

---

НЕФТЕГАЗОВЫЙ ИНЖИНИРИНГ

---

Дж. Ли  
Р. А. ВАТТЕНБАРГЕР

# ИНЖИНИРИНГ ГАЗОВЫХ РЕЗЕРВУАРОВ



# Оглавление

<b>От редакционного совета серии</b> . . . . .	xix
<b>Введение</b> . . . . .	xxi
<b>Благодарности</b> . . . . .	xxiii
<b>ГЛАВА 1. Свойства природных газов</b> . . . . .	1
1.1. Введение . . . . .	1
1.2. Обзор определений и фундаментальных принципов . . . . .	1
1.2.1. Моли и мольные доли . . . . .	1
1.2.2. Уравнение состояния для идеального газа . . . . .	2
1.2.3. Молярный объем . . . . .	2
1.2.4. Уравнение состояния для реального газа . . . . .	3
1.2.5. Принцип соответственных состояний . . . . .	3
1.3. Свойства природных газов . . . . .	4
1.3.1. Кажущаяся молекулярная масса газовой смеси . . . . .	4
1.3.2. Удельная плотность газа . . . . .	6
1.4. Расчет псевдокритических свойств газа . . . . .	6
1.4.1. Оценка псевдокритических свойств газовой смеси известного состава (условия смесимости по Стюарту) . . . . .	7
1.4.2. Расчет псевдокритических свойств газовой смеси неизвестного состава с помощью зависимостей Саттона . . . . .	15
1.4.3. Корректировка псевдокритических свойств с учетом сероводорода и углекислого газа . . . . .	18
1.4.4. Введение поправок в значения псевдокритических свойств на присутствие азота и водяных паров . . . . .	20
1.4.5. Расчет псевдокритических свойств конденсатного газа и пластовых газоконденсатных жидкостей: анализ рекомбинированных проб . . . . .	22
1.4.6. Расчет удельной плотности пластового газа . . . . .	25
1.4.7. Методика расчета псевдокритических свойств газа . . . . .	33
1.5. Корреляционная зависимость Дранчука и Абу-Кассема [16] для определения $z$ -фактора . . . . .	34
1.6. Объемный коэффициент пластового газа . . . . .	37
1.7. Плотность газа . . . . .	38
1.8. Сжимаемость газа . . . . .	39
1.9. Вязкость газа . . . . .	41

1.10.	Свойства пластовой нефти . . . . .	43
1.10.1.	Объемный коэффициент пластовой нефти . . . . .	43
1.10.2.	Давление насыщения и газовый фактор пластовой нефти . . . . .	45
1.10.3.	Сжимаемость нефти . . . . .	48
1.10.4.	Вязкость нефти . . . . .	50
1.11.	Свойства пластовой воды . . . . .	55
1.11.1.	Объемный коэффициент пластовой воды . . . . .	55
1.11.2.	Газовый фактор пластовой воды . . . . .	58
1.11.3.	Сжимаемость воды . . . . .	61
1.11.4.	Вязкость воды . . . . .	67
1.12.	Содержание водяного пара в газе . . . . .	69
1.13.	Газогидраты . . . . .	73
1.14.	Корреляции для расчета сжимаемости порового объема . . . . .	78
1.15.	Коэффициент турбулентности и коэффициент нелинейности газового потока . . . . .	79
1.16.	Заключение . . . . .	82
<b>ГЛАВА 2.</b>	<b>Основы движения газа в трубах . . . . .</b>	<b>95</b>
2.1.	Введение . . . . .	95
2.2.	Система, теплота, работа и энергия . . . . .	95
2.2.1.	Система . . . . .	96
2.2.2.	Теплота . . . . .	97
2.2.3.	Работа . . . . .	98
2.2.4.	Энергия . . . . .	99
2.3.	Первый закон термодинамики . . . . .	100
2.3.1.	Закрытая система . . . . .	101
2.3.2.	Открытая система . . . . .	102
2.4.	Закон сохранения механической энергии . . . . .	104
2.5.	Потери энергии на трение . . . . .	105
2.6.	Уравнение Бернулли . . . . .	106
<b>ГЛАВА 3.</b>	<b>Измерение расхода газа . . . . .</b>	<b>111</b>
3.1.	Введение . . . . .	111
3.2.	Диафрагменные расходомеры . . . . .	111
3.2.1.	Коэффициенты уравнения течения через диафрагму . . . . .	115
3.3.	Использование диафрагменного расходомера . . . . .	119
3.4.	Измеритель критического течения . . . . .	139
3.5.	Штуцер . . . . .	142
3.6.	Трубка Пито . . . . .	143

ГЛАВА 4. Поток газа в стволе скважины . . . . .	149
4.1. Введение . . . . .	149
4.2. Расчеты забойного давления в скважинах, добывающих сухой газ . . . . .	149
4.2.1. Методы расчета статического забойного давления . . . . .	150
4.2.2. Давление на забое фонтанирующей скважины . . . . .	158
4.3. Влияние жидкостей на расчет давления на забое фонтанирующей скважины . . . . .	171
4.3.1. Корреляционные зависимости для вертикального двухфазного потока . . . . .	171
4.3.2. Кривые распределения давления по поперечному сечению восходящего потока газа . . . . .	188
4.4. Оценка динамики продуктивности газовых скважин . . . . .	189
4.4.1. Испытание на продуктивность методом установившихся отборов (методом индикаторных кривых) . . . . .	192
4.4.2. Индикаторные кривые для газовых скважин . . . . .	193
4.4.3. Индикаторные кривые отбора газа . . . . .	196
4.4.4. Индикаторные кривые для НКТ . . . . .	196
4.5. Прогнозирование эксплуатационных характеристик газовой скважины . . . . .	199
4.6. Заключение . . . . .	203
ГЛАВА 5. Основные положения фильтрации флюидов в пористых средах . . . . .	215
5.1. Введение . . . . .	215
5.2. Модель идеального пласта-коллектора . . . . .	215
5.2.1. Уравнение пьезопроводности для фильтрации слабосжимаемых флюидов . . . . .	216
5.2.2. Уравнение пьезопроводности для потока сжимаемых флюидов . . . . .	221
5.2.3. Уравнение пьезопроводности для многофазного потока . . . . .	227
5.2.4. Безразмерные формы уравнения пьезопроводности . . . . .	235
5.3. Решения уравнения пьезопроводности . . . . .	244
5.3.1. Ограниченный цилиндрический участок продуктивного пласта . . . . .	244
5.3.2. Бесконечный продуктивный пласт цилиндрической формы, вскрытый скважиной, являющейся линейным источником . . . . .	245
5.3.3. Ограниченный цилиндрический пласт, псевдоустановившийся поток . . . . .	251
5.3.4. Уравнения потока для обобщенной конфигурации продуктивного пласта . . . . .	254
5.3.5. Радиальный поток в бесконечном продуктивном пласте с учетом влияния ствола скважины . . . . .	259
5.3.6. Линейный поток в бесконечном продуктивном пласте . . . . .	265

5.4.	Радиус влияния скважины . . . . .	266
5.5.	Принцип суперпозиции . . . . .	272
5.6.	Аппроксимация Хорнера . . . . .	277
5.7.	Решение Ван Эвердингена–Херста для уравнения пьезопроводности	279
5.7.1.	Добыча с постоянным дебитом . . . . .	279
5.7.2.	Добыча при постоянном забойном давлении . . . . .	284
5.8.	Заключение . . . . .	287
<b>ГЛАВА 6. Исследование газовых скважин на неустановившихся режи-</b>		
<b>мах притока . . . . . 305</b>		
6.1.	Введение . . . . .	305
6.2.	Типы и цели исследований газовых скважин на неустановившихся режимах притока . . . . .	305
6.3.	Модель однородного коллектора — слабосжимаемые жидкости . . . . .	306
6.3.1.	Анализ испытаний на приток с постоянным дебитом . . . . .	306
6.3.2.	Анализ данных исследования с помощью КВД . . . . .	308
6.4.	Трудности, встречающиеся в ходе реальных исследований . . . . .	310
6.4.1.	Концепция радиуса влияния скважины . . . . .	310
6.4.2.	Периоды притока в ходе испытаний . . . . .	312
6.4.3.	Эффект влияния ствола скважины . . . . .	313
6.4.4.	Анализ повреждения призабойной зоны пласта и результатов интенсификации притока . . . . .	314
6.5.	Основные положения гидродинамических испытаний газовых скважин . . . . .	316
6.5.1.	Переменные псевдадавления и псевдовремени . . . . .	316
6.5.2.	Переменные давления и времени . . . . .	319
6.5.3.	Переменные квадрата давления и времени . . . . .	319
6.5.4.	Обобщение информации о рабочих уравнениях для анализа исследований газовых скважин . . . . .	320
6.6.	Турбулентный поток . . . . .	320
6.7.	Анализ испытаний газовых скважин на приток . . . . .	324
6.7.1.	Испытания газовых скважин на приток с постоянным дебитом . . . . .	324
6.7.2.	Испытания скважины на приток газа с пошаговыми изменениями дебита . . . . .	325
6.7.3.	Испытания газовых скважин на приток с плавным изменением дебита . . . . .	329
6.7.4.	Испытание скважины в условиях турбулентного потока газа . . . . .	333
6.7.5.	Испытания газовых скважин на приток в ограниченных продуктивных пластах . . . . .	343
6.8.	Анализ КВД в газовых скважинах . . . . .	344
6.8.1.	Анализ КВД при постоянном дебите в период, предшествующий остановке скважины . . . . .	344

6.8.2.	Анализ КВД при пошаговом изменении дебита в период перед остановкой скважины . . . . .	345
6.8.3.	Анализ КВД в ходе эксплуатации при постоянном давлении в период перед закрытием скважины . . . . .	349
6.8.4.	Определение давления, усредненного по площади дренирования, для газовых скважин . . . . .	350
6.9.	Анализ типовых кривых . . . . .	359
6.9.1.	Построение типовых кривых . . . . .	359
6.9.2.	Применение типовых кривых: модель однородного коллектора, решение для слабосжимаемых жидкостей . . . . .	361
6.9.3.	Анализ испытаний газовых скважин с помощью типовых кривых . . . . .	366
6.9.4.	Анализ типовых кривых с помощью производных давления: модель однородного пласта, слабосжимаемая жидкость . . . . .	373
6.9.5.	Анализ испытаний газовых скважин с помощью типовых кривых производных . . . . .	375
6.10.	Газовые скважины после гидроразрыва . . . . .	379
6.10.1.	Типы притоков в скважину, в которой проведен гидроразрыв пласта (скважину с ГРП) . . . . .	380
6.10.2.	Специализированные методы анализа исследований скважин после проведения гидроразрыва пласта . . . . .	384
6.10.3.	Анализ исследования скважины после гидроразрыва с использованием типовых кривых . . . . .	388
6.10.4.	Влияние образования трещиноватости и повреждения пород . . . . .	411
6.11.	Коллекторы с естественной трещиноватостью . . . . .	412
6.11.1.	Модели коллекторов с естественной трещиноватостью . . . . .	414
6.11.2.	Модель псевдоустановившегося режима потока в матрице . . . . .	416
6.11.3.	Модель нестационарного потока в матрице . . . . .	422
6.12.	Идентификация модели продуктивного пласта с помощью характерного поведения давления . . . . .	434
6.12.1.	Методика идентификации типа коллектора . . . . .	436
6.13.	Заключение . . . . .	437
<b>ГЛАВА 7.</b>	<b>Изучение продуктивности газовых скважин . . . . .</b>	<b>461</b>
7.1.	Введение . . . . .	461
7.2.	Типы и задачи исследований на продуктивность . . . . .	461
7.3.	Теория анализа исследования на продуктивность . . . . .	462
7.3.1.	Теоретические уравнения исследования на продуктивность . . . . .	463
7.3.2.	Эмпирические уравнения продуктивности . . . . .	469
7.4.	Длительность периода стабилизации притока . . . . .	470
7.5.	Анализ исследований на продуктивность . . . . .	473
7.5.1.	Исследование газовой скважины на различных режимах работы . . . . .	473

7.5.2.	Метод исследования на одиночном режиме . . . . .	483
7.5.3.	Изохронный метод исследования газовых скважин . . . . .	485
7.5.4.	Модифицированный изохронный метод исследования газовых скважин . . . . .	496
7.6.	Заключение . . . . .	522
<b>ГЛАВА 8.</b>	<b>Проектирование и проведение испытаний газовых скважин</b>	<b>531</b>
8.1.	Введение . . . . .	531
8.2.	Виды и цели испытаний скважин . . . . .	531
8.2.1.	Гидродинамические исследования скважин (ГДИС) . . . . .	531
8.2.2.	Испытания на продуктивность . . . . .	533
8.3.	Основные соображения в ходе планирования исследований . . . . .	536
8.3.1.	Тип и статус скважины . . . . .	536
8.3.2.	Влияние свойств коллектора на уровень добычи . . . . .	539
8.3.3.	Учет требований техники безопасности и охраны окружающей среды . . . . .	542
8.4.	Проектирование гидродинамических исследований скважин . . . . .	543
8.4.1.	Определение свойств пород коллектора до проведения испытания скважины . . . . .	543
8.4.2.	Выбор продолжительности испытания . . . . .	549
8.4.3.	Радиус влияния . . . . .	554
8.4.4.	Правила выбора дебита . . . . .	555
8.4.5.	Основные действия в ходе проектирования испытания одиночной скважины . . . . .	558
8.4.6.	Основные принципы проектирования исследований с участием нескольких скважин . . . . .	569
8.5.	Проектирование испытания на продуктивность . . . . .	579
8.5.1.	Время стабилизации . . . . .	579
8.5.2.	Определение продолжительности исследования на продуктивность . . . . .	582
8.5.3.	Требования к выбору дебита . . . . .	583
8.5.4.	Выбор исследования на продуктивность . . . . .	584
8.5.5.	Основные действия в ходе проектирования исследования на продуктивность . . . . .	585
8.6.	Заключение . . . . .	589
<b>ГЛАВА 9.</b>	<b>Анализ эксплуатации газовых скважин по кривым падения добычи</b>	<b>601</b>
9.1.	Введение . . . . .	601
9.2.	Введение в анализ с помощью кривых падения добычи . . . . .	601
9.3.	Стандартные методики анализа . . . . .	602
9.3.1.	Экспоненциальный тип кривой падения добычи . . . . .	605
9.3.2.	Гармонический тип кривой падения добычи . . . . .	607

9.3.3. Гиперболический тип кривой падения добычи . . . . .	608
9.4. Типовые кривые для разных типов падения добычи . . . . .	617
9.4.1. Типовые кривые падения добычи по Фетковичу . . . . .	617
9.4.2. Типовая кривая падения добычи Картера . . . . .	627
9.4.3. Ограничения при применении типовых кривых падения до- бычи . . . . .	635
9.5. Заключение . . . . .	636
<b>ГЛАВА 10. Оценка запасов газа объемным методом и методом матери- ального баланса . . . . .</b>	<b>649</b>
10.1. Введение . . . . .	649
10.2. Объемные методы подсчета запасов . . . . .	649
10.2.1. Газосодержащие коллекторы с упругим режимом . . . . .	650
10.2.2. Залежь сухого газа, связанная с водоносным горизонтом (аквифером) . . . . .	654
10.2.3. Залежи жирного и конденсатного газов, разрабатывае- мые на упругом режиме . . . . .	658
10.3. Подсчет запасов газа по методу материального баланса . . . . .	663
10.3.1. Залежи сухого газа с упругим режимом . . . . .	664
10.3.2. Залежи сухого газа с режимом подпора воды . . . . .	668
10.3.3. Газовые залежи с упругим режимом и геостатическим дав- лением . . . . .	694
10.3.4. Газоконденсатные залежи с упругим режимом . . . . .	703
10.4. Заключение . . . . .	712
<b>ГЛАВА 11. Построение моделей продуктивных пластов . . . . .</b>	<b>725</b>
11.1. Введение . . . . .	725
11.2. Конечно-разностный подход к решению одномерного уравнения пьезопроводности . . . . .	726
11.2.1. Теоретические положения, ряд Тейлора . . . . .	727
11.2.2. Начальные условия . . . . .	730
11.2.3. Граничные условия . . . . .	730
11.2.4. Решение уравнения через давление — решение матричным способом . . . . .	730
11.2.5. Традиционное решение с помощью алгоритма Томаса . . . . .	732
11.3. Проверка точности решения . . . . .	734
11.4. Блочный подход к решению конечно-разностных уравнений . . . . .	738
11.5. Модель притока реального газа в координатах $(x, y)$ . . . . .	742
11.5.1. Решение конечно-разностного уравнения для двухмерной системы . . . . .	744
11.5.2. Начальные условия . . . . .	745
11.5.3. Граничные условия . . . . .	745
11.5.4. Неоднородности, анизотропия и неравномерные сетки . . . . .	745



11.5.5. Влияние силы тяжести . . . . .	746
11.5.6. Гидродинамическое давление в стволе скважины $p_{wf}$ . . . . .	747
11.6. Решение уравнений . . . . .	748
11.6.1. Итеративные матричные методы для двухмерных задач . . . . .	748
11.6.2. Решение проблем, связанных с нелинейностью . . . . .	751
11.7. Модель одиночной скважины для случая притока реального газа, построенная в координатах $(r, z)$ . . . . .	751
11.7.1. Шаг сетки . . . . .	752
11.7.2. Дискретность временных шагов . . . . .	754
11.7.3. Показатель дебита скважины и объем порового пространства . . . . .	754
11.8. Программа GASSIM . . . . .	755
11.9. Соответствие модели реальным историческим данным . . . . .	760
11.9.1. Сравнение величин давления, предсказанных моделью за- лежи, с реальными данными восстановления пластового давления . . . . .	762
11.9.2. Моделирование динамики изменения давления . . . . .	764
11.10. Прогноз динамики работы скважин . . . . .	772
<b>Приложение А. Уравнение состояния Дранчука и Абу-Кассема для определения <math>z</math>-фактора газа . . . . .</b>	<b>779</b>
<b>Приложение В. Интегральные значения для метода Поэтмана для определения статического давления на забое скважины . . . . .</b>	<b>781</b>
<b>Приложение С. Факторы формы для различных площадей дренирова- ния, разрабатываемых одиночными скважинами . . . . .</b>	<b>787</b>
<b>Приложение Д. Значения экспоненциального интеграла <math>-Ei(-x)</math> . . . . .</b>	<b>791</b>
<b>Приложение Е. Решения Ван Эвердингена – Херста для уравнения пье- зопроводности . . . . .</b>	<b>793</b>
<b>Приложение Ф. Определение производных давления . . . . .</b>	<b>813</b>
<b>Приложение Г. Таблицы для записи данных исследования скважины и идентификации продуктивного пласта . . . . .</b>	<b>815</b>
<b>Приложение Н. Анализ исследований на продуктивность с использо- ванием методик на основе квадрата давления . . . . .</b>	<b>833</b>
Н.1. Анализ с помощью метода установившихся отборов . . . . .	833
Н.2. Исследование скважины на одиночном режиме . . . . .	837
Н.3. Анализ изохронных испытаний . . . . .	837

Н.4. Проведение испытаний с помощью модифицированного изохронного метода с использованием установившейся точки режима притока . . . . .	843
Н.5. Проведение испытания модифицированным изохронным методом без использования дополнительной точки на установившемся режиме притока . . . . .	848
<b>Приложение I. Рабочие таблицы для проектирования испытания скважины . . . . .</b>	<b>857</b>
<b>Приложение J. Корреляционные зависимости для определения остаточной газонасыщенности в газовых залежах с активным аквифером</b>	<b>863</b>
<b>Приложение K. Применение компьютерной программы GASSIM для построения двухмерных моделей газовых залежей . . . . .</b>	<b>865</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>895</b>