

А.Дж. Кидни, У.Р. Парриш, Д. Маккартни

ОСНОВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА



А. Дж. Кидни, У. Р. Парриш, Д. Маккартни

ОСНОВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

*Перевод с английского 2-го издания
под редакцией О. П. Лыкова, И. А. Голубевой*

издательство
ПРОФЕССИЯ

Санкт-Петербург
2014

 ЦЕНТР
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ
ПРОГРАММ
ПРОФЕССИЯ

ББК 35.514

УДК 665.62

075

075 А. Дж. Кидни, У. Р. Парриш, Д. Маккартни. **Основы переработки природного газа** : пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. О. П. Лыкова, И. А. Голубевой. — СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. — 664 с., ил.

ISBN 978-5-91884-055-9

ISBN 978-1-420-08519-8 (англ.)

Представлены базовые процессы первичной переработки природного газа: подготовка к переработке, процессы разделения, стабилизации, а также основные нехимические технологии переработки газа на ГПЗ. Выполнен анализ преимуществ, ограничений и диапазонов применения каждой технологии. Дополнительно представлены данные о насосах, компрессорах, теплообменниках и оборудовании для разделения фаз.

Рассматриваются структура газоперерабатывающих заводов и перспективы их развития; обсуждаются проблемы транспортировки газа и капитальные затраты на установки его переработки. Материал по технологиям СПГ (*LNG*) изложен с учетом последних достижений и будущих тенденций в этой области.

Примеры расчетов, контрольные вопросы и задачи позволяют использовать книгу для подготовки студентов старших курсов и аспирантов химико-технологических вузов.

Книга предназначена инженерно-техническим специалистам ГПЗ, НПЗ, газохимических предприятий и научным работникам, занятым в газоперерабатывающей промышленности.

ББК 35.514

УДК 665.62

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

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

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги

ISBN 978-1-420-08519-8 (англ.)

ISBN 978-5-91884-055-9

© 2011 by Taylor & Francis Group, LLC

© ЦОП «Профессия», 2014

С-Перевод, оформление: ЦОП «Профессия», 2014

Оглавление

Предисловие к русскому изданию.....	15
Предисловие.....	16
Благодарности.....	17
Авторы.....	17
Глава 1. Базовые понятия.....	19
Введение.....	19
1.1. Системы единиц и пересчет величин из одной системы в другую.....	19
1.1.1. Основные величины и единицы их измерения.....	20
1.1.2. Производные величины и единицы их измерения.....	22
1.1.3. Другие величины, важные в газопереработке.....	24
1.1.4. Математические символы.....	24
1.2. Основные химические понятия и важнейшие физические свойства.....	25
1.2.1. Структура веществ и их классификация.....	25
1.2.2. Важные химические свойства.....	28
1.2.3. Важные физические свойства.....	30
1.2.4. Смеси.....	40
1.3. Методы испытаний.....	44
1.3.1. Коррозия медной пластины.....	44
1.3.2. Давление паров по Рейду.....	45
1.4. Элементы термодинамики.....	45
1.4.1. Введение.....	45
1.4.2. Первое начало термодинамики.....	46
1.4.3. Формы энергии.....	47
1.4.4. Функции состояния и процесса.....	52
1.4.5. Важные термодинамические процессы.....	53
1.4.6. Диаграммы давление–энтальпия.....	55
Вопросы для самопроверки.....	56
Задачи.....	57
Литература.....	57
Глава 2. Насосы.....	59
Введение.....	59
2.1. Теоретические основы.....	61
2.1.1. Баланс энергии.....	61
2.1.2. Напор.....	61
2.2. Центробежные насосы.....	63
2.2.1. Мощность и КПД насоса и нагревание жидкости.....	65

2.2.2. Напор всасывания, высота всасывания, полный напор.....	67
2.2.3. Эффективный положительный напор всасывания и кавитация	68
2.2.4. Характеристики насоса	70
2.2.5. Характеристики гидравлической системы.....	74
2.2.6. Законы подобия	75
2.2.7. Применение насосов в гидравлических системах	75
2.3. Возвратно-поступательные насосы.....	77
2.3.1. Базовые сведения о возвратно-поступательных насосах	78
2.4. Роторные насосы.....	80
2.5. Сравнение центробежных и объемных насосов	82
2.5.1. Центробежные насосы	82
2.5.2. Объемные насосы.....	82
Вопросы для самопроверки.....	83
Задачи.....	83
Литература	84
Глава 3. Теплопередача	85
Введение.....	85
3.1. Механизмы теплопередачи.....	85
3.1.1. Теплопроводность	86
3.1.2. Конвективная теплопередача	89
3.1.3. Теплопередача излучением	90
3.1.4. Коэффициент теплоотдачи.....	91
3.2. Способы отвода и подвода тепла	96
3.2.1. Способы отвода тепла	96
3.2.2. Способы подвода тепла.....	96
3.3. Типы теплообменных аппаратов	97
3.3.1. Кожухотрубчатые теплообменники	97
3.3.2. Теплообменники погружного типа.....	99
3.3.3. Теплообменники воздушного охлаждения.....	100
3.3.4. Пластинчатые теплообменники	102
3.3.5. Пластинчато-ребристые теплообменники.....	103
3.3.6. Пластинчатые теплообменники с вытравленными каналами	106
3.3.7. Конденсаторы	106
3.4. Ребойлеры	107
3.4.1. Ребойлер с паровым пространством.....	108
3.4.2. Вертикальный рециркуляционный термосифонный ребойлер	109
3.4.3. Горизонтальный однопроходной термосифонный ребойлер.....	109
3.4.4. Вертикальный однопроходной термосифонный ребойлер	110
3.4.5. Встроенные ребойлеры	111
Вопросы для самопроверки.....	111
Задачи.....	112
Литература	112
Глава 4. Процессы разделения.....	113
Введение.....	113
4.1. Перегонка	114
4.1.1. Базовые понятия	114
4.1.2. Типы колонн.....	123
4.2. Абсорбция.....	125
4.2.1. Базовые понятия	125
4.2.2. Физическая абсорбция.....	125

4.2.3. Химическая абсорбция	126
4.2.4. Выбор абсорбента.....	126
4.2.5. Регенеративный процесс абсорбции.....	127
4.3. Контактные устройства колонн.....	129
4.4. Адсорбция.....	132
4.4.1. Базовые понятия	132
4.4.2. Процесс адсорбции	136
4.5. Мембранное разделение	140
4.5.1. Базовые понятия	140
4.5.2. Процесс мембранного разделения	142
4.6. Выводы	147
Вопросы для самопроверки.....	148
Задачи.....	149
Литература	149
Глава 5. Оборудование для разделения фаз	151
5.1. Газожидкостные сепараторы.....	152
5.1.1. Первичное разделение	153
5.1.2. Гравитационное разделение газа и жидкости.....	153
5.1.3. Каплеулавливание	154
5.1.4. Гравитационное разделение жидкостей	158
5.2. Фильтр-сепараторы и коалесцирующие фильтры.....	158
5.3. Циклонные сепараторы	160
5.4. Жидкостные сепараторы	161
5.5. Время удержания сепараторов различного назначения	162
5.6. Фильтры.....	163
Вопросы для самопроверки.....	165
Литература	166
Глава 6. Общие сведения о газовой промышленности	169
6.1. Введение	169
6.1.1. Мировое производство и потребление природного газа	171
6.1.2. Производство и потребление природного газа в США	172
6.2. Источники природного газа	176
6.2.1. Сведения из геологии.....	176
6.2.2. Запасы.....	177
6.2.3. Традиционные источники.....	178
6.2.4. Нетрадиционные источники	180
6.3. Состав природного газа	184
6.3.1. Типичный состав газа из некоторых источников	184
6.3.2. Состав газа угольных залежей.....	186
6.3.3. Состав сланцевого газа.....	186
6.3.4. Примеси.....	188
6.4. Классификация природных газов	188
6.4.1. Содержание жидкостей.....	188
6.4.2. Содержание серы	190
6.5. Основные продукты и рынки	190
6.5.1. Метан	191
6.5.2. Этан.....	191
6.5.3. Пропан.....	192
6.5.4. Этан-пропановая смесь	192
6.5.5. Изобутан	192

6.5.6. Нормальный бутан	192
6.5.7. Газоконденсатные жидкости.....	193
6.5.8. Газовый бензин	193
6.5.9. Сера.....	193
6.6. Требования к продуктам	193
6.6.1. Природный газ	193
6.6.2. Жидкие продукты.....	195
6.7. Характеристики горения.....	197
6.7.1. Теплота сгорания	197
6.7.2. Число Воббе.....	199
Вопросы для самопроверки.....	200
Задачи	200
Литература	201
Интернет-ресурсы	203
Глава 7. Процессы газоперерабатывающих заводов.....	204
7.1. Задачи газоперерабатывающих заводов	204
7.2. Процессы газоперерабатывающих заводов.....	205
7.2.1. Промысловые операции и приемка газа	205
7.2.2. Входное компримирование	207
7.2.3. Очистка газа.....	207
7.2.4. Осушка	207
7.2.5. Извлечение тяжелых углеводородов.....	208
7.2.6. Отделение азота.....	208
7.2.7. Удаление следовых компонентов.....	208
7.2.8. Выходное компримирование.....	208
7.2.9. Переработка углеводородных жидкостей.....	209
7.2.10. Извлечение серы.....	209
7.2.11. Хранение и транспортировка.....	209
7.2.12. Сжижение	209
7.3. Вспомогательные системы	210
7.3.1. Энергоносители.....	210
7.3.2. Системы контроля технологических процессов.....	213
7.3.3. Системы безопасности.....	213
7.4. Контрактные соглашения и экономические вопросы	214
7.4.1. Контракты с твердой суммой вознаграждения	214
7.4.2. Контракты с правом на долю дохода от реализации продукции.....	215
7.4.3. Контракты на покупку всего объема добываемого газа	215
7.4.4. Контракты с фиксированным процентом извлечения жидкостей	215
7.4.5. Контракты на продажу газа с учетом его теплосодержания.....	215
7.4.6. Капитальные затраты	216
7.5. Производственные критерии	216
7.5.1. Убыль объема газа.....	217
7.5.2. Энергетическая эффективность	217
7.5.3. Ценовой дифференциал.....	218
Вопросы для самопроверки.....	220
Литература	220
Глава 8. Промысловые операции и прием газа	222
Введение.....	223
8.1. Промысловые операции	223
8.1.1. Операции на устье скважин	223

8.1.2. Системы сбора газа	226
8.1.3. Компрессорные станции	226
8.1.4. Правила прокладки газопроводов	229
8.1.5. Скребки	229
8.1.6. Промысловый замер газа	234
8.2. Газовые гидраты	235
8.2.1. Свойства газовых гидратов	235
8.2.2. Прогнозирование условий гидратообразования.....	238
8.2.3. Ингибирование гидратообразования	240
8.3. Прием газа	247
8.3.1. Пробкоуловители трубного типа	247
8.3.2. Пробкоуловители резервуарного типа	249
8.3.3. Сравнение конструкций пробкоуловителей	250
8.4. Вопросы безопасности и охраны окружающей среды.....	250
Вопросы для самопроверки.....	251
Задачи.....	252
Литература	253
Интернет-ресурсы	253
Глава 9. Компримирование газа	254
Введение.....	255
9.1. Теоретические основы	256
9.1.1. Термодинамика сжатия газа.....	256
9.1.2. Ступенчатое сжатие.....	260
9.1.3. Коэффициенты полезного действия компрессора	261
9.2. Приводы компрессоров	263
9.3. Типы компрессоров.....	264
9.3.1. Объемные компрессоры	266
9.3.2. Динамические компрессоры	270
9.4. Расчет производительности и потребляемой мощности.....	276
9.4.1. Производительность	277
9.4.2. Потребляемая мощность.....	281
9.5. Сравнение возвратно-поступательных и центробежных компрессоров	283
9.6. Вопросы безопасности и охраны окружающей среды.....	284
Вопросы для самопроверки.....	285
Задачи.....	285
Литература	286
Глава 10. Очистка газа.....	287
10.1. Введение	288
10.1.1. Кислые газы.....	288
10.1.2. Концентрация кислых компонентов в природном газе	289
10.1.3. Требуемые уровни очистки	289
10.1.4. Утилизация кислых газов	290
10.1.5. Процессы очистки.....	290
10.2. Процессы абсорбции растворителями	294
10.2.1. Амины	295
10.2.2. Соли щелочных металлов.....	307
10.3. Физическая абсорбция.....	308
10.3.1. Свойства растворителя.....	309
10.3.2. Типичные условия процесса	311
10.3.3. Смешанные процессы	313

10.4. Адсорбция.....	314
10.5. Низкотемпературное разделение газа	316
10.6. Мембранная очистка.....	318
10.6.1. Удаление диоксида углерода из природного газа	318
10.6.2. Вопросы эксплуатации.....	319
10.6.3. Достоинства и недостатки систем мембранного разделения	321
10.7. Нерегенерируемые поглотители сероводорода.....	322
10.8. Биологические процессы.....	322
10.9. Вопросы безопасности и охраны окружающей среды.....	323
10.9.1. Амины	323
10.9.2. Адсорбенты, или твердые поглотители	323
10.9.3. Мембраны.....	324
Вопросы для самопроверки.....	324
Задачи.....	324
Литература	325
Глава 11. Осушка газа	328
Введение.....	329
11.1. Содержание воды в углеводородах	330
11.2. Процессы осушки газа	334
11.2.1. Абсорбционные процессы	334
11.2.2. Адсорбционные процессы	343
11.2.3. Процессы с нерегенерируемыми влагопоглотителями.....	357
11.2.4. Мембранные процессы	357
11.2.5. Другие процессы.....	358
11.2.6. Сравнение процессов осушки.....	359
11.3. Вопросы охраны труда и окружающей среды	360
Вопросы для самопроверки.....	360
Задачи.....	361
Литература	362
Глава 12. Извлечение углеводородов.....	364
12.1. Введение	365
12.1.1. Ретроградная (обратная) конденсация	366
12.2. Элементы процессов.....	367
12.2.1. Холодильная система	368
12.2.2. Турбодетандеры	374
12.2.3. Теплообмен	379
12.2.4. Газожидкостные сепараторы	380
12.2.5. Фракционирование	380
12.3. Процессы извлечения жидкостей.....	382
12.3.1. Контроль точки росы и кондиционирование газа	383
12.3.2. Частичное извлечение этана	388
12.3.3. Глубокое извлечение этана.....	392
12.4. Вопросы охраны труда и окружающей среды	397
Вопросы для самопроверки.....	397
Задачи.....	397
Литература	398
Глава 13. Удаление азота.....	400
Введение.....	401
13.1. Удаление азота для облагораживания газа	401

13.1.1. Низкотемпературная ректификация	402
13.1.2. Адсорбция при переменном давлении	404
13.1.3. Мембранные процессы	405
13.2. Извлечение азота для операций по повышению нефтеотдачи пластов	406
13.3. Вопросы охраны труда и окружающей среды	408
Вопросы для самопроверки.....	408
Задачи.....	409
Литература	409
Глава 14. Удаление следовых компонентов	411
14.1. Введение	412
14.1.1. Водород	412
14.1.2. Кислород.....	412
14.1.3. Природные радиоактивные материалы.....	413
14.1.4. Мышьяк.....	417
14.2. Гелий	417
14.2.1. Введение	417
14.2.2. Методы извлечения.....	418
14.3. Ртуть.....	421
14.3.1. Экологические факторы	423
14.3.2. Ртутная коррозия.....	423
14.3.3. Процессы удаления ртути	423
14.4. Бензол, толуол, этилбензол и ксилолы.....	425
Вопросы для самопроверки.....	427
Задачи.....	427
Литература	428
Интернет-ресурсы	430
Глава 15. Переработка жидкостей	431
Введение.....	432
15.1. Переработка конденсата	432
15.1.1. Удаление кислых компонентов.....	434
15.1.2. Обезвоживание	434
15.2. Переработка газоконденсатных жидкостей	434
15.2.1. Удаление кислых компонентов	436
15.2.2. Обезвоживание	440
15.2.3. Фракционирование	443
15.3. Вопросы охраны труда и окружающей среды	443
Вопросы для самопроверки.....	444
Задачи.....	444
Литература	445
Глава 16. Переработка и удаление кислых газов	447
16.1. Введение	448
16.1.1. Диоксид углерода	448
16.1.2. Сероводород	448
16.2. Свойства серы.....	449
16.2.1. Твердая фаза.....	449
16.2.2. Жидкая фаза	450
16.2.3. Паровая фаза	450
16.3. Процессы извлечения серы	451
16.3.1. Процесс Клауса.....	452

16.3.2. Процессы малой и средней производительности	464
16.4. Хранение серы	468
16.5. Утилизация кислых газов	469
16.5.1. Повышение нефтеотдачи пластов	469
16.5.2. Утилизационные скважины	470
16.6. Вопросы охраны труда и окружающей среды	470
Вопросы для самопроверки.....	472
Задачи.....	472
Литература	473
Глава 17. Транспортировка и хранение.....	475
Введение.....	475
17.1. Газ.....	476
17.1.1. Транспортировка	476
17.1.2. Газораспределительные центры	483
17.1.3. Газохранилища.....	486
17.2. Жидкие продукты.....	491
17.2.1. Транспортировка	491
17.2.2. Хранение.....	494
Вопросы для самопроверки.....	494
Задачи.....	495
Литература	496
Глава 18. Сжиженный природный газ.....	498
18.1. Введение	499
18.1.1. Пиковые заводы и вспомогательные станции СПГ.....	500
18.1.2. Основные заводы СПГ и труднодоступные запасы газа.....	501
18.2. Очистка газа перед сжижением	507
18.3. Циклы сжижения	509
18.3.1. Циклы Джоуля—Томсона	509
18.3.2. Детандерные циклы.....	514
18.3.3. Каскадные циклы	518
18.4. Хранение СПГ.....	527
18.4.1. Хранение в наземных криогенных резервуарах	527
18.4.2. Хранение в заглубленных криогенных резервуарах.....	531
18.4.3. Ролlover (расслоение и самопроизвольный переворот слоев)	533
18.5. Транспортировка	535
18.5.1. Перевозка автотранспортом	535
18.5.2. Перекачка по трубопроводам.....	535
18.5.3. Перевозка морским транспортом	536
18.6. Регазификация СПГ и использование холода	540
18.6.1. Регазификация	540
18.6.2. Использование холода	541
18.7. Экономика индустрии СПГ.....	542
18.7.1. Себестоимость сжижения	544
18.7.2. Затраты на транспортировку.....	544
18.7.3. Затраты на регазификационные терминалы	546
18.8. Безопасность труда и охрана окружающей среды.....	546
Вопросы для самопроверки.....	547
Задачи.....	548
Литература	549
Интернет-ресурсы	552

Глава 19. Капитальные затраты на установки переработки газа	553
Введение.....	553
19.1. Базовые допущения, применяемые ко всем данным о капитальных затратах	554
19.2. Очистка аминными растворами.....	554
19.3. Осушка гликолем	555
19.4. Извлечение этана прямым охлаждением (частичное извлечение этана)	556
19.5. Извлечение этана низкотемпературной переработкой (глубокое извлечение этана) и удаление азота.....	557
19.6. Производство серы и доочистка хвостовых газов.....	558
19.6.1. Производство серы в больших объемах.....	558
19.6.2. Производство серы в небольших объемах.....	560
19.7. Капитальные затраты на высокопроизводительные установки извлечения ГКЖ.....	561
19.8. Поправки к данным о капитальных затратах.....	563
Вопросы для самопроверки.....	564
Литература	564
Глава 20. Газоперерабатывающие заводы	565
Введение.....	565
20.1. Завод «Сан-Хуан»	565
20.1.1. Сырье и производимые продукты	567
20.1.2. Компримирование входящего газа.....	568
20.1.3. Теплообмен	568
20.1.4. Осушка.....	568
20.1.5. Пропановое охлаждение	569
20.1.6. Извлечение углеводородов.....	569
20.1.7. Аминовая очистка	569
20.1.8. Дезтанизация.....	570
20.1.9. Компримирование товарного газа.....	570
20.2. Завод «Уитни-Каньон».....	570
20.2.1. Сырье и производимые продукты	570
20.2.2. Пункт приема	571
20.2.3. Компримирование входящего газа	572
20.2.4. Очистка газа.....	572
20.2.5. Извлечение серы	572
20.2.6. Осушка.....	573
20.2.7. Извлечение углеводородов.....	573
20.2.8. Переработка жидкостей	573
20.3. Завод «Ганнибал»	574
20.3.1. Сырье и производимые продукты	574
20.3.2. Пункт приема	575
20.3.3. Очистка газа.....	576
20.3.4. Извлечение серы	576
20.3.5. Осушка	576
20.3.6. Установка отделения азота и низкотемпературная секция.....	576
20.3.7. Переработка жидкостей	577
Вопросы для самопроверки.....	577
Задачи.....	577
Литература	578
Применяемые обозначения величин	579
Величины, обозначаемые греческими буквами	581

Приложение А. Словарь терминов газопереработки.....	582
Приложение Б. Физические константы и физические свойства.....	593
Б1. Соотношения между единицами измерения.....	593
Б2. Газовые постоянные и стандартные состояния газа	594
Б2.1. Универсальная газовая постоянная	594
Б2.2. Стандартные состояния газа	594
Б2.3. Полезные соотношения между объемами в стандартных условиях	595
Б3. Термодинамические и физические свойства.....	595
Б3.1. Физические свойства чистых жидкостей и газов	595
Б3.2. Свойства чистых жидкостей и газов, зависящие от температуры	595
Б3.3. Физические свойства алканоламинов и их смесей с водой	614
Б3.4. Физические свойства гликолей и их смесей с водой	620
Б3.5. Свойства насыщенного водяного пара	628
Б3.6. Диаграммы зависимости давления и энтальпии и таблицы насыщения для чистых углеводородов, азота и диоксида углерода.....	632
Б4. Коэффициенты сжимаемости углеводородов.....	662
Литература	662