требования. При этом не всегда учитываются следующие аспекты:

- сами данные являются неточными;
- модели являются некоторым упрощенным приближением реальной картины.

Особенно сложно соблюсти формальные требования к точности настройки в проектах, где требуется создать не одну реализацию модели, а представительный ансамбль адаптированных к истории моделей, на основе которого в последствии можно было бы оценивать неопределенность.

Рассмотрено несколько синтетических примеров, на которых показано что «точная» настройка на неточную историю ансамбля моделей, которые на самом деле являются приближенными (неточными) описаниями реального объекта, приводит к искаженной оценке прогнозных показателей и занижению имеющейся неопределенности. Представленные результаты подтверждают известный тезис, что представительный ансамбль моделей, используемый для оценки неопределенности прогнозных показателей разработки месторождения, должен включать также варианты (реализации) модели, качество адаптации которых не является высоким.

Развитие цифровой информационной системы «Подбор ГТМ» – планирование повторных многостадийных гидроразрывов пласта

*А.Н. Ситников, Р.Н. Асмандияров, А.А. Пустовских, Р.З. Зулъкарниев
(ООО «Газпромнефть НТЦ»)*

В 2014 г. с целью повышения эффективности программ геолого-технических мероприятий (ГТМ) начато создание цифровой информационной системы (ИС) «Подбор ГТМ». Разработана проектная документация, на основе которой создана ИС «Подбор ГТМ». В 2015 г. ИС «Подбор ГТМ» введена в промышленную эксплуатацию на пилотном объекте – Приобском месторождении (южная лицензионная территория). Месторождение относится к уникальным по величине запасов. В 2016 г. получен бизнес-эффект от внедрения – в результате реализации программы гидроразрыва пласта добыча нефти увеличилась на 54 % по сравнению с плановой. В 2017 г. разработан модуль подбора скважин для проведения повторного многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП).

Применение информационных технологий при формировании программ ГТМ позволило автоматизировать первичный подбор скважин-кандидатов, обеспечить оперативность и информативность процесса выполнения работ в режиме реального времени на web-ресурсе.

Внедрение ИС «Подбор ГТМ» позволило повысить эффективность ГТМ на Приобском месторождении. В 2016 г. сверх бизнес-плана выполнено 100 ГРП.

В настоящее время на Приобском месторождении северной лицензионной территории пробурено около 200 горизонтальных скважин с МГРП, длина горизонтального ствола достигает 1500 м, число стадий – до 30, с различными типами заканчивания и применением применяемых технологий.

Представлен анализ сопоставления параметров работы горизонтальных скважин с МГРП по начальным параметрам, накопленной добыче нефти, темпам падения дебита нефти в зависимости от различных технологий

Ввиду высоких темпов падения дебитов нефти особенно актуален вопрос применения технологий повторного МГРП. Разработан модуль подбора скважин-кандидатов, который планируется внедрить в ИС «Подбор ГТМ». Выполнен прогноз необходимого числа повторных МГРП и его эффективности в вероятностных вариантах на ближайшие 10 лет. Сделан акцент на применение хвостовиков с возможностью проведения адресного повторного ГРП по портам.

Повышение эффективности системы заводнения на ачимовских отложениях за счет трансформации системы разработки (на примере Поточного месторождения)

*О.В. Стародубцев (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
«КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени)*

Рассмотрены вопросы повышения эффективности реализуемой системы заводнения ачимовской толще Поточного месторождения. Оценена текущая система заводнения и предложен рабочий метод по увеличению ее эффективности.

Дана краткая геолого-физическая характеристика ачимовских толщ Поточного месторождения, а также выполнены анализ и оценка эффективности реализованной системы заводнения. Анализ проведен по трем направлениям: оценка влияния нагнетательных скважин на добывающие; оценка обеспечения охвата по разрезу и площади при использовании данных промыслово-геофизических исследований; оценка доли эффективной закачки методом материального баланса. Особое внимание уделено определению наиболее эффективного расстояния между нагнетательными и добывающими скважинами по данным фактически реализованных ячеек разработки. Определены наиболее перспективные пути оптимизации заводнения.

В качестве рабочей гипотезы рассмотрено направление повышения коэффициента охвата через увеличение плотности сетки на базе уже пробуренного фонда (трансформация системы) либо модификацию сетки на еще неразбуренных участках. Для проведения гидродинамических расчетов построена секторная геолого-гидродинамическая модель тектонически экранированной зоны в районе скв. 118Р. На гидродинамическом симуляторе проведены сравнительные расчеты трех площадных систем разработки: на базе обращенной девятиточечной, семиточечной и пятиточечной систем. Анализ результатов расчетов показал более высокую эффективность (по добыче нефти) сеток с большей плотностью скважин по сравнению с реализуемой.

В рамках опытно-промышленных работ даны рекомендации о трансформации реализованной системы заводнения на соседнем разбуренном участке за счет перевода части низкопродуктивного добывающего фонда под нагнетание воды, подготовлена и представлена адресная программа по оптимизации системы поддержания пластового давления, оценена дополнительная добыча нефти и экономическая эффективность реализации предложенной программы.

Лабораторное моделирование влияния градиента порового давления на ориентацию трещин гидроразрыва пласта

*С.Б. Турунтаев, Е.В. Зенченко, П.В. Зенченко, М.А. Тримонова,
Н.А. Барышников (Институт динамики геосфер РАН)*

Проведена серия лабораторных экспериментов для исследования влияния порового давления и неравнокомпонентности горизонтальных напряжений на траекторию трещины гидроразрыва пласта (ГРП). Предварительно выбраны безразмерные критерии, которые необходимо обеспечить для подобия процессов ГРП в лабораторных и пластовых условиях, подобран модельный материал на основе медицинского гипса с добавлением порландцемента и проведены исследования его деформационных, прочностных и фильтрационных свойств.

Дано описание установки для моделирования. В образце при изготовлении создавались три скважины: одна центральная и две диаметрально противоположные и равноудаленные от центра. Боковые скважины использовались для задания градиента порового давления путем нагнетания жидкости через одну скважину и отбора через другую с поддержанием постоянного давления в обеих скважинах. Предварительно образец был насыщен водным раствором гипса, нагружен горизонтальными и вертикальной нагрузкой. Через центральную скважину с постоянным расходом 0,2 или 0,3 см³/с закачивалась вязкая жидкость (вакуумное масло) до образования трещины ГРП. Поровое давление измерялось в скважине с ГРП и в разных точках образца.

Эксперименты проводились при вертикальных давлениях от 2 до 7 МПа, минимальных горизонтальных напряжениях от 0 до 0,8 МПа, максимальных горизонтальных напряжениях от 0,3 до 1,15 МПа (указано избыточное напряжение по отношению к атмосферному давлению). Трещины ГРП образовывались при давлении от 5,3 до 13 МПа. Давление в нагнетательной скважине составляло от 1 до 2 МПа; в скважине, через которую отбиралась жидкость, давление было равно атмосферному. Угол между направлением максимального горизонтального напряжения и линией, соединяющей скважины отбора и нагнетания жидкости задавался равным 22,5, 45 и 66°.

Установлено, что трещины ГРП, полученные в экспериментах с большим контрастом напряжений, характеризуются прямолинейным распространением в направлении максимального сжимающего напряжения, практически совпадая с ним. Направление трещин ГРП в экспериментах с низким контрастом горизонтальных напряжений в целом коррелирует с направлением максимального сжимающего напряжения, но трещина гидроразрыва отклоняется в направлении градиента порового давления (в сторону нагнетательной и от добывающей скважины).

Получена динамика изменения порового давления в процессе образования трещины ГРП. Давление ГРП и длина трещин увеличиваются с ростом вертикального давления и давления в нагнетательной скважине. Длина слабо зависит от горизонтальных напряжений, давление ГРП повышается с ростом горизонтальных напряжений. Наблюдается тенденция к уменьшению давления ГРП и длин трещин при увеличении угла между осью максимальных горизонтальных напряжений и градиентом порового давления.

Концепция интегрированного моделирования на месторождениях Северного Каспия

***Ф.С. Хисматуллина, А.Н. Лесной, Г.В. Джиджаев
(ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»)***

Как показывает опыт, выбор оптимального варианта разработки пласта, рассматриваемого независимо от наземного обустройства, а затем выбора оптимального варианта наземного обустройства, который рассчитывается без учета влияния пласта, не обеспечивает оптимальных экономических показателей системы в целом. При таком подходе отсутствует возможность анализа взаимовлияния одной системы на другую, что приводит к расхождению проектных и фактических показателей разработки. Эффективные решения могут быть приняты только в случае реализации проекта при совместном рассмотрении всех элементов, влияющих на технологические и экономические показатели разработки месторождения.

Система, ядром которой является регулярно актуализируемая интегрированная модель промысла, повышает качество принятия решений и общий уровень планирования разработки и эксплуатации месторождений.

Рассмотрена эффективность применения созданной интегрированной модели месторождения им. Ю. Корчагина, включающей гидродинамическую модель пласта, модели материального баланса, скважины и поверхностной сети, системы поддержания пластового давления. Целью создания такой единой модели являются оптимизация работы скважин, направленная на увеличение суммарной добычи нефти и уменьшение затрат; ускорение принятия оперативных решений; оптимизация производственного процесса; выполнение среднесрочных и долгосрочных расчетов.

Использование геолого-технологическими службами предприятия полноценной рабочей интегрированной модели позволяет оперативно оптимизировать технологические режимы работы скважин, обеспечивая максимизацию добычи нефти; избежать непродуктивных затрат на построение малоинформативных и недостоверных геолого-технологических моделей; повысить точность прогноза показателей разработки по сравнению с применением единственной гидродинамической модели.

Северо-Каспийский регион объединяет несколько нефтяных, нефтегазоконденсатных и газовых месторождений, которые находятся на различных стадиях подготовки к вводу в эксплуатацию. Месторождение им. Ю. Корчагина является первым месторождением, введенным в разработку на российском шельфе Северного Каспия. Недавно введено в эксплуатацию месторождение им. В. Филановского. На очереди – еще несколько месторождений. В перспективе планируется создание интегрированной модели всего Северного Каспия.

Комплексное воздействие электромагнитных полей и смешивающегося вытеснения на залежи трудноизвлекаемых запасов углеводородов с учетом объемных фазовых переходов

***Ф.С. Хисматуллина (ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»),
Л.А. Ковалева, Н.М. Насыров
(Башкирский гос. университет)***

Высокочастотное электромагнитное (ВЧ ЭМ) воздействие рассматривается как альтернативная технология для добычи нетрадиционных углеводородных ресурсов, таких как тяжелая нефть, битум или сланцы. Отличительной особенностью ВЧ ЭМ воздействия от других тепловых методов является возникновение в толще залежи объемных источников тепла. Вследствие диэлектрических потерь в среде энергия электромагнитных волн преобразуется в тепловую энергию, в результате повышается температура и уменьшается вязкость жидкости в пласте. Кроме того, во многих процессах проявляется дополнительное «не силовое» действие поля, дающее пролонгированный эффект воздействия. Еще более эффективно использование ВЧ ЭМ воздействия в сочетании с закачкой растворителя.

Рассмотрены задачи математического моделирования процессов нагнетания растворителя в пласт, нагрева пласта вследствие воздействия на него электромагнитного излучения и плавления твердой фазы, содержащейся в порах пласта. Принято, что в порах пласта температуры фаз и компонентов одинаковы. Подвижные фронты фазового перехода – геометрические поверхности нулевой толщины. Задача решена в два этапа. На первом этапе решена однообластная задача: пласт нагревается электромагнитным полем и одновременно закачивается растворитель, температура во всех точках пласта ниже температуры плавления твердой фазы. На втором этапе решена трехобластная задача с двумя границами раздела фаз: во второй области твердая фаза уже расплавилась, а в первой и третьей областях еще нет.

Исходная система уравнений, описывающих процесс тепло- и массопереноса при нагнетании вытесняющего агента в насыщенную пористую среду, включает уравнения неразрывности для всей смеси, закон фильтрации Дарси, уравнения притока тепла и уравнения неразрывности для компонентов. Задача решена методом конечных разностей по неявной схеме с использованием схемы с дробными шагами фронтов.

Анализ результатов показывает, что ВЧ ЭМ воздействие на многофазные диэлектрические среды приводит к интенсификации тепло- и массопереноса. Вследствие поглощения энергии поля пористой средой в ней появляются распределенные в объеме источники тепла, что обеспечивает более высокую скорость и равномерность прогрева пласта. Кроме того, электромагнитное поле способствует интенсивному объемному плавлению асфальтосмолистых отложений в призабойной зоне скважины. В случае одновременного нагнетания растворителя это позволяет повысить приемистость нагнетательной скважины и охват зоны воздействия полем, а при последующем отборе жидкости – увеличить дебит высоковязкой нефти.

Анализ и оптимизация гидродинамических моделей месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» для оперативного планирования геолого-технических мероприятий

*Д.А. Ходанович, Н.С. Бахтий
(Тюменское отделение «СургутНИПИнефть»,
ОАО «Сургутнефтегаз»)*

За последние годы требования к качеству и детальности гидродинамических моделей существенно повысились. С увеличением числа объектов разработки и длительности их эксплуатации растет число проводимых геолого-технических мероприятий (ГТМ). В настоящее время гидродинамические расчеты используются не только при проектировании разработки, но и при выборе ГТМ.

Дано описание модулей корпоративного гидродинамического симулятора ОАО «Сургутнефтегаз», используемых для контроля качества геолого-гидродинамических моделей и оперативного планирования ГТМ. Применение модуля «Анализатор РИГИС» позволило в автоматическом режиме проводить детальный анализ корректности геологических моделей на основе поинтервального сопоставления результатов интерпретации геофизических исследований для каждой скважины. С помощью модуля «Анализатор скважин» удалось выявить и устранить множественные ошибки исходных данных по крупным объектам разработки, среди которых некорректные траектории, интервалы перфорации, гидроразрыва пласта и др. Полный список на данный момент составляет 40 обрабатываемых ошибок.

Предложен новый подход к планированию ГТМ на одном из крупных объектов на завершающей стадии разработки с фондом более 5000 скважин. На основе алгоритма выделения песчаных тел реализован инструмент поиска зон с повышенной концентрацией подвижных запасов, не вовлеченных в разработку. Данный автоматизированный поиск перспективных зон использован при выборе скважин-кандидатов для бурения боковых стволов.

В корпоративном симуляторе реализован также модуль «Эффективность заводнения» для оптимизации систем поддержания пластового давления. Алгоритм реализован на основе анализа линий тока, построенных с использованием результатов гидродинамических расчетов в симуляторе.

С целью сокращения временных затрат на моделирование и принятие оперативных решений по разработке месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» предложен инструмент «Экспресс-модель». Модуль генерирует преобразованную геометрию, сохраняя трехмерную структуру вблизи стволов скважин и объединяя остальные ячейки по толщине. Расчет на такой модели позволил сократить в 9 раз время на моделирование и подбор эффективных вариантов разработки на одном из новых месторождений компании.

Внедрение рассмотренных программных модулей позволило повысить качество геолого-гидродинамических моделей компании, устранить ряд ошибок корпоративных баз данных по крупным объектам разработки, осуществить оперативный подбор ГТМ на месторождениях компании. Развитие корпоративного гидродинамического симулятора и функциональных возможностей его модулей позволяет снизить затраты на аналогичное импортное программное обеспечение и зависимость от него.

Моделирование нелинейной фильтрации и геомеханики сопряженными разномасштабными моделями

*Н.А. Черемисин, С.В. Костюченко
(ООО «Тюменский нефтяной научный центр»)*

На поздних стадиях разработки месторождений возрастает роль гидродинамического регулирования процесса вытеснения. Это необходимо для увеличения градиентов давления при фильтрации флюидов в слабодренлируемых зонах пласта, использования энергии внутренних напряжений пород и их упругопластических свойств и соответственно более полного довытеснения нефти из этих зон. При этом коэффициент извлечения нефти можно повысить на 15-25 % в зависимости от особенностей строения коллектора. Актуальность этого направления обусловлена высокой долей высокообводненных запасов в общей структуре текущих извлекаемых запасов компании «Роснефть» (около 60 %, более 5000 млн. т).

Рассмотрены проблемы геолого-технологического моделирования традиционного и циклического заводнения, заводнения с применением методов увеличения нефтеотдачи (МУН) и других видов воздействия на пласты. Во-первых, в современных симуляторах, как правило, отсутствует практическая возможность моделирования неравновесной нелинейной фильтрации (нелинейность закона Дарси, предельный градиент сдвига, зависимость остаточной нефтенасыщенности от градиентов давления). Во-вторых, отсутствует возможность моделирования ползучей необратимой деформации (как правило, процесс необратимой деформации в симуляторах происходит мгновенно). В-третьих, существуют проблемы моделирования воздействий физико-химических МУН в полномасштабных гидродинамических моделях. Это обусловлено загромождением исходных моделей и невозможностью корректно рассчитать физико-химические и другие процессы, происходящие на первых десятках метров от скважины. Измельчение расчетной сетки вокруг скважины требует введения в цифровую модель месторождения огромного дополнительного числа ячеек.

Предложена технология встраивания («вживления») результатов расчетов, полученных на секторных моделях с использованием «РН-КИМ» и других специализированных симуляторов, а также на аналитических моделях, в полномасштабные модели. При этом появляется возможность распараллеливания этих расчетов. Результаты вычислительных экспериментов показали, что такая технология позволяет адекватно моделировать процессы конусообразования (газ/вода), воздействия на пласты МУН, ползучей необратимой деформации коллекторов и решать другие задачи без применения локальных расчетных сеток (LGR).

Использование предложенного подхода совместно с уже известной технологией сопряжения разнородных секторных моделей позволит существенно расширить спектр задач, решаемых на полномасштабных геолого-технологических моделях.

Двухфазные гранулированные жидкости

*В.В. Шелухин (Институт гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН)*

На основе базовых термодинамических принципов предложена новая математическая модель двухфазной гранулированной жидкости. Модель позволяет учесть взаимодействия частиц не только с жидкостью, но и между собой. Первая фаза представляет собой вязкую ньютоновскую жидкость. Гранулированность второй фазы описывается в рамках понятия континуума Коссера, когда каждая материальная частица трактуется как твердое тело. При таком подходе, известном как теория микрополярных жидкостей, принимаются во внимание микровращения и микроинерция. Важную роль в формулировке закона сохранения внутренних моментов играет тензор моментных напряжений и антисимметричная часть тензора напряжений Коши.

В качестве иллюстрации рассматриваются течения типа Пуазейля между двумя параллельными плоскостями под действием заданного градиента давления. Рассмотрены различные классы реологических уравнений состояния и коэффициентов межфазного трения. Изучен вопрос, какая фаза течет быстрее вязкая или гранулированная. В случае, когда парциальные плотности одинаковы, ответ оказывается неоднозначным и зависит от соотношения вязкостей. Выявлены условия, когда гранулированная фаза концентрируется в центре, возле стенок или где-то между ними. Ранее подобный вопрос изучался для однофазной жидкости.

Для заметок

Для заметок