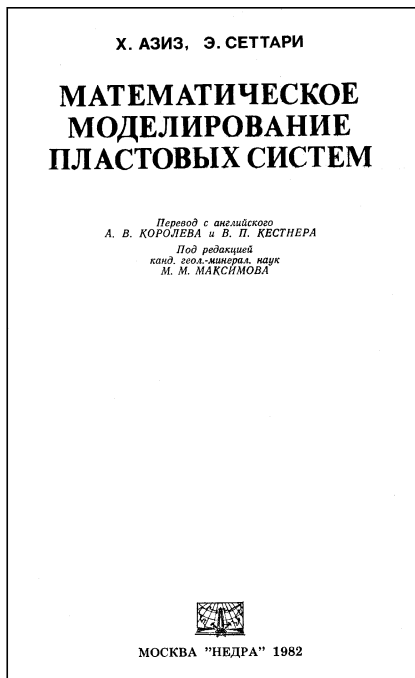


УДК 622.276.1/4(73)



Азиз Х., Сеттари Э.

Математическое моделирование пластовых систем. — Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 416 стр.

Изложены теоретические основы математического моделирования пластовых систем и описаны методы решения уравнений фильтрации с помощью вычислительных машин. Даны рекомендации по конструированию математических и компьютерных моделей, их анализ и примеры программных систем.

Для инженерно-технических работников нефтяной промышленности, научно-исследовательских организаций и высших учебных заведений, занимающихся анализом и проектированием разработки нефтяных месторождений, а также для студентов вузов.

Репринтное издание (оригинальное издание: М.: «Недра», 1982 г.).

ISBN 5-93972-355-1

© Институт компьютерных исследований, 2004

<http://rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к стереотипному изданию	3
Предисловие	5
Условные обозначения	7

Глава 1.

Введение

1.1. Что такое машинная модель?	12
1.1.1. Математическая модель	12
1.1.2. Численная модель	13
1.1.3. Машинная модель	13
1.2. Другие модели	13
1.3. На какие вопросы может ответить машинная модель?	14
1.4. Заключительные замечания	15

Глава 2.

Уравнения фильтрации флюидов

2.1. Введение	16
2.2. Закон сохранения массы	17
2.2.1. Однофазная фильтрация	17
2.2.2. Многофазная фильтрация	19
2.3. Закон Дарси	21
2.3.1. Однофазная фильтрация	21
2.3.2. Многофазная фильтрация	22
2.4. Основные уравнения фильтрации	22
2.4.1. Однофазная фильтрация	23
2.4.2. Многофазная фильтрация	25
2.4.3. Использование псевдопотенциала	26
2.4.4. Граничные условия	26
2.5. Другие формы уравнений многофазной фильтрации	27
2.5.1. Представление в параболической форме	27
2.5.2. Представление в гиперболической форме	29
2.6. Уравнения фильтрации, не подчиняющейся закону Дарси	32
2.6.1. Большие скорости фильтрации (инерционные и турбулентные эффекты)	32
2.6.2. Пороговые явления и явления проскальзывания	33
2.6.3. Неньютоновская фильтрация	34
2.6.4. Другие эффекты	34
2.7. Свойства флюидов и породы	34
2.7.1. Свойства флюидов	35
2.7.2. Свойства породы	36
2.8. Заключительные замечания	43
Упражнения	43

Глава 3.

Одномерная однофазная фильтрация

3.1. Введение	47
3.2. Конечно-разностные аппроксимации	48
3.2.1. Дискретизация по пространству	49

3.2.2. Дискретизация во времени	54
3.2.3. Погрешности дискретизации	56
3.3. Другие избранные методы	63
3.3.1. Явные методы	63
3.3.2. Другие неявные методы	64
3.3.3. Методы с использованием системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ODE-методы)	65
3.3.4. Сравнение методов	69
3.4. Типы сеток и граничные условия	70
3.4.1. Два способа построения сетки	71
3.4.2. Граничные условия	72
3.5. Дискретизация уравнений одномерного течения флюидов в декартовых координатах	76
3.5.1. Разностные уравнения для неравномерной сетки	76
3.5.2. Разностные уравнения в матричной форме	81
3.5.3. Учет переменных коэффициентов	83
3.6. Дискретизация одномерных уравнений фильтрации в радиальных цилиндрических координатах	85
3.6.1. Разностные уравнения для неравномерной сетки	87
3.6.2. Разностные уравнения в матричной форме	90
3.6.3. Учет переменных коэффициентов	90
3.7. Некоторые свойства конечно-разностных уравнений	91
3.7.1. Существование решения и материальный баланс	91
3.7.2. Учет нелинейностей	96
3.8. Выводы	103
Упражнения	103

Глава 4.

Решение систем уравнений с трехдиагональными матрицами

4.1. Введение	109
4.2. Методы решения	110
4.2.1. Алгоритм Томаса	110
4.2.2. Алгоритм Танга	113
4.2.3. Решение систем уравнений с симметричными трехдиагональными матрицами	114
4.2.4. Специальные случаи существования неединственного решения	116
4.2.5. Другие специальные случаи	117
Упражнения	117

Глава 5.

Одномерная многофазная фильтрация

5.1. Введение	121
5.2. Метод совместного решения	122
5.2.1. SS-метод для двухфазной фильтрации	122
5.2.2. Использование SS-метода при расчетах трехфазной фильтрации	126
5.2.3. Другие формулировки SS-метода	128
5.3. Метод, неявный по давлению, явный по насыщенности (IMPES-метод)	130
5.3.1. IMPES-метод для случая трехфазной фильтрации	130
5.3.2. Другие варианты IMPES-метода	132
5.4. Анализ SS- и IMPES-методов	133
5.4.1. Устойчивость решений	133
5.4.2. Существование и единственность решения	140
5.4.3. Сходимость решений	143
	403

5.5. Учет нелинейностей	144
5.5.1. Взвешивание проводимостей	145
5.5.2. Аппроксимация проводимостей во времени	149
5.5.3. Нелинейность, обусловленная функцией P_e	160
5.5.4. Просачивание газа	161
5.6. Метод последовательного решения (SEQ-метод)	163
5.6.1. SEQ-метод при двухфазной фильтрации	163
5.6.2. Другие формы и способы получения уравнений SEQ-метода	167
5.6.3. Численные результаты	168
5.6.4. SEQ-метод в случае трехфазной фильтрации	171
5.6.5. Выводы	174
5.7. Учет членов отбора	174
5.7.1. Дифференциальная форма граничных условий	175
5.7.2. Дискретизация граничных условий	178
Упражнения	182

Глава 6.

Решение систем уравнений с блочно-трехдиагональными матрицами

6.1. Введение	189
6.2. Методы решения	190
6.2.1. Обобщение алгоритма Томаса	190
6.2.2. Применение методов, используемых для ленточных матриц	192

Глава 7.

Однофазная двумерная фильтрация

7.1. Введение	193
7.2. Классификация двумерных задач	193
7.2.1. Задачи на площади с координатами x, y	193
7.2.2. Задачи для вертикального сечения с координатами x, z	194
7.2.3. Задача с одной скважиной в координатах r, z	195
7.2.4. Комментарии к двумерным моделям	196
7.3. Дискретизация уравнений фильтрации	196
7.3.1. Разностные аппроксимации	197
7.3.2. Устойчивость разностных схем	199
7.4. Граничные условия	200
7.4.1. Границы «без расхода» (непроницаемые границы)	200
7.4.2. Границы «с расходом»	201
7.4.3. Дискретизация граничных условий	201
7.5. Начальные условия	204
7.6. Учет нелинейностей	205
7.7. Учет давления в отдельных скважинах	205
7.8. Уравнения в матричной форме	210
7.9. Специальные методы для двумерных задач	210
7.9.1. Явные методы переменных направлений (ADE-методы)	211
7.9.2. неявный метод переменных направлений (ADE-метод) и связанные с ним методы	213
7.9.3. Сравнение методов	216
7.10. Способы построения сеток	216
7.10.1. Неравномерные двумерные сетки	217
7.10.2. Использование криволинейной сетки	218
7.11. Заключительные замечания	222
Упражнения	222

Глава 8.

Решение систем уравнений с пятидиагональными матрицами

8.1. Введение	225
8.2. Прямые методы решения	228
8.2.1. LU-разложение матрицы	228
8.2.2. Упорядочение уравнений	231
8.2.3. Методы для разреженных матриц	232
8.3. Итерационные методы	236
8.3.1. Поточечный метод Якоби	238
8.3.2. Поточечный метод Гаусса — Зейделя	240
8.3.3. Поточечный метод верхней релаксации (SOR-метод)	240
8.3.4. Линейный и блочный SOR-методы	242
8.3.5. Методы аддитивной коррекции	243
8.3.6. Итерационные неявные методы переменных направлений (ADI-методы)	246
8.3.7. Строго неявный метод	250
8.3.8. Другие методы	253
8.3.9. Сравнение итерационных методов	254
8.3.10. Практические выводы об использовании итерационных методов	258
8.4. Сравнение итерационных и прямых методов	261
8.5. Заключительные замечания	264
Упражнения	264

Глава 9.

Многофазная двумерная фильтрация

9.1. Введение	269
9.2. Классификация двумерных задач	269
9.2.1. Площадные задачи ($x-y$)	269
9.2.2. Профильные задачи ($x-z$)	270
9.2.3. Задачи с одиночной скважиной ($r-z$)	271
9.2.4. Общие замечания	272
9.3. Методы решения и их сравнение	273
9.3.1. Дискретизация в двумерном случае	273
9.3.2. Устойчивость решений SS и IMPES-методов при двумерной фильтрации	274
9.3.3. Сравнение различных методов решения уравнений	277
9.4. Граничные условия	281
9.4.1. Дифференциальная постановка	281
9.4.2. Условия совместимости и ограничения	283
9.4.3. Конечно-разностная формулировка граничных условий	283
9.5. Начальные условия	287
9.6. Моделирование водоносных пластов	288
9.7. Моделирование площадных и профильных задач	291
9.7.1. Использование криволинейной сетки	291
9.7.2. Учет отдельных скважин	293
9.7.3. Явления, связанные с ориентацией сетки	295
9.8. Моделирование задач с одиночной скважиной	299
9.8.1. Учет членов отбора (модель скважины)	300
9.8.2. Сопоставление устойчивости решения и эффективности различных способов учета проводимостей	305
9.8.3. Практические соображения	307
9.9. Заключительные замечания	309
	405

Глава 10.

Решение уравнений с блочно-пятидиагональными матрицами

10.1. Введение	311
10.2. Прямые методы	312
10.3. Итерационные методы	313
10.3.1. Метод BSOR	313
10.3.2. Итерационный метод ADI	314
10.3.3. Метод SIP	315
10.3.4. Сравнение результатов итерационных методов	315
10.4. Сравнение результатов итерационных и прямых методов	316
10.5. Заключительные замечания	316

Глава 11.

Трехмерные задачи и методы их решения

11.1. Введение	318
11.2. Однофазная фильтрация	318
11.2.1. Основное уравнение и его дискретизация	318
11.2.2. Специальные методы для решения трехмерных задач	320
11.2.3. Прямые методы решения	322
11.2.4. Итерационные методы	324
11.2.5. Сравнение методов	329
11.3. Многофазная фильтрация	331
11.3.1. Основные методы решения и необходимые машинные затраты	331
11.3.2. Методы решения матричных уравнений	332
11.4. Заключительные замечания	332

Глава 12.

Специальные вопросы

12.1. Введение	335
12.2. Псевдофункции	335
12.2.1. Модель вертикального равновесия (Коутс и др., 1971)	336
12.2.2. Другие псевдофункции	339
12.3. Метод трубок тока и связанные с ним модели	341
12.4. Моделирование задач с переменным давлением насыщения	342
12.5. Моделирование систем, не описываемых с помощью моделей нелетучей нефти	346
12.5.1. Моделирование «смешивающегося» вытеснения	347
12.5.2. Моделирование композиционных эффектов	350
12.6. Функции от насыщенности, зависящие от истории процесса разработки	352
12.6.1. Физическая модель гистерезиса	352
12.6.2. Учет гистерезиса в численных расчетах	354
12.7. Моделирование трещиноватых пластов	356
12.8. Автоматический выбор временного шага	358
12.9. Заключительные замечания	360

Глава 13.

Практические соображения

13.1. Разработка программ	361
13.1.1. Разработка математической модели	361
13.1.2. Разработка численной модели	362

13.1.3. Разработка машинной модели (программы)	362
13.2. Использование программ	367
13.2.1. Этапы модельного исследования	367
13.2.2. Выбор и разработка модели	369
13.2.3. Подгонка параметров модели по истории разработки	373
13.3. Заключительные замечания	376
Приложение А. Элементы матричной алгебры	377
А.1. Введение	377
А.2. Основные понятия	377
А.2.1. Поле	377
А.2.2. Вектор	377
А.2.3. Линейные векторные пространства	378
А.2.4. Системы линейных уравнений. Матрицы	379
А.2.5. Определитель матрицы	380
А.2.6. Собственные значения и собственные векторы	381
А.2.7. Нормы векторов и матриц	381
А.2.8. Дополнительные определения	382
А.3. Некоторые фундаментальные теоремы	384
Список литературы	386

**Халид Азиз
Энтонин Сеттари**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТОВЫХ СИСТЕМ

*Художественный редактор В. В. Шутько
Технический редактор Л. Н. Шиманова
Корректоры Е. В. Мухина, К. С. Торопцева*

Подписано в печать 31.05.04. Формат 60 × 84¹/₁₆.

Печать офсетная. Бумага офсетная №1.

Усл. печ. л. 24,18. Уч. изд. л. 24,56.

Гарнитура Таймс. Тираж 700 экз. Заказ №

АНО «Институт компьютерных исследований»

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

Лицензия на издательскую деятельность ЛУ №084 от 03.04.00.

<http://rcd.ru> E-mail: borisov@rcd.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ОАО «Дом печати-Вятка».

610033, г. Киров, ул. Московская, 122.
