





**Майк Р. Карлсон**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕФТЕГАЗОВЫХ  
ПЛАСТОВ**

Перевод с английского  
под общей редакцией  
к. ф.-м. н. П. А. Тарасова, К. В. Торопова  
(ОАО «НК «Роснефть»)



**РОСНЕФТЬ**

**БИБЛИОТЕКА НЕФТЯНОГО ИНЖИНИРИНГА**

УДК 622.276

ББК 33.361

К 239

*Издание серии «Библиотека нефтяного инжиниринга»  
осуществляется при финансовой поддержке ОАО «НК «Роснефть»*

Интернет-магазин

**MATHESIS**

<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- нефтегазовые технологии

**Карлсон М. Р.**

Практическое моделирование нефтегазовых пластов. — М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. — 944 с.

В книге доступным языком изложены рекомендации, касающиеся вопросов гидродинамического моделирования пластовых систем в нефтегазовой отрасли. Приведены модели, используемые для этого, и физические основы процессов, которые они описывают. Автор монографии — инженер по разработке с более чем 30-летним опытом работы, один из ключевых участников проекта Leismer Black Gold SAGD.

Книга основана на материале курсов по гидродинамическому моделированию, преподаваемых автором более 20 лет, и примерах из реальных проектов.

Издание будет интересно желающим ознакомиться с авторским видением рекомендаций по моделированию и практическими примерами из опыта освоения месторождений Канады.

**ISBN 0-87814-803-5 (англ.)**

**ISBN 978-5-4344-0099-2 (рус.)**

**ББК 33.361**

© 2003 by PennWell Corporation, Oklahoma, USA

© Перевод на русский язык, Ижевский институт компьютерных исследований, 2012

© Оформление серии, ОАО «НК «Роснефть», 2012

*Practical Reservoir Simulation* was originally published in English in 2003.

This translation is published by arrangement with PennWell Corporation.

<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

# Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| От редакционного совета . . . . .   | 35        |
| Благодарности . . . . .   | 36        |
| Благодарность за использование графических материалов . . . . .   | 37        |
| Примечание к графикам, сделанным от руки . . . . .  | 42        |
| <b>Часть I. Гидродинамическое моделирование пластов с нелетучей нефтью (самый распространенный метод)</b> |           |
| <b>ГЛАВА 1. Введение . . . . .</b>  | <b>45</b> |
| <b>Таинство гидродинамического моделирования . . . . .</b>  | <b>45</b> |
| Проверка качества . . . . .   | 45        |
| Широта технологии . . . . .   | 46        |
| Значимость гидродинамического моделирования . . . . .   | 47        |
| Распознавание образов . . . . .   | 47        |
| Концептуальная модель . . . . .   | 48        |
| Геологические модели . . . . .  | 48        |
| Модель изменяется со временем . . . . .   | 49        |
| Опасность применения . . . . .  | 50        |
| Предыдущий опыт . . . . .   | 50        |
| Ошибки и неудачи . . . . .  | 50        |
| Управление рисками . . . . .  | 51        |
| Демография отрасли . . . . .  | 52        |
| <b>Цели книги . . . . .</b>   | <b>52</b> |
| Конкретные цели . . . . .   | 52        |
| Содержание книги . . . . .  | 53        |
| Сложные вопросы . . . . .   | 54        |
| <b>Гидродинамическое моделирование на протяжении всего цикла разработки пласта . . . . .</b>              | <b>54</b> |
| Анализ геологии . . . . .   | 54        |
| Анализ показателей разработки пласта . . . . .  | 55        |
| Канадские примеры . . . . .   | 62        |
| Открытая информация . . . . .   | 62        |
| Заключение . . . . .  | 64        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>   | <b>64</b> |
| <b>ГЛАВА 2. Математическое обоснование . . . . .</b>  | <b>65</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>   | <b>65</b> |



|   |    |
|---|----|
| Подробный вывод формул и уравнений . . . . .  | 66 |
| Закон сохранения вещества (определение) . . . . .   | 66 |
| Уравнение состояния, или PVT-свойства (определение) . . . . .   | 67 |
| Уравнение фильтрации: закон Дарси (определение) . . . . .   | 67 |
| Понятие тензора (ограничение) . . . . .   | 69 |
| Применение девятиточечной схемы (ограничение и альтернативное построение) . . . . .                                     | 69 |
| Составление матричного решения (определение) . . . . .  | 70 |
| Погрешности и дискретизация в пространстве (ограничение) . . . . .  | 72 |
| Анализ чувствительности сетки (практические навыки) . . . . .   | 72 |
| Погрешности и дискретизация по времени, то есть временные шаги (ограничение) . . . . .                                  | 72 |
| Турбулентное течение (ограничение, альтернативная формула) . . . . .  | 73 |
| Псевдодавления (ограничение и альтернативная формулировка) . . . . .  | 74 |
| Строение матрицы (уравнения и практические знания) . . . . .  | 74 |
| Устойчивые члены матриц (формулировка) . . . . .  | 76 |
| Явные и неявные решения (определение и практические знания) . . . . .   | 76 |
| Внутренний и внешний циклы (определение) . . . . .  | 77 |
| Многофазные системы (определение) . . . . .   | 77 |
| Учет изменений относительной фазовой проницаемости (определение) . . . . .  | 78 |
| Метод Ньютона – Рафсона (определение) . . . . .   | 79 |
| Материальный баланс (практические знания) . . . . .   | 79 |
| Фронтальное вытеснение (недостаток) . . . . .   | 80 |
| Теория Бакли – Леверетта (формулировка) . . . . .   | 81 |
| Взвешивание проводимостей (формулировка) . . . . .  | 81 |
| Влияние разных методик: взвешивание в направлении, противоположном движению потока (ограничение/формулировка) . . . . . | 81 |
| Капиллярное давление (ограничение) . . . . .  | 84 |
| Фундаментальные проблемы (ограничение) . . . . .  | 85 |
| Устойчивость одномерного вытеснения в методе IMPES (ограничение/практические знания) . . . . .                          | 86 |
| Одномерная дисперсия (ограничение/практические знания) . . . . .  | 88 |
| Максимальная точность (практические знания) . . . . .   | 88 |
| Адаптивный неявный метод (практические знания) . . . . .  | 88 |
| Общая блок-схема процесса моделирования (формулировка) . . . . .  | 89 |
| Управление временным шагом (практические знания) . . . . .  | 91 |
| Оптимизация дискретизации по времени (практические знания) . . . . .  | 91 |
| Аналитические уравнения притока (формулировка) . . . . .  | 92 |
| Уравнение Писмана (формулировка/ограничение) . . . . .  | 93 |
| Сравнение явных и неявных скважин (формулировка/практические знания) . . . . .  | 95 |
| Восстановление давления (ограничение) . . . . .   | 95 |
| Анизотропия . . . . .   | 95 |
| Ограничения, связанные со скин-фактором (ограничение/практические знания) . . . . .                                     | 96 |
| Несовершенство вскрытия пласта перфорацией (ограничение/практические знания) . . . . .                                  | 96 |
| Многофазный поток в скважинах (ограничение) . . . . .   | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Отображение в гидродинамической модели скважин, добывающих много-<br>фазную смесь флюидов (практические знания) . . . . . | 97  |
| Детальные исследования скважин (практические знания) . . . . .  | 97  |
| Альтернативные способы уменьшения количества ячеек модели (практи-<br>ческие знания) . . . . .                            | 98  |
| Управление скважинами (формулировка/практические знания) . . . . .  | 101 |
| Матричные решатели: численные (формулировка) . . . . .  | 101 |
| Прямое исключение (формулировка) . . . . .  | 102 |
| Итерационные решатели (формулировка) . . . . .  | 104 |
| Ускорение (формулировка) . . . . .  | 105 |
| Управление решателями со стороны пользователя (практические знания) .   | 106 |
| Выбор главного элемента матрицы (формулировка и практические знания)  | 107 |
| Объяснение демпфирования . . . . .  | 108 |
| Заключение . . . . .  | 108 |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .   | 109 |
| <b>ГЛАВА 3. Геология, петрофизика и слоистость</b> . . . . .  | 111 |
| <b>Введение</b> . . . . .   | 111 |
| Однородность . . . . .  | 111 |
| Происхождение нефти и газа . . . . .  | 112 |
| Нефть и газ нижних меловых отложений Западной Канады . . . . .  | 112 |
| <b>Геологические модели</b> . . . . .   | 115 |
| Береговой бар Хоудли . . . . .  | 116 |
| Определение параметров коллектора . . . . .   | 122 |
| Средства отображения . . . . .  | 123 |
| Структурная геология . . . . .  | 128 |
| Западно-Канадский осадочный бассейн . . . . .   | 130 |
| Знакомство с залежью . . . . .  | 135 |
| <b>Точки зрения геолога и разработчика</b> . . . . .  | 137 |
| Геофизика (интерпретация данных сейсморазведки) . . . . .   | 138 |
| Петрофизика (интерпретация данных ГИС) . . . . .  | 139 |
| Обработка каротажных данных . . . . .   | 139 |
| Необходимые данные . . . . .  | 140 |
| Специальный анализ керна . . . . .  | 140 |
| Затрудненный анализ . . . . .   | 141 |
| Качественные показатели . . . . .   | 142 |
| Расчет проницаемости . . . . .  | 144 |
| Газонефтяной и газовой контакту . . . . .   | 144 |
| Геологическое строение небольших залежей: слоистость . . . . .  | 145 |
| Определение слоистости . . . . .  | 146 |
| Коллектора, которые не поддаются описанию . . . . .   | 150 |
| Вертикальная проницаемость . . . . .  | 151 |
| Разломы . . . . .   | 151 |
| Механизмы формирования ловушки . . . . .  | 152 |
| Тектонически экранированные ловушки . . . . .   | 153 |
| Глины . . . . .   | 169 |
| Глинистые линзы . . . . .   | 171 |

|   |            |
|---|------------|
| Заключение . . . . .  | 171        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>   | <b>174</b> |
| <b>ГЛАВА 4. Комплексный подход и геостатистика . . . . .</b>                          | <b>177</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>   | <b>177</b> |
| <b>История геостатистики . . . . .</b>  | <b>178</b> |
| Большие пакеты программ . . . . .   | 178        |
| Комплексный командный подход . . . . .  | 179        |
| Геостатистические расчеты . . . . .   | 179        |
| Пласт и его моделирование . . . . .   | 180        |
| Поэтапный метод . . . . .   | 181        |
| Основной подход: объекты или распределение . . . . .                                  | 181        |
| Сравнение методов усреднения и моделирования . . . . .                                | 182        |
| Статистика . . . . .  | 182        |
| Произвольные допущения . . . . .  | 182        |
| Независимость переменных . . . . .  | 183        |
| Пространственные отношения . . . . .  | 184        |
| Основная идея кригинга . . . . .  | 187        |
| Фундаментальная концепция моделирования . . . . .                                     | 188        |
| Настройка модели . . . . .  | 189        |
| Последовательность выполнения работы . . . . .  | 190        |
| Практический пример: пласт МакМюррей на северо-востоке Альберты . . . . .             | 191        |
| Ограничения и недостатки геостатистики . . . . .                                      | 193        |
| Заключение . . . . .  | 194        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>   | <b>195</b> |
| <b>ГЛАВА 5. Анализ показателей эксплуатации пласта . . . . .</b>                      | <b>196</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>   | <b>196</b> |
| Концептуальная модель . . . . .   | 196        |
| Примеры ошибок в интерпретации . . . . .  | 197        |
| Режимы вытеснения . . . . .   | 197        |
| Анализ показателей эксплуатации . . . . .   | 198        |
| Графики добычи . . . . .  | 198        |
| Графики давления . . . . .  | 205        |
| Эксплуатационные осложнения . . . . .   | 229        |
| Проведение испытаний . . . . .  | 230        |
| Сложности с интерпретацией . . . . .  | 230        |
| Организация испытания скважин . . . . .   | 231        |
| Перспективы гидродинамических исследований скважин . . . . .                          | 231        |
| Повторная обработка результатов ГДИС . . . . .  | 232        |
| Распознавание шаблонов: расклейка на стене . . . . .                                  | 232        |
| Обработка восстановления давления на симуляторе . . . . .                             | 233        |
| Программы для обработки восстановления давления . . . . .                             | 233        |
| Представление данных о давлении при настройке моделей на историю разработки . . . . . | 234        |
| Заключение . . . . .  | 235        |



|   |            |
|---|------------|
| <b>ГЛАВА 6. PVT-свойства пластовых флюидов: отбор данных</b> . . . . .    | <b>236</b> |
| <b>Введение</b> . . . . .   | <b>236</b> |
| Однократное разгазирование . . . . .                                      | 237        |
| Дифференциальное разгазирование . . . . .                                 | 238        |
| Фактический процесс разгазирования в пласте . . . . .                     | 238        |
| Разгазирование флюида по многоступенчатой схеме сепарации . . . . .       | 239        |
| Характерные корректировки PVT-данных . . . . .                            | 240        |
| Поправки PVT-данных на условия сепарации . . . . .                        | 240        |
| Отрицательные значения газосодержания . . . . .                           | 241        |
| Недавняя публикация . . . . .   | 242        |
| Нагреватели . . . . .   | 243        |
| Опыт вычислений методом материального баланса . . . . .                   | 243        |
| Эмпирическое наблюдение . . . . .   | 244        |
| Настройка уравнений состояния (УС) . . . . .                              | 246        |
| Комплексное разгазирование . . . . .                                      | 246        |
| Встроенное в симулятор комплексное разгазирование . . . . .               | 247        |
| Обоснованность применения скорректированных данных . . . . .              | 248        |
| Корреляционные зависимости для определения свойств нефти . . . . .        | 250        |
| Точность корреляционных зависимостей . . . . .                            | 251        |
| Пределы применимости моделей нелетучих нефтей . . . . .                   | 251        |
| Форма PVT-кривых . . . . .  | 255        |
| PVT-свойства газов . . . . .  | 255        |
| Газоконденсатные системы . . . . .  | 256        |
| «Красные» флюиды . . . . .  | 258        |
| Представительные пробы . . . . .  | 259        |
| Глубинные пробы . . . . .   | 260        |
| Способы отбора проб . . . . .   | 261        |
| Отбор проб в условиях послепритока . . . . .                              | 263        |
| Проверка глубинных проб в лабораторных условиях . . . . .                 | 264        |
| Проверка в лабораторных условиях проб, отобранных на сепараторе . . . . . | 264        |
| Состав . . . . .  | 264        |
| Равновесие . . . . .  | 265        |
| Некоторые лабораторные осложнения . . . . .                               | 265        |
| Лабораторное оборудование . . . . .                                       | 268        |
| Воспроизведение пластовых условий . . . . .                               | 268        |
| Материальный баланс . . . . .   | 269        |
| Использование лабораторных газов . . . . .                                | 275        |
| Программа лабораторных испытаний . . . . .                                | 276        |
| Кто-то и Некто . . . . .  | 276        |
| Изменения состава . . . . .   | 277        |
| Влияние силы тяжести на равновесные состояния . . . . .                   | 278        |
| Причины резкого изменения состава . . . . .                               | 279        |
| Системы с большими градиентами состава . . . . .                          | 280        |
| Влияние искривленной поверхности раздела . . . . .                        | 280        |
| Системы с тепловой диффузией . . . . .                                    | 281        |
| Изменение давления насыщения нефти с глубиной . . . . .                   | 282        |
| Таблица отбора данных . . . . .   | 284        |

|   |            |
|---|------------|
| Графики для проверки качества проб нефти . . . . .  | 285        |
| Графики для проверки свойств газа . . . . .   | 286        |
| Отбор данных по газоконденсатным пробам . . . . .   | 288        |
| Сопоставление данных . . . . .  | 289        |
| Непротиворечивость данных . . . . .   | 290        |
| Преимущество экспериментов с использованием разгазирования при постоянном составе . . . . . | 291        |
| Как отличить летучие нефти от газоконденсатных систем? . . . . .                            | 293        |
| Какие данные правильные? . . . . .  | 295        |
| Ввод PVT-данных по нефти . . . . .  | 295        |
| Требования к непротиворечивости исходных данных . . . . .                                   | 297        |
| Ввод переменного давления насыщения . . . . .   | 298        |
| Ввод PVT-свойств газов . . . . .  | 298        |
| Расширение таблиц PVT для прогнозирования закачки воды . . . . .                            | 298        |
| Точки изгиба промысловых данных . . . . .   | 299        |
| Плотность нефти . . . . .   | 299        |
| Вязкость нефти . . . . .  | 299        |
| Вязкость газа . . . . .   | 300        |
| Объемный коэффициент пластовой воды . . . . .   | 301        |
| Вязкость воды . . . . .   | 303        |
| Сжимаемость воды . . . . .  | 304        |
| Заключение . . . . .  | 305        |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .   | <b>307</b> |

## ГЛАВА 7. Капиллярное давление и относительная проницаемость: отбор

|  |            |
|--|------------|
| <b>данных</b> . . . . .  | <b>309</b> |
| <b>Введение</b> . . . . .  | <b>309</b> |
| Результаты специализированных лабораторий . . . . .  | 310        |
| Капиллярное давление . . . . .   | 311        |
| Поверхностное натяжение . . . . .  | 311        |
| Подъем жидкости в капиллярных трубках . . . . .  | 312        |
| Горизонтальное смещение: пайка . . . . .   | 312        |
| Процессы дренирования и пропитки . . . . .   | 313        |
| Породы-коллекторы . . . . .  | 313        |
| Поправки . . . . .   | 314        |
| Предупреждение относительно поправок к капиллярному давлению . . . . .   | 314        |
| Поверхностное натяжение «нефть-вода» . . . . .   | 315        |
| Поверхностное натяжение газ-нефть . . . . .  | 318        |
| Измерение капиллярного давления . . . . .  | 318        |
| Капиллярные силы и насыщение связанной водой . . . . .   | 322        |
| Промысловые наблюдения . . . . .   | 323        |
| Гидрогеология . . . . .  | 324        |
| Фильтрация в глинах . . . . .  | 325        |
| Непрерывность водонасыщенности в поровом масштабе . . . . .  | 326        |
| Устранение расхождения между данными капиллярного давления и данными, замеренными в промысловых условиях . . . . . | 327        |
| Погрешности в определении капиллярного давления . . . . .  | 327        |

|  |     |
|--|-----|
| Практические замечания . . . . .   | 329 |
| История насыщения . . . . .  | 329 |
| Противоточное дренирование . . . . .   | 329 |
| Переходные зоны по каротажным данным . . . . .   | 331 |
| Точка нулевого капиллярного давления . . . . .   | 333 |
| Советы по применимости лабораторных данных . . . . .   | 333 |
| Имеющиеся данные . . . . .   | 334 |
| Специальный анализ керна . . . . .   | 334 |
| Сведение данных по капиллярному давлению в таблицу . . . . .   | 335 |
| <i>J</i> -функция Леверетта . . . . .  | 338 |
| Влияние проницаемости . . . . .  | 338 |
| Относительная проницаемость . . . . .  | 338 |
| Подготовка образцов . . . . .  | 339 |
| Измерение относительной проницаемости . . . . .  | 340 |
| Влияние на насыщенность связанной водой . . . . .  | 342 |
| Определение относительной проницаемости . . . . .  | 342 |
| Построение кривой относительной проницаемости . . . . .  | 344 |
| Остаточная нефтенасыщенность . . . . .   | 344 |
| Насыщенность подвижной нефтью . . . . .  | 346 |
| Варианты представления относительных фазовых проницаемостей . . . . .  | 346 |
| Гидрофильные и гидрофобные породы . . . . .  | 347 |
| Принятая терминология . . . . .  | 348 |
| Гистерезис . . . . .   | 348 |
| Подземные газохранилища . . . . .  | 348 |
| Кривые разветвования: учет гистерезиса . . . . .   | 349 |
| Анализ данных относительной проницаемости для двухфазной фильтрации . . . . .                                    | 350 |
| Данные о насыщенности связанной водой . . . . .  | 350 |
| Определение представительных образцов . . . . .  | 354 |
| Построение графиков по лабораторным данным . . . . .   | 355 |
| Нормирование кривых относительной проницаемости . . . . .  | 357 |
| Каким графиком воспользоваться? . . . . .  | 357 |
| Влияние на относительную проницаемость . . . . .   | 358 |
| Испытания по заводнению или вытеснению . . . . .   | 359 |
| Гидродинамическое моделирование для интерпретации испытаний по определению относительной проницаемости . . . . . | 359 |
| Капиллярные концевые эффекты . . . . .   | 360 |
| Составные образцы керна . . . . .  | 361 |
| Нефтепродукты (переработанная нефть, керосин) или пластовая нефть . . . . .                                      | 361 |
| Смачиваемость . . . . .  | 361 |
| Дегидратация глинистых минералов . . . . .   | 363 |
| Разумная конфиденциальность . . . . .  | 364 |
| Контроль качества . . . . .  | 364 |
| Корреляционные зависимости . . . . .   | 365 |
| Относительная проницаемость для системы «нефть–вода» . . . . .   | 365 |
| Относительная проницаемость для системы «газ–нефть» . . . . .  | 369 |
| Подбор кривой . . . . .  | 370 |
| Данные по относительной проницаемости для трехфазной системы . . . . .   | 373 |



|   |     |
|---|-----|
| Трехфазный поток . . . . .  | 374 |
| Корреляционные зависимости относительных проницаемостей для трех-<br>фазной системы . . . . .             | 375 |
| Вторая модель Стоуна . . . . .  | 376 |
| Непротиворечивость входных данных . . . . .   | 377 |
| Продление кривой $k_{rw}$ между $(1 - S_{or})$ и $100\% S_w$ . . . . .                                    | 380 |
| Пожалуйста, никаких изломов . . . . .   | 380 |
| Степенные кривые . . . . .  | 380 |
| Сжимаемость порового объема . . . . .   | 381 |
| Кривые относительной проницаемости для газоконденсата и высоковязкой<br>нефти . . . . .                   | 384 |
| Методика . . . . .  | 384 |
| Заключение . . . . .  | 384 |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .   | 385 |
| <br>  |     |
| <b>ГЛАВА 8. Модифицированная относительная фазовая проницаемость<br/>и апскейлинг</b> . . . . .           | 388 |
| <b>Введение</b> . . . . .   | 388 |
| Вертикальное равновесие . . . . .   | 388 |
| Относительная фазовая проницаемость по Херну . . . . .  | 391 |
| Динамическая модифицированная относительная фазовая проницаемость . . . . .                               | 393 |
| Смит, Маттекс и Джекс . . . . .   | 396 |
| Кайт и Берри . . . . .  | 398 |
| Криволинейные сетки (по линиям тока) . . . . .  | 400 |
| Модифицированная относительная фазовая проницаемость для скважины . . . . .                               | 401 |
| Аналитический расчет . . . . .  | 403 |
| Опасности применения модифицированной относительной фазовой про-<br>ницаемости . . . . .                  | 404 |
| Опасности при использовании модифицированной относительной фазовой<br>проницаемости для скважин . . . . . | 405 |
| Заключение . . . . .  | 406 |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .   | 407 |
| <br>  |     |
| <b>ГЛАВА 9. Инициализация</b> . . . . .   | 408 |
| <b>Введение</b> . . . . .   | 408 |
| Задание капиллярного давления . . . . .   | 408 |
| Псевдокапиллярное давление . . . . .  | 409 |
| Переходная зона с толщиной, сравнимой с размером ячейки . . . . .   | 409 |
| Разукрупнение ячеек сетки . . . . .   | 411 |
| Данные капиллярного давления . . . . .  | 411 |
| Наклонные водонефтяные контакты . . . . .   | 412 |
| Гидрогеология . . . . .   | 412 |
| Неравновесная инициализация . . . . .   | 414 |
| Учет динамического улавливания при разработке нефтегазовых залежей . . . . .                              | 414 |
| Ошибки моделирования . . . . .  | 417 |
| Моделирование состояний динамического равновесия . . . . .  | 417 |

|   |     |
|---|-----|
| Закачка воды . . . . .  | 418 |
| Гидрогеология . . . . .   | 422 |
| Гидродинамические расчеты без учета работы скважин . . . . .    | 423 |
| Заключение . . . . .  | 423 |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .                           | 423 |
| <b>ГЛАВА 10. Интеграция данных и построение сетки</b> . . . . . | 424 |
| <b>Введение</b> . . . . .                                       | 424 |
| Интеграция . . . . .  | 424 |
| <b>Данные</b> . . . . .   | 425 |
| Недостающие данные . . . . .                                    | 425 |
| Сравнение научных результатов с практическими . . . . .         | 425 |
| <b>Вспомогательные исследования</b> . . . . .                   | 426 |
| Расчеты методом материального баланса . . . . .                 | 426 |
| <b>Цели</b> . . . . .   | 426 |
| Важность поставленных целей . . . . .                           | 426 |
| Распространенные ситуации . . . . .                             | 427 |
| Критически важные вопросы . . . . .                             | 428 |
| Моделирование многофазных течений . . . . .                     | 428 |
| <b>Построение сетки</b> . . . . .                               | 429 |
| Реалистичные сетки . . . . .                                    | 429 |
| Методические рекомендации общего характера . . . . .            | 430 |
| Визуализация фильтрации пластовых флюидов . . . . .             | 430 |
| Сетки неправильной формы . . . . .                              | 430 |
| Чувствительность к параметрам сетки . . . . .                   | 431 |
| Сетки с недостаточным количеством ячеек . . . . .               | 432 |
| Два основных способа построения сетки . . . . .                 | 434 |
| Переходная зона (капиллярного давления) . . . . .               | 435 |
| Влияние ориентации сетки . . . . .                              | 435 |
| Проверка на соответствие действительности . . . . .             | 436 |
| Недостатки и ограничения симулятора . . . . .                   | 438 |
| Заключение . . . . .  | 438 |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .                           | 439 |
| <b>ГЛАВА 11. Создание массива исходных данных</b> . . . . .     | 441 |
| <b>Введение</b> . . . . .                                       | 441 |
| Обработка данных . . . . .                                      | 441 |
| Создание файла исходных данных . . . . .                        | 442 |
| Описки и опечатки . . . . .                                     | 443 |
| Сохранение резервных копий и массивов данных . . . . .          | 443 |
| Логические принципы считывания массивов данных . . . . .        | 443 |
| Определение размеров . . . . .                                  | 444 |
| Ввод данных для гидродинамического моделирования . . . . .      | 445 |
| Овладение компьютером . . . . .                                 | 445 |
| ПК изнутри . . . . .  | 446 |
| Системы Unix . . . . .  | 446 |

|  |            |
|--|------------|
| Работа с массивами данных для гидродинамического моделирования . . . . . | 447        |
| Утилиты (служебные программы) . . . . .                                  | 448        |
| Системное пространство . . . . .   | 448        |
| Условия разработки . . . . .   | 450        |
| Проявите инициативу . . . . .  | 450        |
| Параметры расчета . . . . .  | 450        |
| Основной продукт . . . . .   | 450        |
| Ввод данных по всем скважинам . . . . .                                  | 451        |
| Расположение скважин по порядку . . . . .                                | 451        |
| Электронные таблицы . . . . .  | 451        |
| Усреднение объемов добычи . . . . .                                      | 453        |
| Заканчивание скважин . . . . .   | 453        |
| Забойное давление . . . . .  | 454        |
| Рабочие характеристики колонны НКТ . . . . .                             | 454        |
| Модели наземных сооружений . . . . .                                     | 454        |
| Периодическая добыча . . . . .   | 456        |
| Включаемые файлы . . . . .   | 458        |
| Проверка на наличие ошибок и форматирование . . . . .                    | 458        |
| Характеристики скважин . . . . .   | 458        |
| Спецификация выходных данных . . . . .                                   | 458        |
| Вывод результатов адаптации модели . . . . .                             | 459        |
| Приведенное давление . . . . .   | 461        |
| Элементы числового управления . . . . .                                  | 461        |
| Заключение . . . . .   | 462        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>                                    | <b>462</b> |
| <b>ГЛАВА 12. Адаптация модели . . . . .</b>                              | <b>464</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>  | <b>464</b> |
| Описание пластов . . . . .   | 464        |
| Противоречивые советы . . . . .  | 465        |
| Кричлоу . . . . .  | 465        |
| Мэттакс и Далтон . . . . .   | 466        |
| Взгляды автора . . . . .   | 467        |
| Концептуальные модели . . . . .  | 469        |
| От скважины в пласт: обратная сторона адаптации модели . . . . .         | 469        |
| Применение компьютерной графики . . . . .                                | 470        |
| Цветные карандаши . . . . .  | 470        |
| Метод проб и ошибок (последовательных приближений) . . . . .             | 471        |
| Идите на крайности . . . . .   | 471        |
| Упорядоченная методика . . . . .   | 471        |
| Ускорение гидродинамических расчетов на модели . . . . .                 | 471        |
| Подробные комментарии . . . . .  | 472        |
| Проницаемость . . . . .  | 473        |
| Направленная проницаемость . . . . .                                     | 474        |
| Пористость . . . . .   | 475        |
| Мощность пласта . . . . .  | 475        |
| Коэффициенты насыщенности . . . . .                                      | 475        |



|  |            |
|--|------------|
| Капиллярное давление . . . . .   | 476        |
| PVT данные . . . . .   | 477        |
| Сжимаемость . . . . .  | 478        |
| Вязкость . . . . .   | 479        |
| Кривые относительной проницаемости . . . . .                               | 479        |
| Данные о заканчивании отдельных скважин . . . . .                          | 480        |
| Геостатистическое моделирование . . . . .                                  | 481        |
| Выходные данные адаптации модели . . . . .                                 | 481        |
| Неполадки и сбои в программе . . . . .                                     | 482        |
| Навыки устранения проблем . . . . .  | 482        |
| Трудноустраняемые ошибки . . . . .   | 483        |
| Последнее слово о неполадках . . . . .                                     | 484        |
| Заключение . . . . .   | 485        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>                                      | <b>486</b> |
| <b>ГЛАВА 13. Прогнозы . . . . .</b>  | <b>487</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>  | <b>487</b> |
| Вариант 1, вариант 2, вариант 3 и т. д. . . . .                            | 487        |
| Настройка . . . . .  | 487        |
| Забойное давление . . . . .  | 488        |
| Оптимизация добычи . . . . .   | 488        |
| Стратегия настройки . . . . .  | 489        |
| Темпы падения . . . . .  | 489        |
| Регистрация изменений в настройке . . . . .                                | 489        |
| Систематическая ошибка . . . . .   | 491        |
| Прогнозные дебиты скважин . . . . .  | 491        |
| Базовый вариант . . . . .  | 493        |
| Оценка возможности уплотнения сетки скважин . . . . .                      | 493        |
| Вариант с максимальной плотностью . . . . .                                | 493        |
| Результаты варианта с максимальной плотностью . . . . .                    | 494        |
| Критерии отбора . . . . .  | 494        |
| Презентация для руководства . . . . .                                      | 494        |
| Осуществление заводнения . . . . .   | 495        |
| Проверка других возможных схем . . . . .                                   | 496        |
| Давление закачки . . . . .   | 497        |
| Система граничных условий режимов работы скважин . . . . .                 | 497        |
| Ограничение коэффициента компенсации отбора . . . . .                      | 497        |
| Ограничения . . . . .  | 498        |
| Контроль рециркуляции . . . . .  | 498        |
| Иерархическая структура . . . . .  | 498        |
| Относительная проницаемость для нагнетательных скважин . . . . .           | 501        |
| Математическая реализация . . . . .  | 502        |
| Сложности, вызванные граничными условиями режимов работы скважин . . . . . | 502        |
| Высотные отметки . . . . .   | 502        |
| Заключение . . . . .   | 503        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>                                      | <b>504</b> |

|  |     |
|--|-----|
| <b>ГЛАВА 14. Организация работ</b> . . . . .   | 505 |
| <b>Введение</b> . . . . .  | 505 |
| <b>Отчеты</b> . . . . .  | 506 |
| Обмен информацией . . . . .  | 506 |
| Качество . . . . .   | 507 |
| Отчет по оценке качества моделирования . . . . .                                       | 507 |
| Подход . . . . .   | 508 |
| Повышение квалификации . . . . .   | 509 |
| Процесс написания . . . . .  | 509 |
| Содержание . . . . .   | 510 |
| Графические выходные данные . . . . .  | 511 |
| Большой объем выходных данных . . . . .  | 511 |
| Какие разделы выходных данных заслуживают доверия? . . . . .                           | 511 |
| Заключение . . . . .   | 512 |
| <b>Подбор программы и оборудования для гидродинамического моделирования</b> . . . . .  | 513 |
| Компании, выпускающие компьютерные программы . . . . .                                 | 513 |
| Научно-исследовательские организации . . . . .   | 515 |
| Интегрированные консультационные компании . . . . .                                    | 516 |
| Собственное программное обеспечение . . . . .  | 517 |
| Где найти другие источники программного обеспечения? . . . . .                         | 518 |
| Локальные источники . . . . .  | 518 |
| Компьютерное оборудование, программное обеспечение и периферийные устройства . . . . . | 518 |
| Выходные данные . . . . .  | 519 |
| Сравнение персональных компьютеров и рабочих станций . . . . .                         | 519 |
| Программирование в формате с плавающей запятой и в целочисленном формате . . . . .     | 520 |
| Сравнение архитектур RISC и CISC . . . . .   | 520 |
| Мультипроцессоры . . . . .   | 521 |
| Экономическая эффективность . . . . .  | 521 |
| Техническое обслуживание . . . . .   | 523 |
| Изменение производительности . . . . .   | 524 |
| Зависимость от вычислительных платформ . . . . .                                       | 524 |
| Трудноразрешимые проблемы . . . . .  | 524 |
| Особенности . . . . .  | 525 |
| Графика . . . . .  | 526 |
| Геостатистика . . . . .  | 526 |
| Испытание . . . . .  | 527 |
| Организационные вопросы . . . . .  | 527 |
| Заключение . . . . .   | 528 |
| <b>Управление процессом</b> . . . . .  | 528 |
| Выбор консультанта . . . . .   | 529 |
| Подготовка тендерных предложений . . . . .   | 529 |
| Вы можете не выиграть, оставаясь в рамках бюджета . . . . .                            | 530 |
| Недостаток информации . . . . .  | 530 |

|  |            |
|--|------------|
| Тендерные предложения от совместных предприятий . . . . .  | 531        |
| Контракты . . . . .  | 531        |
| Стоимость контракта . . . . .  | 533        |
| Реалистичная стоимость . . . . .   | 533        |
| Реалистичные ожидаемые результаты . . . . .  | 534        |
| Упор на общие и административные расходы . . . . .   | 534        |
| Ошибки . . . . .   | 534        |
| Консультационные услуги — это отношения . . . . .  | 535        |
| Встречи с заказчиком . . . . .   | 536        |
| Заключение . . . . .   | 536        |
| <b>Проблемные области гидродинамического моделирования . . . . .</b>                                   | <b>536</b> |
| Закачка газа . . . . .   | 537        |
| Гравитационное разделение фаз . . . . .  | 537        |
| Неоднородность и слоистость . . . . .  | 538        |
| Решение постоянно возникающих проблем . . . . .  | 538        |
| Междуштатная нефтяная координирующая комиссия (Interstate Oil Compact Commission (IOCC)) . . . . .     | 539        |
| Управление по энергетике и коммунальному хозяйству (Alberta Energy and Utility Board (AEUB)) . . . . . | 539        |
| Другие источники практического опыта . . . . .   | 541        |
| Заключение . . . . .   | 542        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>  | <b>542</b> |

## **Часть II. Избранное для специалистов**

### **ГЛАВА 15. Композиционное моделирование: газоконденсатные залежи**

|   |            |
|---|------------|
| <b>и залежи летучей нефти . . . . .</b>                       | <b>545</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>                                     | <b>545</b> |
| Цели . . . . .  | 545        |
| Кубические уравнения состояния (УС) . . . . .                 | 546        |
| Многокомпонентные системы . . . . .                           | 548        |
| Другие уравнения состояния . . . . .                          | 548        |
| Пакет для расчета уравнений состояния . . . . .               | 549        |
| Точность уравнения состояния . . . . .                        | 549        |
| Применимость для двухкомпонентных смесей . . . . .            | 550        |
| Настройка уравнений состояния . . . . .                       | 550        |
| Экстраполяционная настройка по ограниченным данным . . . . .  | 552        |
| Влияние непредельных и ароматических углеводородов . . . . .  | 555        |
| Термическое восстановление сульфатов . . . . .                | 556        |
| Ограничения газохроматографии . . . . .                       | 558        |
| Влияние содержания ароматических соединений . . . . .         | 558        |
| Изменения состава при отборе проб . . . . .                   | 559        |
| Газоконденсатные залежи . . . . .                             | 561        |
| Представление PVT-свойств . . . . .                           | 562        |
| Относительная проницаемость по газоконденсату . . . . .       | 563        |
| Последствия выпадения конденсата в призабойной зоне . . . . . | 563        |
| Взаимодействие фаз . . . . .                                  | 565        |



|  |            |
|--|------------|
| Традиционные методы расчетов для газоконденсатных систем . . . . . | 568        |
| Чувствительность к дебиту газа . . . . .                           | 568        |
| Неоднородность пласта . . . . .                                    | 571        |
| Общие рекомендации по отбору проб . . . . .                        | 571        |
| Современные методы исследования газоконденсата . . . . .           | 572        |
| Влияние пониженного межфазного натяжения (МФН) . . . . .           | 573        |
| Чувствительность к относительной фазовой проницаемости . . . . .   | 573        |
| Влияние турбулентности потока . . . . .                            | 575        |
| Аналитическое решение . . . . .                                    | 575        |
| Вязкость конденсата . . . . .                                      | 577        |
| Анализ неустановившихся режимов притока . . . . .                  | 577        |
| Нефтяные и газовые залежи в околокритическом состоянии . . . . .   | 579        |
| Недостаток исторических данных . . . . .                           | 580        |
| Технологическое оборудование . . . . .                             | 581        |
| Случай из практики: залежь летучей нефти . . . . .                 | 581        |
| Образование конуса воды . . . . .                                  | 582        |
| Карта залежи . . . . .   | 582        |
| Режимы разработки . . . . .  | 583        |
| Чувствительность к объемам добычи . . . . .                        | 587        |
| Анализ . . . . .   | 587        |
| Результаты прогнозных расчетов . . . . .                           | 590        |
| Заключение . . . . .   | 590        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>                              | <b>594</b> |

## ГЛАВА 16. Скважины с трещинами гидроразрыва и горизонтальные

|   |            |
|---|------------|
| <b>скважины . . . . .</b>   | <b>596</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>   | <b>596</b> |
| Необходимость прямого моделирования трещин ГРП . . . . .  | 596        |
| Горизонтальные скважины . . . . .   | 597        |
| Предполагаемые режимы притока к горизонтальным скважинам и к скважинам с трещинами гидроразрыва . . . . . | 597        |
| <b>Скважины с трещиной гидроразрыва . . . . .</b>   | <b>597</b> |
| Варианты моделирования трещин гидроразрыва . . . . .  | 597        |
| Сложности, возникающие при моделировании трещин гидроразрыва . . . . .                                    | 599        |
| Локальное измельчение сетки . . . . .   | 599        |
| Закачка при давлении выше давления гидроразрыва . . . . .   | 599        |
| Свойства трещин . . . . .   | 600        |
| Дизайн гидроразрыва пласта . . . . .  | 600        |
| Отчеты о проведении гидроразрыва . . . . .  | 601        |
| Фактические размеры трещин . . . . .  | 601        |
| Построение сетки . . . . .  | 602        |
| Значения относительной проницаемости . . . . .  | 602        |
| Модификации решателей . . . . .   | 602        |
| <b>Горизонтальные скважины . . . . .</b>  | <b>603</b> |
| Сложности, характерные только для моделирования горизонтальных скважин . . . . .                          | 603        |
| Аналитические уравнения горизонтальных скважин . . . . .  | 603        |

|  |            |
|--|------------|
| Конечные перепады давления в скважинах . . . . .                                 | 604        |
| Влияние выработки запасов . . . . .  | 605        |
| Измельчение сетки горизонтальных скважин . . . . .                               | 605        |
| Ориентация . . . . .   | 606        |
| Волнистость тракторий . . . . .  | 606        |
| <b>Практические примеры . . . . .</b>  | <b>606</b> |
| Подход . . . . .   | 606        |
| Пример: месторождение Додсленд . . . . .   | 607        |
| Литология . . . . .  | 608        |
| Анализ керна . . . . .   | 608        |
| Профили добычи . . . . .   | 608        |
| Длительный период разработки в режиме естественного истощения . . . . .          | 609        |
| Проведение гидроразрывов . . . . .   | 610        |
| Построение сетки . . . . .   | 611        |
| Палеонапряжение . . . . .  | 611        |
| Месторождения, разрабатываемые методом заводнения . . . . .                      | 612        |
| Свойства сетки . . . . .   | 612        |
| Многослойные пласты . . . . .  | 612        |
| Кривые относительной проницаемости по Хёрну . . . . .                            | 613        |
| Измельчение сетки . . . . .  | 613        |
| Разработка в естественном режиме истощения . . . . .                             | 614        |
| Влияние плотности сетки скважин . . . . .  | 614        |
| Прогнозы результатов заводнения . . . . .  | 617        |
| Чувствительность к слоистости . . . . .  | 617        |
| Изменение газового фактора . . . . .   | 619        |
| Начало заводнения . . . . .  | 619        |
| Влияние закачки под давлением выше давления гидроразрыва . . . . .               | 619        |
| Точность моделей . . . . .   | 620        |
| Заключение по моделированию . . . . .  | 620        |
| Выводы по результатам изучения участка месторождения Додсленд . . . . .          | 621        |
| Практический пример: Дип Бейсин (Deep Basin) в Альберте (Канада) . . . . .       | 621        |
| Определение PVT-свойств . . . . .  | 622        |
| Построение модели . . . . .  | 626        |
| Моделирование гидродинамических исследований скважин . . . . .                   | 627        |
| Результаты прогнозов . . . . .   | 630        |
| Особенности практического примера по скважине месторождения Дип-Бейсин . . . . . | 631        |
| Практический пример: глауконитовый канал . . . . .                               | 631        |
| Образование конуса воды и газа . . . . .   | 632        |
| Заключение . . . . .   | 632        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>  | <b>633</b> |
| <b>ГЛАВА 17. Передовые технологии . . . . .</b>                                  | <b>634</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>  | <b>634</b> |
| Обзор текущей ситуации . . . . .   | 635        |
| Материал по классическим методам смешивающегося вытеснения . . . . .             | 635        |
| Начальные условия . . . . .  | 636        |

|   |            |
|---|------------|
| Цели . . . . .  | 638        |
| <b>Смешиваемость и минимальное давление смешиваемости . . . . .</b>                                     | <b>643</b> |
| Подбор кандидатов . . . . .   | 643        |
| Аналогичные проблемы при закачке в пласт газа . . . . .   | 643        |
| Расчетные кривые . . . . .  | 644        |
| Уравнение состояния . . . . .   | 644        |
| Диаграммы состояния тройных систем . . . . .  | 644        |
| Сравнение режимов вытеснения с конденсацией и испарением . . . . .                                      | 645        |
| Исследования способности нефти растворять газ при давлении выше начального давления насыщения . . . . . | 648        |
| Азот . . . . .  | 649        |
| Сероводород . . . . .   | 649        |
| <b>Подбор размеров оторочки . . . . .</b>   | <b>649</b> |
| Диффузия . . . . .  | 649        |
| Образование вязких пальцев . . . . .  | 650        |
| Модели нелетучей нефти . . . . .  | 650        |
| Модели псевдосмешивающегося заводнения . . . . .  | 650        |
| Методы Ковалья и Тодда – Лонгстаффа . . . . .   | 651        |
| Определение параметров смешения . . . . .   | 652        |
| Композиционная модель . . . . .   | 653        |
| Комбинированное композиционное моделирование . . . . .  | 653        |
| Трубка тока . . . . .   | 653        |
| Подбор методики . . . . .   | 654        |
| Неоднородности . . . . .  | 654        |
| <b>Коэффициент охвата . . . . .</b>   | <b>654</b> |
| Продвижение фронта . . . . .  | 654        |
| Испытания на тонких трубках . . . . .   | 655        |
| Композиционное моделирование и относительная проницаемость . . . . .                                    | 658        |
| Влияние истории изменения насыщенности . . . . .  | 659        |
| Гравитационное расслоение . . . . .   | 661        |
| Гравитационное разделение фаз . . . . .   | 661        |
| <b>Экономический анализ . . . . .</b>   | <b>662</b> |
| Модели, детализированные с учетом интересов заказчика . . . . .   | 662        |
| Оптимизация растворителей . . . . .   | 662        |
| Государственное стимулирование . . . . .  | 662        |
| Риски . . . . .   | 663        |
| <b>Мониторинг и надзор . . . . .</b>  | <b>663</b> |
| Составы . . . . .   | 663        |
| Закачка . . . . .   | 664        |
| Трассеры . . . . .  | 664        |
| Мониторинг с учетом расстановки скважин . . . . .   | 665        |
| Заключение . . . . .  | 665        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>   | <b>666</b> |
| <b>ГЛАВА 18. Трещиноватые пласты . . . . .</b>  | <b>669</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>   | <b>669</b> |

|   |            |
|---|------------|
| Двойная пористость . . . . .  | 670        |
| Двойная проницаемость . . . . .   | 671        |
| Вложенные сетки . . . . .   | 671        |
| <b>Классическая теория разработки трещиноватых пластов . . . . .</b>                | <b>671</b> |
| Анализ трещиноватых пластов . . . . .   | 672        |
| Механизмы вытеснения в трещиноватых пластах . . . . .                               | 672        |
| Основа теории: модель двойной пористости . . . . .                                  | 673        |
| Функции переноса в анализе ГДИ на неустановившихся режимах . . . . .                | 673        |
| Подтверждение выводов Уоррена и Рута по результатам анализа КВД . . . . .           | 674        |
| Сеть прерывистых трещин (по Стрельцовой) . . . . .                                  | 675        |
| Параметрический анализ расстояния между трещинами . . . . .                         | 675        |
| Параметрический анализ разницы в коэффициентах проницаемости . . . . .              | 677        |
| Обсуждение параметрических исследований . . . . .                                   | 677        |
| Подробный параметрический анализ показателей разработки . . . . .                   | 679        |
| Влияние многофазного перетока . . . . .   | 679        |
| Заводнение трещиноватых нефтяных пластов . . . . .                                  | 681        |
| Фактические результаты . . . . .  | 681        |
| Чувствительность подробной модели к резкому изменению проницаемости . . . . .       | 681        |
| Ряд несоответствий, или почему этого никто не заметил? . . . . .                    | 682        |
| Работа Аронофски и др. . . . .  | 683        |
| Анализ падения добычи . . . . .   | 683        |
| Двойная проницаемость (Фанг и Коллинз) . . . . .                                    | 683        |
| Влияние расположения ствола скважины и большое расстояние между трещинами . . . . . | 684        |
| Скважины, вскрывающие трещины (при большом расстоянии между трещинами) . . . . .    | 685        |
| Сопоставление непрерывного и дискретного моделирования . . . . .                    | 686        |
| Большинство трещиноватых пластов можно описать одинарной пористостью . . . . .      | 688        |
| Пример механизмов вытеснения в многофазном газоконденсатном месторождении . . . . . | 688        |
| Аналитический вывод многофазного перетока . . . . .                                 | 688        |
| Кривые фазовых проницаемостей и модифицированного капиллярного давления . . . . .   | 689        |
| Реалистичные геометрии сетки . . . . .  | 690        |
| Модель Каземи . . . . .   | 690        |
| Дискретные блоки . . . . .  | 691        |
| Моделирование трещин . . . . .  | 693        |
| <b>Решение проблем непротиворечивости моделей . . . . .</b>                         | <b>694</b> |
| Геологическое строение . . . . .  | 696        |
| Типы моделей . . . . .  | 696        |
| Детальная сетка и моделирование трещин . . . . .                                    | 697        |
| Экспериментирование . . . . .   | 697        |
| Основные функции переноса: однофазный флюид . . . . .                               | 698        |
| Капиллярное давление пропитки . . . . .   | 698        |
| Свойства породы для трещин . . . . .  | 699        |
| Функции переноса: многофазный флюид . . . . .                                       | 699        |

|   |            |
|---|------------|
| Сходимость результатов гидродинамических исследований скважин с результатами интерпретации . . . . .                  | 700        |
| <b>Модель автора: трещинно-линзовидный пласт . . . . .</b>  | <b>701</b> |
| Литология . . . . .   | 701        |
| Фотографии керна . . . . .  | 701        |
| Картаж керна . . . . .  | 701        |
| Стандартный анализ керна . . . . .  | 702        |
| Пример стандартного анализа керна из центральной части предгорья Альберты . . . . .                                   | 703        |
| Керн из других районов . . . . .  | 704        |
| Вабамун (Д-1) . . . . .   | 706        |
| Сканирование стенок скважин . . . . .   | 707        |
| Влияние структурного фактора . . . . .  | 707        |
| Влияние картины распространения трещин . . . . .  | 708        |
| Описание классических систем трещиноватости . . . . .   | 710        |
| Физическое разрушение породы . . . . .  | 710        |
| Чувствительность проводимости трещин к напряжению . . . . .   | 712        |
| Выводы для моделирования . . . . .  | 715        |
| Тектоническая обстановка . . . . .  | 715        |
| Промысловые геофизические исследования . . . . .  | 717        |
| Трещинно-линзовидная модель . . . . .   | 718        |
| Метод Монте-Карло . . . . .   | 718        |
| Построение сетки . . . . .  | 719        |
| Модель пласта линзовидного строения с выпадением конденсата . . . . .   | 720        |
| Ограничения представленной интерпретации гидродинамических исследований скважин на неустановившихся режимах . . . . . | 720        |
| Профили добычи . . . . .  | 721        |
| Газовые факторы . . . . .   | 721        |
| Относительная проницаемость «островка» . . . . .  | 722        |
| Кривые восстановления давления при наличии конденсата . . . . .   | 723        |
| Выводы по результатам использования трещинно-линзовидной модели пласта . . . . .                                      | 723        |
| Доломитизация . . . . .   | 724        |
| Характерные кривые гидродинамических исследований скважин . . . . .   | 725        |
| Разработка линзовидных залежей . . . . .  | 725        |
| Однородный пласт . . . . .  | 726        |
| Модель пласта линзовидного строения . . . . .   | 726        |
| Концентрические системы . . . . .   | 727        |
| Описание пласта . . . . .   | 727        |
| Выводы . . . . .  | 729        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>   | <b>731</b> |
| <b>ГЛАВА 19. Моделирование теплового воздействия на пласт . . . . .</b>   | <b>735</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>   | <b>735</b> |
| Уровень развития технологии . . . . .   | 737        |
| <b>Краткое описание основных процессов . . . . .</b>  | <b>737</b> |
| Разработка на режиме истощения . . . . .  | 737        |

|   |     |
|---|-----|
| Площадная закачка пара (SF), циклическая (CSS) и метод парогравитационного дренажа (SAGD) . . . . .                                       | 738 |
| Подземная испытательная установка (ПИУ) . . . . .   | 740 |
| Открытая информация . . . . .   | 741 |
| <b>Отличительные особенности моделирования теплового воздействия</b>  |     |
| <b>на пласты</b> . . . . .  | 741 |
| Постановка задачи . . . . .   | 741 |
| Другие источники . . . . .  | 742 |
| Свойства пара . . . . .   | 742 |
| Потери тепла . . . . .  | 742 |
| Теплопроводность . . . . .  | 743 |
| Теплоемкость . . . . .  | 745 |
| Энтальпия . . . . .   | 745 |
| Скрытая теплота парообразования . . . . .   | 745 |
| Растворенный газ . . . . .  | 746 |
| Равновесное соотношение фаз . . . . .   | 746 |
| Зависимость вязкости от температуры . . . . .   | 747 |
| Вязкость при повышенной температуре . . . . .   | 747 |
| Вязкость, полученная по промышленным данным . . . . .   | 748 |
| Измерения вязкости образцов . . . . .   | 749 |
| Окисление . . . . .   | 749 |
| Нагревание на начальном этапе SAGD . . . . .  | 750 |
| Ограничение режимов работы скважин при применении технологии SAGD<br>путем поддержания температуры ниже температуры конденсации . . . . . | 751 |
| Проницаемость . . . . .   | 751 |
| Лабораторный анализ песчаников, насыщенных тяжелой нефтью . . . . .   | 757 |
| Определение коэффициентов насыщенности по данным ГИС и увязка<br>с керном . . . . .   | 759 |
| Проницаемость по воздуху . . . . .  | 762 |
| Фазовая проницаемость по жидкости . . . . .   | 763 |
| Влияние геомеханических факторов . . . . .  | 765 |
| Литература по геомеханике . . . . .   | 765 |
| Геомеханические характеристики пласта . . . . .   | 770 |
| Эксперимент с пачкой кофе (всестороннее сжатие горным давлением) . . . . .  | 770 |
| Эффективное напряжение горных пород . . . . .   | 770 |
| Механика грунтов . . . . .  | 771 |
| Сцепление зерен песчаника . . . . .   | 771 |
| Испытание материалов . . . . .  | 772 |
| Дренажные и недренажные испытания . . . . .   | 772 |
| Типичное поведение образцов при испытаниях . . . . .  | 773 |
| Расширение . . . . .  | 774 |
| Диаграмма предельного состояния . . . . .   | 774 |
| Иная форма представления диаграммы предельного состояния . . . . .  | 774 |
| Построение траектории напряжений . . . . .  | 775 |
| Определяющие уравнения для песчаников . . . . .   | 776 |
| Относительная фазовая проницаемость . . . . .   | 777 |
| Необходимость точных данных по относительной проницаемости . . . . .  | 779 |



|  |            |
|--|------------|
| Относительная проницаемость для трехфазного потока . . . . .   | 780        |
| Моделирование в лабораторных условиях . . . . .  | 781        |
| Важность данных по относительной проницаемости . . . . .   | 782        |
| Имеющиеся данные по относительной проницаемости . . . . .  | 784        |
| Испытание керна из Хенгингстоуна по закачке пара . . . . .   | 789        |
| Коэффициент извлечения нефти по результатам специального испытания<br>кернa с Хенгингстоуна по закачке горячей воды и пара . . . . . | 791        |
| Детальный анализ коэффициента извлечения нефти . . . . .   | 792        |
| Адаптация кривых относительной проницаемости . . . . .   | 793        |
| Подбор кривых относительной фазовой проницаемости . . . . .  | 794        |
| Определение конечной точки на кривых относительных фазовых проница-<br>емостей: водонасыщенность связанной водой . . . . .           | 795        |
| Определение конечной точки на кривых относительных фазовых проница-<br>емостей: остаточная нефтенасыщенность . . . . .               | 795        |
| Относительные фазовые проницаемости для системы «пар–вода» и капил-<br>лярное давление . . . . .                                     | 797        |
| Геомеханические явления в аргиллитах . . . . .   | 797        |
| <b>Численные трудности при гидродинамическом моделировании теп-<br/>лового воздействия . . . . .</b>                                 | <b>798</b> |
| Требования к ячейкам сетки . . . . .   | 798        |
| Деятиточечные разностные схемы расчета . . . . .   | 798        |
| Погрешность в расчетах материального баланса . . . . .   | 799        |
| Увеличение продолжительности расчетов . . . . .  | 803        |
| Неустойчивости при моделировании паронагнетательных скважин . . . . .  | 803        |
| Противопоток . . . . .   | 804        |
| Фазовые превращения . . . . .  | 805        |
| Теплоемкость и теплопроводность . . . . .  | 805        |
| Отслаивание . . . . .  | 806        |
| <b>Подробное описание технологии SAGD . . . . .</b>  | <b>806</b> |
| Механизм продвижения фронта закачиваемого пара . . . . .   | 806        |
| Конвекция . . . . .  | 807        |
| Режимы эксплуатации скважин . . . . .  | 811        |
| Растворенный газ . . . . .   | 813        |
| Поток вспененной нефти . . . . .   | 814        |
| Тепловое расширение коллектора . . . . .   | 814        |
| Сдвиговые деформации . . . . .   | 815        |
| Необходимые изменения проницаемости . . . . .  | 815        |
| Гидроразрыв пласта . . . . .   | 819        |
| <b>Типичные проблемы на месторождениях битуминозной нефти . . . . .</b>  | <b>821</b> |
| Определение свойств пластов . . . . .  | 821        |
| Русловые обстановки осадконакопления . . . . .   | 821        |
| Геостатистика . . . . .  | 822        |
| Прерывистые барьеры в SAGD . . . . .   | 824        |
| Лабораторные исследования влияния размера нарушений в аргиллитах на<br>эффективность применения технологии SAGD . . . . .            | 825        |
| Гидродинамическое моделирование ПИУ и Хенгингстоуна . . . . .  | 826        |
| Глины Керн Ривер . . . . .   | 828        |

|  |            |
|--|------------|
| Свойства глинистых сланцев . . . . .   | 830        |
| Слоистость . . . . .   | 832        |
| Пласты с переслаиванием . . . . .  | 833        |
| Форма паровой камеры при SAGD . . . . .  | 833        |
| Отслеживание процесса формирования паровой камеры . . . . .                    | 835        |
| Вышележащие и нижележащие водонасыщенные горизонты . . . . .                   | 836        |
| Вышележащие и нижележащие газонасыщенные горизонты . . . . .                   | 836        |
| Влияние зон поглощения . . . . .   | 837        |
| Зоны поглощения . . . . .  | 837        |
| Потери в зонах поглощения в масштабах месторождения . . . . .                  | 838        |
| <b>Проблемы проектирования SAGD . . . . .</b>                                  | <b>839</b> |
| Критерии оценки эффективности . . . . .  | 839        |
| Длина скважин . . . . .  | 839        |
| Расстояние между скважинами по горизонтали . . . . .                           | 840        |
| Расстояние по вертикали между добывающей и нагнетательной скважинами . . . . . | 841        |
| Стадия предварительного прогрева . . . . .                                     | 841        |
| Механизированная добыча . . . . .  | 843        |
| Геомеханические эффекты . . . . .  | 847        |
| Механические напряжения в пласте . . . . .                                     | 847        |
| Прочность пластовых пород . . . . .  | 847        |
| Модель разрушения коллектора и изменение проницаемости . . . . .               | 849        |
| Гидродинамическое моделирование и геомеханика . . . . .                        | 851        |
| Пример результатов, полученных с учетом геомеханики . . . . .                  | 853        |
| Геомеханические эффекты при различных режимах эксплуатации . . . . .           | 855        |
| Измерительные комплексы для SAGD . . . . .                                     | 856        |
| Поверхностное обустройство при применении технологии SAGD . . . . .            | 858        |
| Оптимизация SAGD . . . . .   | 859        |
| <b>Перспективы разработки технологии SAGD . . . . .</b>                        | <b>860</b> |
| Совместная закачка . . . . .   | 860        |
| Альтернативы технологии SAGD . . . . .   | 860        |
| Краткие выводы . . . . .   | 861        |
| <b>Цитируемые источники . . . . .</b>  | <b>862</b> |
| <b>ГЛАВА 20. Подборки задач . . . . .</b>                                      | <b>870</b> |
| <b>Введение . . . . .</b>  | <b>870</b> |
| <b>Задачи по построению сетки . . . . .</b>                                    | <b>870</b> |
| Элемент симметрии . . . . .  | 871        |
| Необходимые изменения данных . . . . .   | 872        |
| Анализ . . . . .   | 872        |
| <b>Подборка задач по конусообразованию . . . . .</b>                           | <b>872</b> |
| Технологические ограничения . . . . .  | 872        |
| Описание условий . . . . .   | 872        |
| Методика анализа . . . . .   | 873        |
| Применяемая сетка . . . . .  | 873        |
| Результаты расчетов . . . . .  | 874        |
| Анализ проблемы конусообразования . . . . .                                    | 874        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Подборка задач по изучению разреза</b> . . . . .                                   | 874 |
| Схема исследований . . . . .  | 875 |
| Анализ разреза пласта . . . . .   | 876 |
| <b>Подборка площадных задач</b> . . . . .   | 879 |
| Суть задания . . . . .  | 881 |
| Финансовая сторона . . . . .  | 881 |
| Геологическая модель . . . . .  | 881 |
| Продажа земельных участков . . . . .  | 881 |
| Затраты на бурение и заканчивание скважин . . . . .                                   | 883 |
| Требования к точкам заложения и эксплуатации скважин . . . . .                        | 883 |
| Риски покупателя . . . . .  | 884 |
| Технические данные по пласту . . . . .  | 885 |
| Результаты скважинных исследований (конфиденциальность) . . . . .                     | 885 |
| Анализ геологического строения . . . . .  | 885 |
| Процедура . . . . .   | 887 |
| <b>Послесловие</b> . . . . .  | 887 |
| Методология развития . . . . .  | 888 |
| Непрерывное развитие инженера . . . . .   | 888 |
| Контакты . . . . .  | 888 |
| Вывод . . . . .   | 889 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Образцы сернистой нефти</b> . . . . .                                | 890 |
| <b>Введение</b> . . . . .   | 890 |
| Отбор поверхностных проб — рекомбинирование . . . . .                                 | 890 |
| Хранение сернистого газа . . . . .  | 891 |
| Влияние контейнеров . . . . .   | 892 |
| Химические свойства серы . . . . .  | 892 |
| Химическое равновесие . . . . .   | 893 |
| Применяемые емкости для хранения образцов . . . . .                                   | 894 |
| Растворимость серы . . . . .  | 894 |
| Возможное воздействие паров серы . . . . .  | 895 |
| Инертные пробоотборники . . . . .   | 895 |
| Сложные фазовые превращения . . . . .   | 896 |
| <b>Цитируемые источники</b> . . . . .   | 897 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Процедура проверки проекта</b> . . . . .                             | 898 |
| <b>Введение</b> . . . . .   | 898 |
| Примеры из реальной практики . . . . .  | 898 |
| <b>Проведение проверок на достоверность</b> . . . . .                                 | 899 |
| Выполнение простых численных проверок . . . . .                                       | 899 |
| Построение совмещенного графика адаптации и основных прогнозных показателей . . . . . | 900 |
| <b>Определение задач моделирования</b> . . . . .                                      | 902 |
| Основные цели и задачи . . . . .  | 902 |
| <b>Выбор метода гидродинамического моделирования</b> . . . . .                        | 902 |
| Учет индивидуальных особенностей . . . . .  | 902 |
| Проверка физичности описания фильтрации в пласте при заданной сетке . . . . .         | 904 |

|  |            |
|--|------------|
| Проверка задания скважин в модели . . . . .                          | 905        |
| Проверка слоистости (неоднородности) при моделировании МУН . . . . . | 905        |
| Проверка детальности и актуальности геологической модели . . . . .   | 906        |
| Проверка правильности инициализации . . . . .                        | 907        |
| Проверка методики адаптации модели и вносимых изменений . . . . .    | 907        |
| Анализ чувствительности модели . . . . .                             | 907        |
| Проверка на непротиворечивость прогнозных данных . . . . .           | 907        |
| <b>Моделирование полного цикла разработки пласта . . . . .</b>       | <b>908</b> |
| Проверка первичной подготовки данных . . . . .                       | 908        |
| Графики по адаптации модели . . . . .                                | 909        |
| Просмотр выходных данных . . . . .                                   | 910        |
| Выводы . . . . .   | 911        |
| <b>Предметный указатель . . . . .</b>                                | <b>913</b> |