

# Оглавление

|   |     |
|---|-----|
| <b>От редакционного совета</b> . . . . .  | 12  |
| <b>Предисловие</b> . . . . .  | 15  |
| <b>Введение</b> . . . . .   | 17  |
| <br>  |     |
| <b>ГЛАВА 1. История вопроса</b> . . . . .   | 19  |
| 1.1. Введение . . . . .   | 19  |
| 1.2. Развитие технологии заводнения . . . . .   | 19  |
| 1.3. Первичные методы разработки месторождений . . . . .                                      | 21  |
| Литература . . . . .  | 26  |
| <br>  |     |
| <b>ГЛАВА 2. Исследование несмешивающегося вытеснения на микроскопическом уровне</b> . . . . . | 27  |
| 2.1. Введение . . . . .   | 27  |
| 2.2. Основные принципы взаимодействия флюидов и породы . . . . .                              | 27  |
| 2.2.1. Межфазное натяжение . . . . .  | 27  |
| 2.2.2. Смачиваемость . . . . .  | 28  |
| 2.2.3. Капиллярное давление . . . . .   | 36  |
| 2.3. Методы оценки распределения флюидов в пористой среде . . . . .                           | 38  |
| 2.3.1. Изучение распределения флюидов методом реплик . . . . .                                | 38  |
| 2.3.2. Интерпретация данных о капиллярном давлении . . . . .                                  | 41  |
| 2.3.3. Определение смачиваемости коллекторов . . . . .  | 48  |
| 2.4. Принципы многофазной фильтрации в пористых средах . . . . .                              | 57  |
| 2.4.1. Общее представление о многофазной фильтрации . . . . .                                 | 57  |
| 2.4.2. Проницаемость для флюидов при многофазной фильтрации . . . . .                         | 59  |
| 2.4.3. Зависимости для относительной фазовой проницаемости в пористых породах . . . . .       | 66  |
| 2.5. Остаточная нефтенасыщенность . . . . .   | 83  |
| 2.5.1. Защемление остаточной нефти . . . . .  | 84  |
| 2.5.2. Зависимость остаточной нефтенасыщенности от капиллярных сил и сил вязкости . . . . .   | 94  |
| 2.5.3. Принципиальные модели защемления остаточной нефти . . . . .                            | 98  |
| 2.6. Мобилизация остаточной нефти . . . . .   | 105 |
| 2.6.1. Корреляционные зависимости для капиллярного числа . . . . .                            | 109 |
| 2.6.2. Модели процесса мобилизации остаточной нефти . . . . .                                 | 110 |
| Литература . . . . .  | 127 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>ГЛАВА 3. Исследование эффективности вытеснения при линейном заводнении на макроскопическом уровне . . . . .</b>             | <b>133</b> |
| 3.1. Введение . . . . .  | 133        |
| 3.2. Вывод уравнений многофазного потока в пористой среде . . . . .  | 133        |
| 3.2.1. Уравнение неразрывности для порового пространства, в котором происходит фильтрация флюида . . . . .                     | 134        |
| 3.2.2. Уравнения потока для отдельных фаз . . . . .  | 136        |
| 3.3. Решение уравнений для установившегося состояния движения флюидов в линейных системах . . . . .                            | 137        |
| 3.3.1. Линейная фильтрация установившегося потока . . . . .  | 138        |
| 3.3.2. Концевой эффект капиллярных кривых . . . . .  | 140        |
| 3.4. Уравнение фронтального вытеснения для одномерного неустановившегося потока . . . . .                                      | 147        |
| 3.4.1. Модель Баклея–Леверетта . . . . .   | 148        |
| 3.4.2. Уравнение Баклея–Леверетта (уравнение движения отдельных фаз в многофазном потоке) . . . . .                            | 151        |
| 3.4.3. Вывод уравнения фронтального вытеснения . . . . .   | 152        |
| 3.5. Расчет показателей вытеснения при линейном заводнении с постоянной скоростью закачки . . . . .                            | 157        |
| 3.6. Линейное заводнение при постоянном перепаде давления . . . . .  | 167        |
| 3.7. Эквивалентность решений уравнения фронтального вытеснения для условий постоянной скорости закачки и перепада давления . . | 176        |
| 3.8. Линейное заводнение пластов при начальной насыщенности подвижной водой . . . . .  | 179        |
| 3.9. Характеристики линейного заводнения в истощенных пластах . .  | 182        |
| 3.9.1. Эффективность вытеснения при растворении в нефти защемленного газа . . . . .  | 183        |
| 3.9.2. Заводнение при наличии защемленного газа . . . . .  | 188        |
| 3.10. Построение кривых относительной фазовой проницаемости по данным исследования линейного вытеснения . . . . .              | 191        |
| 3.10.1. Отношение фазовых проницаемостей . . . . .   | 191        |
| 3.10.2. Проницаемость по каждой из фаз . . . . .   | 196        |
| 3.11. Условия, определяющие эффективность вытеснения при линейном заводнении . . . . .   | 201        |
| 3.11.1. Влияние свойств пород и флюидов на эффективность линейного заводнения . . . . .  | 201        |
| 3.11.2. Коэффициент подвижности. Процесс вытеснения несмешивающихся флюидов . . . . .  | 208        |
| 3.12. Ограничения в применении решения уравнения фронтального вытеснения . . . . .   | 212        |
| 3.12.1. Стабилизация процесса линейного вытеснения . . . . .   | 212        |
| 3.12.2. Концевые капиллярные эффекты при вытеснении флюидов в линейных системах . . . . .                                      | 215        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.13. Решение уравнений линейного вытеснения с помощью численных моделей . . . . .  | 217        |
| 3.13.1. Процесс линейного заводнения с учетом капиллярных сил . . . . .   | 217        |
| 3.13.2. Вытеснение нефти при противоточной капиллярной пропитке . . . . .   | 220        |
| Литература . . . . .  | 257        |
| <b>ГЛАВА 4. Вытеснение нефти несмешивающимся агентом — площадное (двумерное) вытеснение . . . . .</b>                             | <b>260</b> |
| 4.1. Введение . . . . .   | 260        |
| 4.2. Уравнения движения флюида при площадном вытеснении . . . . .   | 260        |
| 4.3. Вытеснение при пятиточечной схеме заводнения . . . . .   | 261        |
| 4.4. Корреляционные зависимости по результатам лабораторных исследований на подобных моделях. Моделирование методом CGM . . . . . | 264        |
| 4.5. Моделирование методом трубок тока . . . . .  | 278        |
| 4.6. Сравнение модели CGM и модели трубок тока для пятиточечной схемы заводнения . . . . .  | 300        |
| 4.7. Прогноз показателей площадного вытеснения с помощью методов двумерного численного моделирования . . . . .                    | 300        |
| 4.7.1. Моделирование пятиточечной схемы заводнения . . . . .  | 301        |
| 4.7.2. Моделирование продвижения фронта заводнения . . . . .  | 301        |
| 4.8. Ограничения при применении методов двумерного численного моделирования площадного вытеснения . . . . .                       | 303        |
| Литература . . . . .  | 318        |
| <b>ГЛАВА 5. Исследование вертикального вытеснения на линейных и площадных моделях . . . . .</b>                                   | <b>321</b> |
| 5.1. Введение . . . . .   | 321        |
| 5.2. Двумерное вытеснение в однородных слоистых коллекторах — модель слоистой среды . . . . .                                     | 321        |
| 5.3. Линейные системы в условиях гравитационного разделения и наличия перетоков . . . . .   | 332        |
| 5.4. Аппроксимация двумерного потока с использованием осредненных по толщине свойств . . . . .                                    | 337        |
| 5.4.1. Вертикальное равновесие капиллярных и гравитационных сил . . . . .   | 341        |
| 5.4.2. Вертикальное равновесие при гравитационном разделении .  | 351        |
| 5.4.3. Вытеснение при постоянном давлении в вертикальном сечении . . . . .  | 355        |
| 5.5. Оценка эффективности вертикального вытеснения на подобных лабораторных моделях . . . . .                                     | 362        |
| 5.5.1. Принципы построения моделей, удовлетворяющих критериям подобия . . . . .   | 363        |
| 5.5.2. Использование подобных лабораторных моделей для оценки показателей вытеснения . . . . .                                    | 371        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.6. Численное моделирование двумерного вытеснения в линейных си-<br>стемах в условиях гравитационного разделения или перетоков . . . . .             | 373 |
| 5.6.1. Гравитационное разделение . . . . .  | 373 |
| 5.6.2. Перетоки в слоистых системах в отсутствие гравитацион-<br>ных сил . . . . .  | 375 |
| 5.6.3. Несмешивающееся вытеснение в однородном слоистом<br>пласте при наличии перетоков, вызванных капиллярными<br>силами и силами вязкости . . . . . | 380 |
| 5.6.4. Недостатки методов численного моделирования . . . . .  | 384 |
| 5.7. Образование языков в процессе вытеснения . . . . .   | 387 |
| 5.8. Оценка показателей заводнения с помощью трехмерных моделей<br>и методов численного моделирования . . . . .                                       | 391 |
| 5.8.1. Слоистые модели . . . . .  | 392 |
| 5.8.2. Псевдомодели . . . . .   | 401 |
| 5.8.3. Численные решения . . . . .  | 403 |
| 5.9. Заключение . . . . .   | 405 |
| Литература . . . . .  | 430 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>ГЛАВА 6. Проектирование заводнения . . . . .</b>  | 434 |
| 6.1. Введение . . . . .  | 434 |
| 6.2. Составляющие проекта заводнения . . . . .   | 434 |
| 6.3. Описание пласта . . . . .   | 435 |
| 6.4. Выбор системы заводнения . . . . .  | 436 |
| 6.5. Скорость закачки . . . . .  | 438 |
| 6.5.1. Точные выражения скорости закачки для заполненных жид-<br>костью систем, где $M = 1$ . . . . .  | 439 |
| 6.5.2. Скорость закачки при площадном заводнении для запол-<br>ненных жидкостью систем (при отсутствии в пластовой си-<br>стеме свободного газа), где $M \neq 1$ . . . . . | 444 |
| 6.5.3. Истощенные пласти . . . . .   | 453 |
| 6.5.4. Модели расчета скорости закачки при двухфазном потоке<br>за фронтом завоdnения . . . . .  | 460 |
| 6.6. Расчет показателей заводнения . . . . .   | 467 |
| 6.6.1. Методы аппроксимации или первичная оценка показателей<br>заводнения . . . . .   | 468 |
| 6.6.2. Инженерный подход — построение зависимостей по подоб-<br>ным моделям . . . . .  | 479 |
| 6.6.3. Компьютерные модели, используемые для проектирования<br>заводнения . . . . .  | 486 |
| 6.6.4. Неопределенность оценки технологических параметров . .  | 497 |
| 6.6.5. Заключение . . . . .  | 498 |
| Литература . . . . .   | 512 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>ГЛАВА 7. Роль геологии в проектировании и проведении заводнения . . . . .</b>  | 515 |
| 7.1. Введение . . . . .   | 515 |
| 7.2. Примеры разработки месторождений, показывающие значение корректного описания пласта . . . . .  | 515 |
| 7.3. Описание пласта . . . . .  | 537 |
| 7.4. Условия образования песчаных коллекторов . . . . .   | 544 |
| 7.4.1. Свойства пород . . . . .   | 545 |
| 7.4.2. Фациальные обстановки континентального осадконакопления  | 547 |
| 7.4.3. Переходные фациальные обстановки . . . . .   | 553 |
| 7.4.4. Глубоководные морские песчаники . . . . .  | 567 |
| 7.5. Условия образования карбонатных коллекторов . . . . .  | 571 |
| 7.6. Методика описания пласта . . . . .   | 595 |
| Литература . . . . .  | 648 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Компьютерные программы . . . . .</b>   | 656 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Параметры трубок тока при площадном заводнении, модель трубок тока Хиггинса–Лейтона . . . . .</b>  | 672 |
| <b>Выдержки из последних работ в теории систем заводнения (дополнения от редакции) . . . . .</b>  | 676 |
| <b>Дополнение 1. Соотношение добывающих и нагнетательных скважин: ключ к оценке производительности площадных систем и оптимизации проектирования заводнения . . . . .</b> | 678 |
| <b>Дополнение 2. К вопросу об определении оптимального соотношения добывающих и нагнетательных скважин . . . . .</b>  | 711 |
| <b>Дополнение 3. Новый подход к проектированию систем заводнения в условиях массового применения гидроразрыва пласта . . . . .</b>  | 715 |
| <b>Дополнение 4. Продуктивность многоскважинной системы – теория и приложения . . . . .</b>   | 740 |
| <b>Предметный указатель . . . . .</b>   | 767 |