

Оглавление

От редакционного совета	xvii
Введение	xxiii
Предисловие	xxv
Благодарности	xxviii
ГЛАВА 1. Пластовое моделирование	1
1.1. Введение	1
1.2. Необходимость пластового моделирования	1
1.3. Традиционные подходы к моделированию	2
1.4. Гидродинамическое моделирование пласта	12
1.5. Заключение	19
1.6. Проект главы	20
ГЛАВА 2. Основные понятия инжиниринга пласта и свойства пласта и пластовых флюидов	26
2.1. Введение	26
2.2. Основные понятия инжиниринга пласта	26
2.2.1. Потенциал течения	26
2.2.2. Закон Дарси	30
2.2.3. Стационарная и нестационарная фильтрация	33
2.3. Свойства породы-коллектора и флюидов	35
2.3.1. Свойства породы-коллектора	35
2.3.2. Свойства флюида	40
2.3.3. Физические свойства пласта	57
2.3.4. Модели определения относительной проницаемости для двух- фазной системы	64
2.3.5. Модели определения относительной проницаемости при трех- фазной фильтрации	65
2.4. Закон сохранения массы	70
2.4.1. Закон сохранения массы в случае однофазной одномерной фильтрации	71
2.4.2. Закон сохранения массы для однофазной фильтрации в трех- мерной постановке	73
2.5. Основное уравнение однофазной фильтрации	74
2.6. Проект главы	74

2.6.1.	Описание пласта	74
2.6.2.	Пористость и проницаемость	74
2.6.3.	Свойства флюида	77
2.6.4.	Относительная проницаемость	80
2.6.5.	Капиллярное давление	80
ГЛАВА 3.	Основные математические понятия	92
3.1.	Введение	92
3.2.	Основы дифференциального исчисления	93
3.2.1.	Производные и дифференцирование	93
3.2.2.	Нахождение частной производной	103
3.2.3.	Разложение в ряд Тейлора	105
3.3.	Основные дифференциальные уравнения	106
3.3.1.	Основные определения	107
3.3.2.	Решение дифференциальных уравнений	109
3.3.3.	Начальные и граничные условия	110
3.3.4.	Векторные дифференциальные операторы	112
3.4.	Разностное исчисление	113
3.4.1.	Конечно-разностные операторы	114
3.4.2.	Взаимосвязь между производной и конечно-разностными операторами	120
3.5.	Основы линейной алгебры	124
3.5.1.	Скалярные величины и операции	125
3.5.2.	Векторные величины и операции	125
3.5.3.	Матрицы и операции над ними	129
3.5.4.	Матричное представление алгебраических уравнений	133
ГЛАВА 4.	Вывод основных уравнений однофазной фильтрации	141
4.1.	Введение	141
4.2.	Уравнение неразрывности для течений с различной геометрией потока	142
4.3.	Вывод обобщенных уравнений фильтрации	147
4.3.1.	Уравнения фильтрации в декартовых координатах	147
4.3.2.	Уравнение фильтрации в цилиндрических координатах	152
4.4.	Разновидности уравнений фильтрации	160
4.4.1.	Уравнение фильтрации несжимаемого флюида	160
4.4.2.	Уравнение фильтрации слабосжимаемого флюида	163
4.4.3.	Уравнение фильтрации сжимаемого флюида	167
4.5.	Начальные и граничные условия	169
4.5.1.	Условие на границе области, накладываемое на давление: краевая задача Дирихле	171
4.5.2.	Градиент давления, задаваемый на границе: краевая задача Неймана	171

4.5.3.	Задание на границе давления и его градиента	172
4.6.	Проект главы	175
4.6.1.	Уравнение фильтрации несжимаемого флюида в пласте А-1	176
4.6.2.	Постановка задачи фильтрации слабосжимаемого флюида в пласте А-1	177
4.6.3.	Вывод уравнения фильтрации сжимаемого флюида в пласте А-1	177

ГЛАВА 5. Конечно-разностная аппроксимация уравнений линейного потока	185
5.1. Введение	185
5.2. Построение и свойства конечно-разностных сеток	186
5.2.1. Блочнo-центрированные сетки	187
5.2.2. Сетки с распределенными узлами	188
5.2.3. Конфигурации площадных сеток	190
5.2.4. Вертикальная геометрия сетки	200
5.3. Конечно-разностная аппроксимация пространственной производной	202
5.3.1. Аппроксимация на равномерной одномерной сетке	204
5.3.2. Аппроксимация на одномерной нерегулярной сетке	206
5.3.3. Приближение в нескольких измерениях	206
5.4. Аппроксимация производной по времени с использованием метода конечных разностей	208
5.4.1. Аппроксимация временной производной методом левых разностей	208
5.4.2. Аппроксимация временной производной методом правых разностей	209
5.4.3. Аппроксимация временной производной методом центральных разностей	210
5.5. Реализация начальных и граничных условий	211
5.5.1. Реализация начальных условий	211
5.5.2. Реализация граничных условий	212
5.6. Явная и неявная конечно-разностная постановка	223
5.6.1. Явная формулировка	223
5.6.2. Неявная формулировка	236
5.6.3. Погрешность аппроксимации, устойчивость и анализ согласованности конечно-разностных схем	243
5.7. Проект главы	254

ГЛАВА 6. Моделирование скважин	265
6.1. Введение	265
6.2. Метод источников и стоков	265

6.2.1.	Определение соотношений между забойным давлением и дебитом скважины на установленном и псевдоустановившемся режимах	266
6.2.2.	Моделирование скважин в пластовых симуляторах	272
6.3.	Моделирование одиночных скважин	305
6.4.	Использование гибридных сеток для представления блоков, содержащих скважины	307
6.5.	Объединение модели пласта с гидравлической моделью течения в стволе скважины	310
6.6.	Проект главы	317
ГЛАВА 7.	Решение системы линейных разностных уравнений	328
7.1.	Введение	328
7.2.	Матричная форма записи разностных уравнений	329
7.2.1.	Дифференциальные уравнения, описывающие одномерные задачи фильтрации	329
7.2.2.	Конечно-разностные уравнения для двухмерных задач фильтрации	336
7.2.3.	Конечно-разностные уравнения для трехмерных задач фильтрации	340
7.3.	Методы решения	344
7.3.1.	Прямые методы	344
7.3.2.	Уравнения в конечных разностях для описания пластов с нерегулярными границами	362
7.3.3.	Расположение блоков сетки	365
7.3.4.	Итерационные методы	370
7.3.5.	Сравнение прямых и итерационных методов	439
7.4.	Проект главы	440
ГЛАВА 8.	Численное решение уравнений однофазной фильтрации	462
8.1.	Введение	462
8.2.	Однофазная фильтрация несжимаемого флюида	463
8.2.1.	Конечно-разностное представление уравнения фильтрации несжимаемого флюида	464
8.2.2.	Определение параметров проводимости для уравнения фильтрации несжимаемого потока	465
8.2.3.	Матричное представление уравнения фильтрации несжимаемого флюида	468
8.2.4.	Реализация граничных условий в матричном представлении	471
8.2.5.	Решение конечно-разностных уравнений фильтрации несжимаемого флюида	472
8.2.6.	Уравнение несжимаемого потока с учетом гравитации	481

8.2.7.	Использование метода материального баланса для проверки решения задачи о фильтрации несжимаемого флюида . . .	485
8.3.	Задача о фильтрации однофазного слабосжимаемого флюида . . .	486
8.3.1.	Конечно-разностная аппроксимация уравнений фильтрации слабосжимаемого флюида	487
8.3.2.	Адаптация решения по времени	490
8.3.3.	Использование метода материального баланса для проверки решения задачи о фильтрации слабосжимаемого флюида	496
8.4.	Однофазная фильтрация сжимаемого флюида	497
8.4.1.	Линеаризация уравнений фильтрации	500
8.4.2.	Использование метода материального баланса для проверки решения задачи о фильтрации сжимаемого флюида . . .	511
8.5.	Анализ результатов моделирования продуктивных пластов с использованием метода материального баланса	512
8.6.	Проект главы	522
ГЛАВА 9.	Моделирование многофазного потока в нефтяных пластах .	559
9.1.	Введение	559
9.2.	Уравнения сохранения массы для многофазного потока	561
9.3.	Уравнения фильтрации для многофазного потока	566
9.4.	Основные постановки задач фильтрации многофазного флюида . .	570
9.4.1.	Модель двухфазного течения нефти с водой	571
9.4.2.	Модель потока нефти с газом	573
9.4.3.	Модель трехфазного потока нефть/газ/вода	575
9.5.	Конечно-разностная аппроксимация уравнений фильтрации	579
9.5.1.	Дискретизация уравнений многофазной фильтрации	579
9.5.2.	Линеаризация уравнений многофазной фильтрации	616
9.5.3.	Конечно-разностные уравнения	656
9.6.	Методы решения конечно-разностных уравнений фильтрации многофазных флюидов	672
9.6.1.	Метод совместного решения (SS-метод)	673
9.6.2.	IMPES-метод	689
9.6.3.	Метод последовательного решения (SEQ-метод)	707
9.6.4.	Сравнение и выбор методов решения	747
9.7.	Рассмотрение типичных для задач многофазной фильтрации проблем моделирования	752
9.7.1.	Постановка начальных условий	753
9.7.2.	Постановка граничных условий	758
9.7.3.	Моделирование истечения флюида	762
9.7.4.	Моделирование закачки флюида в пласт	771
9.7.5.	Учет разрывности распределения газовой фазы и изменения давления насыщения	777
9.7.6.	Учет наклона кривых относительной проницаемости	779

9.7.7.	Автоматический выбор временного шага	779
9.8.	Проект главы	782
9.8.1.	Трехфазная фильтрационная модель	782
9.8.2.	Двухфазная фильтрационная задача о нагнетании воды в пласт	787

ГЛАВА 10. Практические аспекты моделирования продуктивных пла-

стов	809
10.1.	Введение	809
10.2.	Цели исследования	813
10.3.	Анализ данных	815
10.3.1.	Геофизические и геологические данные	817
10.3.2.	Инженерно-геофизические данные	824
10.3.3.	Разрешение противоречий в данных	871
10.4.	Построение модели	872
10.4.1.	Выбор модели	872
10.4.2.	Дискретизация модели	887
10.4.3.	Присваивание свойств ячейкам сетки	893
10.5.	Адаптация модели	920
10.5.1.	Цели адаптации пластовой модели	922
10.5.2.	Выбор метода адаптации модели	923
10.5.3.	Отбор промысловых данных (конкретизация и согласо- вание данных)	925
10.5.4.	Выбор параметров пласта для процесса адаптации	931
10.5.5.	Корректировка параметров пласта при согласовании моде- ли с данными по истории добычи	932
10.5.6.	Качество адаптации модели	936
10.6.	Прогнозирование поведения пласта	938
10.6.1.	Выбор вариантов при прогнозировании	938
10.6.2.	Задача управления разработкой пласта при пластовом мо- делировании	940
10.6.3.	Подтверждение и анализ прогнозов, полученных с помо- щью гидродинамического симулятора	948
10.7.	Заключительное напутствие	949
10.8.	Проект главы	951

ГЛАВА 11. Взаимосвязь численного моделирования продуктивных пла-

стов и классических методов нефтегазового инжиниринга	969
11.1.	Введение	969
11.2.	Взаимосвязь между численным моделированием продуктивных пластов и классическим методом расчета материального баланса	970
11.2.1.	Уравнение материального баланса в общем виде	971

11.2.2. Метод Маскета для пластов, характеризуемых режимом растворенного газа	976
11.3. Связь между численным моделированием продуктивных пластов и аналитическими методами	978
11.3.1. Анализ кривых восстановления давления	979
11.3.2. Анализ Бакли–Леверетта	981
11.4. Связь между численным моделированием продуктивных пластов и анализом кривых падения добычи	985
11.4.1. Кривые падения добычи Арпса [3]	986
11.4.2. Типовые кривые падения добычи	997
11.5. Заключение	997

Приложение А. Методы интерполяции для обработки данных при пластовом моделировании	1004
Табличная интерполяция	1004
Обработка данных с учетом эмпирической кривой	1017

Приложение В. Методы решения уравнений многофазной фильтрации	1027
Алгоритм Томаса в приложении к блочным диагональным матрицам	1027
Процедура последовательной свёрхрелаксации в приложении к многофазным фильтрационным задачам (SOR)	1029
Блочный неявный метод переменных направлений (ADIP)	1029
Блочный строго неявный метод (SIP)	1030

Приложение С. Архитектура вычислительной системы	1032
Компьютеры со скалярной обработкой данных	1035
Компьютеры с векторной обработкой данных	1037
Компьютеры с параллельной обработкой данных	1039
Системы RISC	1040

Предметный указатель	1043
---------------------------------------	-------------