



2-е дополненное  
издание

# Петрофизика

Теория и  
практика изучения  
коллекторских  
свойств горных  
пород и движения  
пластовых  
флюидов

Джеббар Туаб  
Эрл Ч. Доналдсон



Серия «Промышленный инжиниринг»

---

ДЖЕББАР ТИАБ  
Эрл Ч. Доналдсон

**ПЕТРОФИЗИКА:  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИЗУЧЕНИЯ  
КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ  
ПОРОД И ДВИЖЕНИЯ ПЛАСТОВЫХ  
ФЛЮИДОВ**

Перевод с английского  
Углов М. Д.

Под редакцией Петерсилье В. И., Былевского Г. А.

2-е издание

Москва

ООО «Премиум Инжиниринг»

2011



УДК 622.1/2:53  
ББК 33.1  
Т 39

Это издание опубликовано по соглашению с Elsevier Inc. и Technopress Ltd.

**Т 39 Тиаб Дж., Доналдсон Эрл Ч.**

Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Перевод с английского. — 2-е изд. — М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2011. — 868 с., ил. — (Промышленный инжиниринг).

В книге изложены теоретические основы и методы изучения свойств горных пород и движения однофазных, многофазных и смешивающихся флюидов в пористых геологических средах.

Приложение содержит практические примеры лабораторного определения 19 параметров породы-коллектора, пластовых флюидов и характера их взаимодействия. В каждом из 19 примеров подробно описано, какие необходимы приборы и материалы, какие операции и как нужно выполнить, какие величины измерить и какие вычисления произвести, чтобы получить искомый параметр. Расчеты по приводимым формулам поясняются численными примерами.

Книга задумана и подготовлена как учебник и методическое руководство для промысловых геологов, геофизиков и разработчиков, но она может использоваться при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также представляет несомненный интерес для широкого круга специалистов по смежным дисциплинам.

ISBN: 978-5-903363-13-1

УДК 622.1/2:53  
ББК 33.1

This edition of Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties by Djebbar Tiab; Erle Donaldson is published by arrangement with Elsevier INC of 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington MA 01803 USA. The right of Djebbar Tiab and Erle Donaldson to be identified as authors of this work has been asserted in accordance with the Copyright, Designs and Patent Act 1988. This translation has been undertaken by Technopress Ltd.

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN: 978-0-7506-7711-0 (англ.)  
ISBN: 978-5-903363-13-1

Copyright © Elsevier Inc, 2004. All rights reserved  
© Technopress Ltd, 2009  
© ООО «Премиум Инжиниринг», 2009  
© ООО «Премиум Инжиниринг», 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Об авторах .....	XIX
Благодарность .....	XXI
Предисловие к первому изданию .....	XXIII
Предисловие ко второму изданию .....	XXV
Единицы измерения .....	XXVII
ГЛАВА 1	
<b>Введение в минералогию .....</b>	<b>1</b>
Минеральный состав горных пород-обзор .....	2
Изверженные породы .....	7
Метаморфические породы .....	9
Осадочные породы .....	10
Свойства частиц осадочных пород .....	15
Развитие петрофизики и ее использование .....	19
Цели и построение данной книги .....	21
Контрольные вопросы .....	23
Словарь терминов (глава 1) .....	23
Литература .....	25
ГЛАВА 2	
<b>Введение в геологию нефти и газа .....</b>	<b>27</b>
Обзор строения Земли .....	27
Земная кора .....	29
Тектоника плит .....	30
Геологическое время .....	32
Геология осадочных пород .....	34
Бассейны .....	35
Расходящиеся континентальные окраины .....	35
Сходящиеся континентальные окраины .....	36
Трансформные континентальные окраины .....	36
Трансгрессивно-регрессивные циклы .....	37
Накопление осадков .....	38
Ловушки углеводородов .....	41
Происхождение нефти .....	43
Преобразование органических соединений в кероген .....	44



Преобразование керогена в нефть и газ . . . . .	45
Миграция и аккумуляция углеводородов . . . . .	46
Первичная миграция . . . . .	46
Вторичная миграция . . . . .	48
Свойства пластовых флюидов . . . . .	50
Градиент гидростатического давления . . . . .	50
Градиент литостатического давления . . . . .	51
Геотермический градиент . . . . .	52
Пластовые воды нефтяных месторождений . . . . .	55
Нефть и газ . . . . .	62
Химия нефти и газа . . . . .	68
Задания . . . . .	75
Условные обозначения . . . . .	79
Греческие буквы . . . . .	80
Нижние индексы . . . . .	80
Литература . . . . .	80

### ГЛАВА 3

<b>Пористость и проницаемость . . . . .</b>	<b>83</b>
Пористость . . . . .	84
Факторы, определяющие величину пористости . . . . .	85
Геолого-промысловая классификация пористости . . . . .	86
Геологическая классификация пористости . . . . .	87
Визуальное описание пористости карбонатных пород . . . . .	89
Флюидонасыщенность . . . . .	92
Использование количественных значений пористости . . . . .	92
Проницаемость . . . . .	94
Классификация проницаемостей . . . . .	95
Факторы, влияющие на величину проницаемости . . . . .	96
Взаимосвязь пористости и проницаемости . . . . .	99
Корреляционная зависимость Козени . . . . .	100
Концепция фильтрационных ячеек . . . . .	106
Математическая теория фильтрационных ячеек . . . . .	108
Удельная поверхность . . . . .	110
Коэффициенты, характеризующие фильтрационные ячейки . . . . .	114
Влияние упаковки зерен породы на ее проницаемость . . . . .	124
Влияние водонасыщенности на проницаемость . . . . .	125
Проницаемость по ЯМР-каротажу . . . . .	127
Зависимости проницаемость-пористость в карбонатных породах . . . . .	129
Зависимость проницаемости от направления . . . . .	139
Неоднородность пласта-коллектора . . . . .	152
Распределение свойств породы по пласту . . . . .	154
Распределение проницаемости и пористости . . . . .	155
Проницаемость по данным испытания скважин . . . . .	172
Метод статистического зонирования . . . . .	177

Задания.....	183
Условные обозначения.....	186
Нижние индексы.....	188
Греческие буквы.....	188
Литература.....	188

## ГЛАВА 4

### **Удельное сопротивление породы и водонасыщенность. . . 193**

Параметр пористости.....	194
Измерение сопротивлений.....	194
Определение удельного сопротивления пластовой воды . . . .	196
Связь между $F_R$ и пористостью.....	206
Корреляции между $F_R$ и извилистостью.....	207
Связь $F_R$ породы-коллектора со степенью цементации . . . . .	208
Теоретический расчет $F_R$ .....	212
Корреляция между $F_R$ и водонасыщенностью . . . . .	217
Корреляция между $F_R$ и проницаемостью.....	226
Удельное сопротивление глинистых коллекторов . . . . .	229
Водонасыщенность глинистых коллекторов.....	229
Приблизительный учет глинистости.....	235
Обобщенная зависимость для учета глинистости.....	235
Фильтрационные ячейки в глинистых песчаниках . . . . .	239
Оценка глинистых пород-коллекторов на основании лабораторных данных.....	243
Оценка глинистых пород-коллекторов по данным ГИС.....	265
Оценка пласта . . . . .	267
Анализ керна . . . . .	267
Анализ данных ГИС.....	269
Задания.....	283
Условные обозначения.....	287
Нижние индексы.....	290
Греческие буквы . . . . .	290
Литература.....	291

## ГЛАВА 5

### **Капиллярное давление . . . . . 295**

Капиллярное давление.....	295
Вывод уравнения капиллярного давления . . . . .	296
Капиллярный подъем . . . . .	301
Капиллярное давление и J-функция . . . . .	302
Измерение капиллярного давления при помощи полупроницаемой мембраны . . . . .	305
Измерение капиллярного давления методом нагрева ртути.....	308
Измерение капиллярного давления центрифугированием . . . . .	312
Лабораторная методика . . . . .	312
Расчет капиллярного давления по результатам центрифугирования.....	314

Предельная скорость центрифуги .....	317
Приближенное вычисление насыщенности на входном торце образца .....	318
Точное аналитическое вычисление насыщенностей на входном торце керна .....	321
Распределение пор по размерам .....	326
Распределение насыщенностей в пласте-коллекторе по вертикали .....	328
Капиллярное число .....	334
Задания .....	336
Условные обозначения .....	337
Греческие буквы .....	338
Русские сокращения .....	338
Литература .....	339

## ГЛАВА 6

<b>Смачиваемость .....</b>	<b>341</b>
Смачиваемость .....	341
Межфазное поверхностное натяжение .....	343
Краевой угол смачивания .....	343
Измерение краевых углов смачивания методом лежащей капли .....	345
Измерение краевых углов смачивания по методу пластины Вильгельми .....	347
Химические свойства поверхности .....	349
Оценка смачиваемости .....	352
Показатель смачиваемости Амотта .....	353
Показатель смачиваемости по методике Горного бюро США (индекс USBM) .....	355
Комбинированное определение смачиваемости методами Амотта-Горного бюро США .....	357
Испытание на смачиваемость по методу самопроизвольного впитывания .....	358
Энергия вытеснения флюида .....	360
Межфазная активность на контактах вода-нефть-порода .....	363
Влияние смачиваемости на нефтеотдачу .....	365
Влияние минерализации воды на коэффициент извлечения нефти .....	371
Изменение смачиваемости .....	371
Обработка породы .....	372
Добавление флюидо-растворимых соединений в воду и нефть .....	372
Выдерживание (созревание) системы нефть-минерализованная вода-порода .....	375
Влияние температуры и давления .....	376
Восстановление начальной смачиваемости .....	379
Влияние смачиваемости породы на ее электрические свойства .....	379
Задания .....	385



Условные обозначения .....	386
Греческие буквы .....	387
Нижние символы .....	387
Литература.....	387

## ГЛАВА 7

<b>Применение закона Дарси .....</b>	<b>395</b>
Закон Дарси.....	396
Линейное движение несжимаемых флюидов.....	397
Линейное движение газа .....	400
Законы Дарси и Пуазейля .....	404
Линейное движение флюидов по трещинам и каналам .....	405
Движение по трещинам .....	407
Движение флюидов по каналам растворения.....	411
Радиальное движение флюидов в пористых системах .....	414
Установившееся движение.....	415
Псевдоустановившийся режим.....	417
Радиальное ламинарное движение газа .....	427
Турбулентное течение газа .....	433
Линейное турбулентное течение .....	433
Трение при движении флюидов в пористых породах.....	440
Турбулентное радиальное течение.....	446
Породы, неоднородные по проницаемости .....	449
Слоистые пласты с перетоком флюидов .....	450
Слоистые пласты без перетока флюидов.....	451
Системы линейного движения флюидов .....	456
Системы радиального движения флюидов .....	456
Задания.....	459
Условные обозначения .....	463
Греческие буквы .....	464
Литература.....	464

## ГЛАВА 8

<b>Природные трещиноватые коллекторы .....</b>	<b>467</b>
Введение .....	467
Проницаемость карбонатных пород и ее происхождение .....	469
Геологическая классификация естественных трещин .....	469
Инженерная классификация коллекторов с естественной трещиноватостью.....	471
Признаки естественных трещин .....	473
Визуальный анализ трещин .....	479
Петрофизические свойства естественно трещиноватых пород ....	480
Определение трещинной пористости.....	481
Коэффициент соотношения пористостей .....	484
Индекс интенсивности трещиноватости .....	489
Зависимости проницаемость-пористость для систем с двойной пористостью .....	493

Взаимосвязь пористости и проницаемости в естественно трещиноватых коллекторах типа 1 .....	495
Определение трещинной пористости и ширины трещин по керну .....	496
Удельная поверхность трещин .....	500
Влияние формы трещин .....	502
Гидравлический радиус трещины .....	503
Естественно трещиноватые коллекторы типа 2 .....	505
Моделирование движения флюидов в трещинах .....	507
Площадь поверхности трещин .....	507
Флюидоёмкость трещин .....	508
Проводимость трещины .....	508
Характеристика естественных трещин по данным испытания скважин .....	510
Задания .....	522
Условные обозначения .....	524
Нижние индексы .....	524
Греческие буквы .....	525
Литература .....	525

## ГЛАВА 9

### **Влияние механических напряжений пород-коллекторов**

<b>на их свойства .....</b>	<b>527</b>
Взаимоотношение статическое напряжение-деформация .....	529
Анализ напряжений .....	529
Анализ деформаций .....	532
Двумерные системы напряжение-деформация .....	533
Деформации горных пород .....	534
Закон Гука .....	535
Диаграммы напряжение-деформация .....	543
Диаграмма Мора .....	546
Динамические упругие свойства .....	550
Прочность и твердость горных пород .....	552
Твердость горных пород .....	556
Сжимаемость пористых пород .....	558
Сжимаемость порового пространства .....	558
Эффективность противодействия порового давления механическим напряжениям .....	562
Влияние сжимаемости порового пространства на подсчет запасов .....	566
Преобразование лабораторных данных в пластовые данные .....	568
Влияние механических напряжений на керновые данные .....	571
Влияние напряжений на пористость .....	572
Влияние напряжений на проницаемость породы-коллектора .....	574
Влияние механических напряжений на удельное сопротивление пород .....	575

Взаимосвязь пористость-проницаемость-напряжение . . . . .	577
Влияния механических напряжений на трещиноватость пород . . .	591
Влияние коэффициента Пуассона на	
величину градиента гидроразрыва . . . . .	592
Градиент гидроразрыва в морских скважинах . . . . .	595
Влияние коэффициента Пуассона на размеры трещины . . . .	603
Распределение напряжений в недрах . . . . .	607
Разрушение пород в результате изменения напряжений . . . . .	613
Изменение поля напряжений вследствие истощения	
пласта и восстановления пластового давления . . . . .	614
Соотношение напряжений в стволе скважины . . . . .	616
Оценка критического скважинного давления в	
вертикальной скважине . . . . .	616
Критическое скважинное давление в горизонтальных	
скважинах . . . . .	618
Критическое поровое давление . . . . .	620
Пример добычи из пласта-коллектора Северного моря . . . . .	620
Пористость пласта-коллектора как индикатор прочности	
при прогнозе выноса песка . . . . .	624
Задания . . . . .	629
Условные обозначения . . . . .	633
Нижние индексы . . . . .	634
Греческие буквы . . . . .	635
Литература . . . . .	635

## ГЛАВА 10

<b>Взаимодействие флюид-порода . . . . .</b>	<b>641</b>
Значение проницаемости околоскважинной зоны . . . . .	641
Природа нарушения проницаемости . . . . .	644
Происхождение нарушений проницаемости . . . . .	645
Типы нарушения проницаемости . . . . .	647
Влияние перемещения мелких частиц по пласту	
на его проницаемость . . . . .	655
Типы и размеры мелких частиц . . . . .	655
Перемещение мелких частиц . . . . .	662
Движение привнесенных мелких частиц . . . . .	677
Концепция критической скорости . . . . .	677
Защемление и осаждение на поверхности . . . . .	678
Транспортировка частиц флюидом и закупорка пор . . . . .	681
Идентификация механизмов ухудшения проницаемости . . . . .	686
Ухудшение проницаемости из-за привнесенных извне	
твердых частиц . . . . .	687
Ухудшение проницаемости, вызываемое мелкими	
частицами породы коллектора . . . . .	693
Влияние качества воды на проницаемость . . . . .	698
Нарастание наружной фильтрационной корки . . . . .	701
Нарастание внутренней фильтрационной корки . . . . .	704
Снижение приемистости из-за закупорки	
перфорационных каналов . . . . .	706



Повреждение пласта из-за заполнения ствола скважины твердыми частицами . . . . .	708
Исследование кернов посредством фильтрации через мембрану . . . . .	710
Фильтрация флюидов через образец . . . . .	713
Задания . . . . .	722
Условные обозначения . . . . .	723
Нижние индексы . . . . .	723
Греческие буквы . . . . .	724
Литература . . . . .	724

## ПРИЛОЖЕНИЕ

<b>Определение свойств пород и флюидов . . . . .</b>	<b>727</b>
--	------------

### ЭКСПЕРИМЕНТ 1

#### **Определение содержания флюидов в породе**

<b>ретортным методом . . . . .</b>	<b>728</b>
Введение . . . . .	728
Оборудование и методика . . . . .	729
Оборудование . . . . .	729
Образцы для ретортного исследования . . . . .	729
Калибровка реторты . . . . .	730
Дистилляция в реторте . . . . .	730
Пример вычислений . . . . .	730
Калибровка реторты . . . . .	730
Результаты ретортного анализа образца . . . . .	730
Вычисление насыщенностей . . . . .	731
Вопросы и задания . . . . .	731
Литература . . . . .	731

### ЭКСПЕРИМЕНТ 2

#### **Измерение насыщенности методом экстрагирования . . . . .** **732** |

Введение . . . . .	732
Аппаратура и методика . . . . .	733
Пример вычислений . . . . .	734
Вопросы и задания . . . . .	734
Литература . . . . .	735

### ЭКСПЕРИМЕНТ 3

#### **Плотность, удельный вес и плотность в градусах АНИ . . . . .** **736** |

Введение . . . . .	736
Аппаратура и методика . . . . .	737
Измерение плотности в градусах АНИ . . . . .	737
Вестфальские веса . . . . .	738
Вопросы и задания . . . . .	739
Литература . . . . .	739

**ЭКСПЕРИМЕНТ 4**

<b>Удельный вес и относительная плотность газов</b> . . . . .	<b>740</b>
Введение . . . . .	740
Аппаратура и методика . . . . .	740
Пример вычислений . . . . .	742
Вопросы и задания . . . . .	742
Литература. . . . .	742

**ЭКСПЕРИМЕНТ 5**

<b>Вязкость</b> . . . . .	<b>743</b>
Введение . . . . .	743
Аппаратура и методика . . . . .	743
Вискозиметр Кэннона-Фенске . . . . .	744
Вопросы и задания . . . . .	746
Литература. . . . .	746

**ЭКСПЕРИМЕНТ 6**

<b>Люминесценция</b> . . . . .	<b>747</b>
Введение . . . . .	747
Аппаратура и методика . . . . .	748
Вопросы и задания . . . . .	749
Литература. . . . .	749

**ЭКСПЕРИМЕНТ 7**

<b>Абсолютная и эффективная пористость</b> . . . . .	<b>750</b>
Введение . . . . .	750
Аппаратура и методика . . . . .	751
Абсолютная пористость породы	
исходя из объема ее зерен . . . . .	751
Объем зерен породы и ее общий объем. . . . .	752
Эффективная пористость. . . . .	753
Измерение пористости нагреванием ртути. . . . .	753
Измерение пористости методом сжатия/расширения газа. . . . .	754
Статистическая оценка данных о пористости . . . . .	756
Вопросы и задания . . . . .	759
Литература. . . . .	759

**ЭКСПЕРИМЕНТ 8**

<b>Распределение частиц по размерам</b> . . . . .	<b>760</b>
Введение . . . . .	760
Аппаратура и методика . . . . .	760
Методика ситового анализа. . . . .	763
Вопросы и задания . . . . .	764
Литература. . . . .	765

**ЭКСПЕРИМЕНТ 9**

<b>Площадь поверхности зерен осадков</b> . . . . .	<b>766</b>
Введение . . . . .	766

Оборудование и методика . . . . .	767
Вопросы и задания . . . . .	772
Литература . . . . .	772

## ЭКСПЕРИМЕНТ 10

<b>Абсолютная проницаемость . . . . .</b>	<b>773</b>
Введение . . . . .	773
Аппаратура и методика . . . . .	773
Измерение абсолютной проницаемости с использованием жидкости . . . . .	773
Измерение абсолютной проницаемости с помощью газа . . . . .	775
Влияние горного давления на абсолютную проницаемость . . . . .	776
Пример вычислений . . . . .	777
Эксперимент 1 . . . . .	778
Эксперимент 2 . . . . .	778
Пример вычислений 1 . . . . .	779
Пример вычислений 2 . . . . .	779
Вопросы и задания . . . . .	780
Литература . . . . .	781

## ЭКСПЕРИМЕНТ 11

<b>Проверка эффекта Клинкенберга . . . . .</b>	<b>782</b>
Введение . . . . .	782
Аппаратура и методика . . . . .	782
Пример вычислений . . . . .	783
Данные эксперимента . . . . .	783
Вопросы и задания . . . . .	784
Литература . . . . .	784

## ЭКСПЕРИМЕНТ 12

<b>Относительная проницаемость . . . . .</b>	<b>785</b>
Введение . . . . .	785
Метод стационарной фильтрации . . . . .	786
Метод неустановившейся фильтрации . . . . .	787
Аппаратура и методика . . . . .	787
Вопросы и задания . . . . .	792
Литература . . . . .	793

## ЭКСПЕРИМЕНТ 13

<b>Основные петрофизические параметры, получаемые по данным ГИС . . . . .</b>	<b>794</b>
Введение . . . . .	794
Аппаратура и методика . . . . .	796
Удельное сопротивление пластовой воды . . . . .	796
Удельное сопротивление породы, насыщенной водным раствором соли . . . . .	796



Пример вычислений .....	798
Вопросы и задания .....	798
Литература .....	799

#### ЭКСПЕРИМЕНТ 14

<b>Поверхностное и межфазное натяжение .....</b>	<b>800</b>
Введение .....	800
Аппаратура и методика .....	800
Пример вычислений .....	803
Вопросы и задания .....	803
Литература .....	803

#### ЭКСПЕРИМЕНТ 15

<b>Капиллярное давление .....</b>	<b>804</b>
Введение .....	804
Аппаратура и методика .....	804
Подготовка кернов для измерения капиллярного давления .....	805
Метод нагнетания ртути .....	806
Метод пористой мембраны .....	806
Метод центрифуги .....	808
Пример вычислений .....	814
Вопросы и задания .....	816
Литература .....	818

#### ЭКСПЕРИМЕНТ 16

<b>Распределение пор по размерам .....</b>	<b>819</b>
Введение .....	819
Аппаратура и методика .....	820
Пример вычислений .....	821
Вопросы и задания .....	821
Литература .....	822

#### ЭКСПЕРИМЕНТ 17

<b>Определение коэффициентов <math>Z</math> для неидеальных газов ..</b>	<b>823</b>
Введение .....	823
Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	824
Аппаратура и методика .....	825
Вопросы и задания .....	826
Литература .....	826

#### ЭКСПЕРИМЕНТ 18

<b>Твердый осадок и вода .....</b>	<b>827</b>
Введение .....	827
Аппаратура и методика .....	827
Вопросы и задания .....	828
Литература .....	828

**ЭКСПЕРИМЕНТ 19**

<b>Испытание пород на прочность созданием сосредоточенной нагрузки . . . . .</b>	<b>829</b>
Введение . . . . .	829
Оборудование и методика . . . . .	829
Пример вычислений . . . . .	830
Вопросы и задания . . . . .	831
Литература . . . . .	831
<b>Вспомогательные операции и оборудование . . . . .</b>	<b>832</b>
Сохранение кернов . . . . .	832
Синтетические соляные растворы . . . . .	834
Грузопоршневой калибратор манометров . . . . .	835
Методика калибровки . . . . .	835
Литература . . . . .	836
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>837</b>