

НЕФТЕГАЗОВЫЙ ИНЖИНИРИНГ

К. МАКФИ, Дж. РИД, И. ЗУБИЗАРЕТТА

**ЛАБОРАТОРНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНА:
ГИД ПО ЛУЧШИМ
ПРАКТИКАМ**



Оглавление

От редакционного совета серии	xxi
Предисловие редактора серии	xxiii
Предисловие	xxv
ГЛАВА 1. Практические рекомендации по отбору и исследованиям керна	1
1.1. Данные исследований керна: основа для оценки параметров про- дуктивного пласта	1
1.2. Неопределенности данных исследований керна	4
1.2.1. Причины и следствия	6
1.2.2. Уменьшение неопределенности	8
1.3. Структура управления исследованиями керна	8
1.3.1. Проектирование и планирование исследований керна	8
1.3.2. Важные аспекты разработки программы	9
1.3.3. Основные пункты исследований керна	10
1.3.4. Оперативный контроль качества	11
1.4. Практические рекомендации по лабораторным исследованиям керна. Общие сведения	12
1.4.1. Отбор керна, его транспортировка и пробоподготовка	12
1.4.2. Подготовка образцов керна	12
1.4.3. Рутинные исследования керна	13
1.4.4. Специальные исследования керна	13
1.4.5. Исследования физико-механических свойств горных пород	13
1.4.6. Процедуры для контроля качества	14
1.4.7. Примеры программ исследований керна	15
1.4.8. Преимущества	16
Список литературы	16
ГЛАВА 2. Отбор керна на скважинной площадке, обработка и транспор- тировка керна	17
2.1. Системы отбора керна	17
2.1.1. Традиционные системы отбора полноразмерного керна	17

2.1.2.	Отбор керна с применением съемного керноприемника на кабеле	25
2.1.3.	Система отбора изолированного керна Gel Coring	28
2.1.4.	Системы отбора керна с сохранением газа и жидкости	28
2.1.5.	Ориентированный отбор керна	36
2.1.6.	Боковой отбор керна	37
2.2.	Стандартные методы отбора керна	41
2.2.1.	Вопросы охраны труда, техники безопасности и охраны окружающей среды	41
2.2.2.	Группа отбора керна	43
2.2.3.	Управление рисками при отборе керна	43
2.3.	Жидкости для отбора керна	46
2.3.1.	Типы буровых растворов	46
2.3.2.	Индикаторы буровых растворов	47
2.4.	Повреждение керна и изменение характеристик раствора/петрофизических параметров	50
2.4.1.	Изменение насыщенности флюидом	50
2.4.2.	Уменьшение напряжений	54
2.4.3.	Изменение смачиваемости	61
2.5.	Лучшие методы обработки керна на буровой площадке	69
2.5.1.	Подъем керна на буровую площадку	69
2.5.2.	Последовательная раскладка и маркировка	72
2.5.3.	Сканирование гамма-излучением на площадке скважины	74
2.5.4.	Резка керноприемной трубы на площадке скважины	74
2.5.5.	Стабилизация и консервация керна на площадке скважины	76
2.5.6.	Отбор проб на площадке скважины	81
2.5.7.	Транспортировка керна	84
2.5.8.	Отчетность при отборе керна	86
2.6.	Особые меры обращения с трудными типами породы	87
2.6.1.	Несцементированный керн	87
2.6.2.	Карбонатные породы	88
2.6.3.	Глинистые песчаники	89
2.6.4.	Сланцы	89
2.6.5.	Уголь	90
	Список литературы	91
	Рекомендуемая литература	94
ГЛАВА 3.	Обработка и исследование керна в лаборатории	97
3.1.	Введение	97
3.2.	Приемка и резка керна	97
3.3.	Компьютерная томография (КТ)	99

3.4.	Гамма-каротаж	104
3.5.	Извлечение из керноприемной трубы	108
3.6.	Осмотр керна и подбор образцов	112
3.7.	Консервация образца	113
3.7.1.	Сухая консервация	113
3.7.2.	Мокрая консервация	116
3.8.	Распиловка керна	117
3.8.1.	Образцы керна	117
3.8.2.	Сверлильный станок и жидкости для отбора образцов	118
3.8.3.	Ориентировка цилиндрического образца	120
3.8.4.	Выбор места для отбора цилиндрического образца	122
3.8.5.	Обрезка цилиндрического образца	128
3.9.	Продольный распил керна	130
3.10.	Осмоление керна	132
3.11.	Фотографирование и визуализация керна	133
3.11.1.	Обычная съемка	133
3.11.2.	Круговая съемка керна (на 360°)	137
3.12.	Обработка слабоконсолидированного или несцементированного керна	138
3.12.1.	Получение и резка керна	138
3.12.2.	Сканирование КТ	138
3.12.3.	Гамма-каротаж керна	142
3.12.4.	Продольный распил керна	142
3.12.5.	Осмотр керна и выбор образцов	142
3.12.6.	Отбор и защита цилиндрических образцов керна	143
3.12.7.	Фотографирование керна	146
3.12.8.	Консервация керна	147
	Список литературы	148
	Рекомендуемая литература	148
ГЛАВА 4.	Подготовка образцов керна	149
4.1.	Введение	149
4.2.	Очистка	150
4.2.1.	Растворители	150
4.2.2.	Стандартные способы очистки	152
4.2.3.	Способы очистки керна: достоинства и недостатки	160
4.3.	Сушка керна	160
4.3.1.	Сушка в обычной и вакуумной печах	160
4.3.2.	Сушка в печи с регулируемой влажностью	160
4.3.3.	Сушка при критических температурах	165
4.3.4.	Сквозная сушка	167
4.3.5.	Способы сушки керна: достоинства и недостатки	167

4.4.	Вопросы контроля качества, проверки и диагностики	168
4.5.	Глины и механизмы повреждения глин	172
4.5.1.	Структура глинистой породы	173
4.5.2.	Типы глинистых минералов	174
4.5.3.	Катионообменная способность (КОС)	176
4.5.4.	Морфология глин и регулирование свойств породы	179
4.5.5.	Механизмы повреждения глины	180
4.5.6.	Испытания без сушки	183
4.6.	Подготовка керна для определения пористости	185
4.6.1.	Оценка пористости	185
4.6.2.	Понятие общей и эффективной пористости	186
4.6.3.	Пористость по каротажу и керну	188
4.7.	Особые условия при подготовке керна	191
4.7.1.	Смачиваемость	191
4.7.2.	Карбонаты и рыхлые известняки	192
4.7.3.	Галит	192
	Список литературы	194
	Рекомендуемая литература	195
ГЛАВА 5.	Обычные исследования керна	197
5.1.	Введение	197
5.2.	Исследование флюидонасыщенности	198
5.2.1.	Ретортный метод	198
5.2.2.	Исследования по методу Дина–Старка	205
5.3.	Измерения пористости	216
5.3.1.	Объем зерен по гелию и их плотность	218
5.3.2.	Объем пор по гелию	223
5.3.3.	Общий объем	230
5.3.4.	Пористость при насыщении жидкостью	235
5.3.5.	Точность и воспроизводимость измерений пористости	239
5.4.	Измерения проницаемости	240
5.4.1.	Определения	240
5.4.2.	Закон Дарси	241
5.4.3.	Течение, не подчиняющееся закону Дарси: эффекты Клинкенберга	244
5.4.4.	Течение, не подчиняющееся закону Дарси: эффект Форх- геймера	249
5.4.5.	Измерение проницаемости при установившихся режимах	250
5.4.6.	Измерение проницаемости при неустановившихся ре- жимах	260
5.4.7.	Измерение (абсолютной) проницаемости по жидкости при установившихся режимах	269

5.4.8.	Измерение проницаемости зондированием или профилированием	275
5.5.	Исследование полноразмерного керна	285
5.5.1.	Пробоподготовка	285
5.5.2.	Насыщенность флюидом	286
5.5.3.	Пористость	286
5.5.4.	Проницаемость по газу	286
	Список литературы	289
	Рекомендуемая литература	290
ГЛАВА 6.	Подготовка к специальным исследованиям керна	293
6.1.	Пробоподготовка флюидов и определение их свойств	293
6.1.1.	Пробы пластовой воды и подготовка минерализованного раствора	293
6.1.2.	Нефть	299
6.1.3.	Газ	303
6.1.4.	Требования к данным	304
6.2.	Межфазное (поверхностное) натяжение	305
6.2.1.	Методы определения межфазного натяжения	306
6.3.	Выбор образцов для СИК	313
6.3.1.	Способы получения образца	313
6.3.2.	Компьютерная томография и фотографирование	313
6.3.3.	Петрофизические свойства	318
6.4.	Оценка пластового напряжения	326
6.4.1.	Устройство лабораторного стенда	326
6.4.2.	Понятие эффективного давления	327
6.4.3.	Эффективное давление обжима. Схема нагрузки	328
6.4.4.	Источники данных о напряжениях в пласте	331
	Список литературы	339
	Рекомендуемая литература	339
ГЛАВА 7.	Смачиваемость и исследование смачиваемости	341
7.1.	Введение	341
7.2.	Метод краевого угла	343
7.2.1.	Пробоподготовка	344
7.2.2.	Лабораторное оборудование	344
7.2.3.	Процедуры исследований	347
7.2.4.	Результаты	348
7.2.5.	Требования к представлению данных	348
7.2.6.	Метод краевого угла: выводы	349
7.3.	Метод Амотта (Амотта – Харви)	351
7.3.1.	Пробоподготовка	353

7.3.2.	Условия исследований	355
7.3.3.	Лабораторное оборудование	356
7.3.4.	Процедуры исследований	356
7.3.5.	Индекс смачиваемости Амотта – Харви	360
7.3.6.	Требования к представлению данных	361
7.3.7.	Метод Амотта (Амотта – Харви): выводы	361
7.4.	Метод USBM	363
7.4.1.	Подготовка образца	365
7.4.2.	Исследовательское оборудование	365
7.4.3.	Ключевые процессы	365
7.4.4.	Процедуры исследований	365
7.4.5.	Вычисление показателя USBM	368
7.4.6.	Требования к представлению данных	369
7.4.7.	USBM: общая информация	369
7.5.	Совместный метод Амотта – USBM	371
7.5.1.	Подготовка образца	372
7.5.2.	Исследовательское оборудование	372
7.5.3.	Процедуры исследований	372
7.5.4.	Требования к представлению данных	374
7.5.5.	Вычисление индекса USBM и Амотта – Харви	375
7.5.6.	Совмещенный метод Амотта – USBM: обобщенная информация	375
	Список литературы	377
	Рекомендуемая литература	378
ГЛАВА 8.	Исследования электрических характеристик	379
8.1.	Введение	379
8.1.1.	Каротаж удельного сопротивления	379
8.1.2.	Интерпретация водонасыщенности — закон Арчи	380
8.1.3.	Интерпретация водонасыщенности — глинистые песчаники	383
8.1.4.	Параметры интерпретации водонасыщенности по керну	385
8.2.	Исследования параметра пористости (FRF)	386
8.2.1.	Выбор образцов и пробоподготовка	386
8.2.2.	Лабораторное оборудование	388
8.2.3.	Процедуры исследований при стандартных (базовых) условиях	391
8.2.4.	Процедуры исследований — условия влияния давления перекрывающих пород	392
8.2.5.	Использование данных	399
8.2.6.	Требования к представлению данных	402
8.2.7.	Преимущества и недостатки/сложности	402

8.2.8.	Вопросы контроля качества, проверки и диагностики при исследовании пористости	406
8.3.	Определение коэффициента удельного сопротивления	413
8.3.1.	Лабораторное оборудование	413
8.3.2.	Процедуры исследований	417
8.3.3.	Назначение и использование данных	422
8.3.4.	Коэффициент насыщения: лабораторные артефакты . . .	428
8.3.5.	Коэффициент насыщения: влияние типа породы и системы поры – флюид	436
8.3.6.	Требования к представлению данных	445
8.3.7.	Преимущества и недостатки/сложности	447
8.3.8.	Вопросы контроля качества, проверки и диагностики при исследовании индекса удельного сопротивления . . .	447
8.4.	Параметры Ваксмана – Смита	455
8.4.1.	Модели глинистого песчаника	455
8.4.2.	Уравнение Ваксмана – Смита	459
8.4.3.	Исследования КОС и Q_v	464
8.4.4.	Присвоение и использование данных	470
8.4.5.	Требования к представлению данных	475
8.4.6.	Преимущества и недостатки/сложности	475
8.4.7.	Вопросы контроля качества, проверки и диагностики при исследовании Q_v , m^* и n^*	475
8.5.	Альтернативный метод определения коэффициента насыщения . .	481
	Список литературы	486
	Рекомендуемая литература	489
ГЛАВА 9.	Капиллярное давление	491
9.1.	Введение	491
9.2.	Капиллярное давление первичного вытеснения	494
9.3.	Высокоскоростная центрифуга	495
9.3.1.	Пробоподготовка	497
9.3.2.	Ключевые процессы	498
9.3.3.	Процедуры исследования (первичное вытеснение)	501
9.3.4.	Требования к представлению данных	506
9.4.	Пористая пластина (полупроницаемая мембрана): первичное вытеснение	516
9.4.1.	Пробоподготовка	517
9.4.2.	Ключевые процессы	518
9.4.3.	Процедуры исследований	520
9.4.4.	Альтернативы методу полупроницаемой мембраны	524
9.4.5.	Требования к представлению данных	525

9.5.	Ртуть–воздух (капиллярное давление по ртутной порометрии (КДРП))	531
9.5.1.	Подготовка образца	533
9.5.2.	Лабораторное оборудование	533
9.5.3.	Процедуры исследований	536
9.5.4.	Распределения размеров поровых каналов	538
9.5.5.	Типовой результат	539
9.5.6.	Требования к представлению данных	541
9.6.	Методы определения капиллярного давления: время стабилизации .	549
9.7.	Методы определения капиллярного давления при вытеснении: выводы	550
9.8.	Корректировка данных	550
9.8.1.	Поправки на закупорку	556
9.8.2.	Поправки на давление	557
9.8.3.	Поправки на связанную воду глин	558
9.8.4.	Поправки на флюид	559
9.8.5.	<i>J</i> -функция	563
	Список литературы	566
	Рекомендуемая литература	568
ГЛАВА 10.	Относительная проницаемость	569
10.1.	Введение	569
10.1.1.	Содержание раздела	569
10.1.2.	Определения	570
10.1.3.	Остаточная водонасыщенность	573
10.1.4.	Остаточная нефтенасыщенность: система вода–нефть . .	573
10.1.5.	Остаточная нефтенасыщенность: система газ–нефть . . .	577
10.1.6.	Остаточная газонасыщенность: система вода–газ	578
10.1.7.	Критическая газонасыщенность: система газ–нефть . . .	580
10.1.8.	Критическая газонасыщенность: система вода–газ	581
10.1.9.	Критическая водонасыщенность	583
10.1.10.	Критическая нефтенасыщенность: газоконденсатные си- стемы	583
10.1.11.	Смачиваемость	586
10.1.12.	Коэффициенты Кори	592
10.2.	Методика измерений	595
10.2.1.	Исследования в неустановившихся условиях (НУУ) . . .	595
10.2.2.	Исследования в установившихся условиях (УУ)	596
10.2.3.	Исследования в центрифуге	599
10.2.4.	Определение кривой в зависимости от метода исследо- вания	600
10.2.5.	Лабораторное оборудование	601

10.2.6.	Мониторинг насыщения в пластовых условиях (МНПУ)	604
10.3.	Методология интерпретации данных исследований	608
10.3.1.	Неустановившиеся условия	608
10.3.2.	Установившиеся условия	611
10.3.3.	Метод центрифуги	611
10.3.4.	Скорость потока и концевые капиллярные эффекты	612
10.3.5.	Моделирование заводнения керна	617
10.4.	Выбор образцов, режим и условия исследований	621
10.4.1.	Выбор образцов	621
10.4.2.	Состояние во время исследования	624
10.4.3.	Геостатическое давление	624
10.4.4.	Начальная водонасыщенность	626
10.5.	Описание измерений	632
10.5.1.	Относительная проницаемость: система вода – нефть в неустановившихся условиях	632
10.5.2.	Относительная проницаемость вода – нефть в установившихся условиях	645
10.5.3.	Определение относительной проницаемости системы вода – нефть на центрифуге (CentKrWO)	649
10.5.4.	Относительная проницаемость системы газ – нефть в неустановившихся условиях	653
10.5.5.	Относительная проницаемость системы газ – нефть в установившихся условиях	662
10.5.6.	Относительная проницаемость системы газ – нефть: исследования в центрифуге (CentKrGO)	666
10.5.7.	Построение кривых относительной проницаемости газ – нефть	670
10.5.8.	Относительная проницаемость системы газ – вода в неустановившихся условиях	670
10.5.9.	Относительная проницаемость в системе газ – вода в установившихся условиях	675
10.5.10.	Относительная проницаемость в системе вода – газ в неустановившихся условиях	679
10.5.11.	Относительная проницаемость в системе вода – газ в установившихся условиях	685
10.5.12.	Относительная проницаемость системы вода – газ по методу центрифуги (CentKrWG)	690
10.5.13.	Остаточная газонасыщенность: капиллярное давление при пропитке в центрифуге (Sgr-CentPc)	695
10.5.14.	Остаточная газонасыщенность (защемленный газ) при противоточной пропитке	699
10.6.	Критическая газонасыщенность (снижение давления)	704

10.6.1.	Подготовка образца	705
10.6.2.	Лабораторное оборудование	705
10.6.3.	Процедуры исследований	706
10.7.	Получение экспериментальных данных	710
10.7.1.	Образцы и флюиды (для всех исследований)	711
10.7.2.	Капиллярное давление при дренировании (снижение насыщенности до S_{wir})	712
10.7.3.	Относительная проницаемость по исследованию в центрифуге (вода – нефть, газ – нефть, декан – вода)	713
10.7.4.	Противоточная пропитка	713
10.7.5.	Исследования с заводнением при установившихся (УУ) и неуставившихся условиях (НУУ) (вода – нефть, газ – нефть и вода – газ)	714
10.8.	Выводы и рекомендации	716
10.8.1.	Нефтяные коллекторы	717
10.8.2.	Газовые и газоконденсатные коллекторы	721
	Список литературы	725
	Рекомендуемая литература	726
ГЛАВА 11.	Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)	729
11.1.	Введение	729
11.2.	Ядерная спиновая релаксация в горных породах	731
11.3.	ЯМР-релаксация и размер пор	733
11.4.	Пористость по данным ЯМР	735
11.5.	Связанная вода глин	737
11.6.	Оценка проницаемости	737
11.7.	Исследования ядра при помощи ЯМР	738
11.7.1.	Пробоподготовка	738
11.7.2.	Основные процессы	739
11.7.3.	Лабораторное оборудование	740
11.7.4.	Рекомендуемые параметры ЯМР-измерений	741
11.7.5.	Процедуры исследований	742
11.7.6.	Требования к представлению данных	743
11.8.	Измерения параметров ядра при помощи ЯМР: выводы	744
	Список литературы	745
	Рекомендуемая литература	745
ГЛАВА 12.	Исследования физико-механических свойств горных пород	747
12.1.	Введение	747
12.2.	Выбор образцов и пробоподготовка	748
12.2.1.	Место проведения исследований	748
12.2.2.	Ориентация образцов	753

12.2.3.	Жидкости для отбора цилиндрических образцов	754
12.2.4.	Размеры образцов	755
12.2.5.	Насыщение образцов	756
12.3.	Исследования прочности при одноосном сжатии	757
12.3.1.	Цели исследований и требования к образцам	757
12.3.2.	Лабораторное оборудование	758
12.3.3.	Процедуры исследований	758
12.3.4.	Использование данных	758
12.3.5.	Требования к представлению данных	759
12.3.6.	Преимущества и недостатки/сложности	761
12.3.7.	Контроль качества, проверка и диагностика при определении прочности при одноосном сжатии	761
12.4.	Исследования прочности при трехосном сжатии	764
12.4.1.	Цели исследований и требования к образцам	764
12.4.2.	Лабораторное оборудование	765
12.4.3.	Процедуры исследований	765
12.4.4.	Использование данных	773
12.4.5.	Требования к представлению данных	778
12.4.6.	Преимущества и недостатки/сложности	780
12.4.7.	Контроль качества при проведении испытания на трехосное сжатие	780
12.5.	Испытания глинистых сланцев на трехосное сжатие	786
12.5.1.	Цели исследований и требования к образцам	786
12.5.2.	Пробоподготовка	786
12.5.3.	Лабораторное оборудование	789
12.5.4.	Процедуры исследований	791
12.5.5.	Использование данных	792
12.5.6.	Требования к представлению данных	795
12.5.7.	Преимущества и недостатки/сложности	795
12.5.8.	Контроль качества, проверка и диагностика при испытании глинистых сланцев на трехосное сжатие	795
12.6.	Испытания с толстостенным цилиндром	799
12.6.1.	Цели исследований и требования к образцам	799
12.6.2.	Лабораторное оборудование	801
12.6.3.	Процедуры испытаний (стандартные испытания с толстостенным цилиндром)	804
12.6.4.	Использование данных	805
12.6.5.	Требования к представлению данных	807
12.6.6.	Преимущества и недостатки/сложности	809
12.6.7.	Контроль качества, проверка и диагностика при испытании с толстостенным цилиндром	809
12.7.	Испытания на растяжение	813

12.7.1.	Цели исследований и требования к образцам	813
12.7.2.	Лабораторное оборудование и процедуры исследований .	813
12.7.3.	Использование данных	815
12.7.4.	Требования к представлению данных	815
12.7.5.	Преимущества и недостатки/сложности	815
12.7.6.	Контроль качества, проверка и диагностика при испытани- ях на растяжение	815
12.8.	Акустические испытания	818
12.8.1.	Цели исследований и требования к образцам	818
12.8.2.	Пробоподготовка	818
12.8.3.	Лабораторное оборудование	819
12.8.4.	Процедуры исследований	821
12.8.5.	Использование данных	822
12.8.6.	Требования к представлению данных	822
12.8.7.	Преимущества и недостатки/сложности	822
12.8.8.	Контроль качества, проверка и диагностика при акусти- ческих испытаниях	823
12.9.	Испытания для получения кривой дифференциальных напряже- ний (DSCA)	826
12.9.1.	Цели исследований и требования к образцам	826
12.9.2.	Лабораторное оборудование	827
12.9.3.	Процедуры исследований	829
12.9.4.	Использование данных	830
12.9.5.	Требования к представлению данных	833
12.9.6.	Преимущества и недостатки/сложности	833
12.9.7.	Контроль качества, проверка и диагностика при анализе кривой дифференциальных напряжений (DSCA)	834
12.10.	Исследования сжимаемости порового объема	835
12.10.1.	Назначение и определения параметров сжимаемости . . .	835
12.10.2.	Условия нагружения при испытаниях на сжимаемость . .	836
12.10.3.	Пробоподготовка	840
12.10.4.	Исследовательское оборудование для определения про- ницаемости (K_0) при одноосном сжатии	841
12.10.5.	Процедуры испытаний для определения проницаемости (K_0) при одноосном сжатии	841
12.10.6.	Использование данных	843
12.10.7.	Требования к представлению данных	848
12.10.8.	Преимущества и недостатки/сложности	848
12.10.9.	Вопросы контроля качества, проверки и диагностики при исследовании одноосной сжимаемости (K_0)	849
12.11.	Анализ гранулометрического состава	852
12.11.1.	Цель	852

12.11.2. Механический гранулометрический анализ	855
12.11.3. Лазерный гранулометрический анализ	865
Список литературы	871
Рекомендуемая литература	873
ГЛАВА 13. Примеры программ исследования керна	875
13.1. Введение	875
13.2. Координационный центр исследований керна	876
13.3. Разработка и организация	876
13.4. Литологические аспекты рутинных и специальных исследований кернa	879
13.4.1. Чистые цементированные песчаники	879
13.4.2. Слабосцементированные песчаники	880
13.4.3. Глинистые песчаники	880
13.4.4. Карбонатные породы	880
13.4.5. Кавернозные карбонатные породы	881
13.4.6. Низкопроницаемые коллекторы	881
13.4.7. Трещинные коллекторы	881
13.5. Рутинные исследования керна	881
13.5.1. Рекомендованные эксперименты РИК	882
13.6. Программа СИК	882
13.6.1. Газовое месторождение	889
13.6.2. Нефтяное месторождение	889
Предметный указатель	913