

Е. П. Запорожец, Н. А. Шостак,  
Е. Е. Запорожец

**ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ ПОДГОТОВКИ  
И ПЕРЕРАБОТКИ  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ**

---

**Е. П. Запорожец  
Н. А. Шостак  
Е. Е. Запорожец**

**ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ ПОДГОТОВКИ  
И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ  
ГАЗОВ**

*Монография*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 622.279.8+665.62  
ББК 35.514  
3-33

**Р е ц е н з е н т ы :**

доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет» *Хижняк Григорий Петрович*;  
доктор технических наук, профессор кафедры оборудования нефтяных и газовых  
промыслов ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический  
университет» *Долгов Сергей Викторович*

**Запорожец, Е. П.**

**3-33** Процессы и оборудование в технологиях подготовки и переработки  
углеводородных газов : монография / Е. П. Запорожец, Н. А. Шостак,  
Е. Е. Запорожец. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 600 с. :  
ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0723-6

Представлены свойства и методы расчетов параметров индивидуальных углеводородов и их смесей. Рассмотрены гидрогазомеханические, тепловые и массообменные процессы. Описаны некоторые процессы синтеза жидкости с получением моторных топлив из углеводородных газов. Приведены пути повышения эффективности процессов и оборудования.

Для специалистов газовой и нефтяной промышленности. Издание может быть полезно преподавателям, аспирантам и студентам технических вузов.

УДК 622.279.8+665.62  
ББК 35.514

ISBN 978-5-9729-0723-6

© Запорожец Е. П., Шостак Н. А., Запорожец Е. Е., 2021  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## ЧАСТЬ 1

---

<b>СВОЙСТВА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ СМЕСЕЙ</b> .....	11
--	----

### ГЛАВА 1

<b>ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ И РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ</b> .....	11
1.1. Идеальные газы .....	11
1.2. Реальные газы .....	13

### ГЛАВА 2

<b>ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ, УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ СМЕСЕЙ</b> .....	18
2.1. Общие физические параметры .....	18
2.2. Основные зависимости для выражения составов многокомпонентных смесей .....	20
2.3. Молекулярная масса многокомпонентных углеводородных газов и жидкостей .....	21
2.4. Плотность, коэффициент объемного расширения .....	23
2.5. Температура кипения .....	27
2.6. Критические и псевдокритические температуры, давление, молекулярный объем и фактор сжимаемости .....	28
2.7. Давление насыщенных паров .....	34
2.8. Поверхностное натяжение .....	38
2.9. Вязкость .....	41
2.9.1. Вязкость индивидуальных жидкостей и их смесей .....	43
2.9.2. Вязкость газов и паров .....	46
2.10. Парахор, реохор, лиопарахор, ортохор .....	48
2.11. Факторы сжимаемости, ацентричности, характеристический .....	50
2.12. Фугитивность, активность, химический и термодинамический потенциалы .....	53
2.13. Теплоемкость, показатель адиабаты .....	60
2.14. Теплота испарения .....	67

2.15. Энтальпия .....	69
2.16. Теплопроводность .....	74
2.17. Параметры движения молекул в газах и жидкостях .....	85
2.18. Теплота сгорания топлива, теоретический и действительный расход воздуха, коэффициент избытка воздуха .....	90
2.19. Таблицы термодинамических параметров некоторых углеводородных газов и воды .....	92

### **ГЛАВА 3**

<b>ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>111</b>
3.1. Система жидкость – пар в равновесных условиях .....	111
3.2. Система жидкость – пар в неравновесных условиях .....	114

### **ГЛАВА 4**

<b>ГИДРАТЫ И ИХ СВОЙСТВА .....</b>	<b>115</b>
4.1. Общие сведения .....	115
4.2.1. Структурные особенности .....	116
4.2.2. Условия образования, существования и диссоциации .....	119
4.2. Физико-химические параметры гидратов .....	123
4.2.1. Состав гидратов .....	125
4.2.2. Плотность гидратов .....	125
4.2.3. Диэлектрические свойства .....	127
4.2.4. Механические свойства .....	129
4.2.5. Теплофизические свойства.....	130
<b>Литература к части I .....</b>	<b>133</b>

## **ЧАСТЬ II**

<b>ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ, ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ И ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ .....</b>	<b>136</b>
---	------------

### **РАЗДЕЛ 1**

<b>ГИДРОГАЗОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>139</b>
---	------------

### **ГЛАВА 1**

<b>ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И РАСЧЕТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГИДРОСТАТИКИ .....</b>	<b>139</b>
1.1. Уравнение гидростатики .....	139
1.2. Принцип сообщающихся сосудов .....	139
1.3. Некоторые практические приложения основного уравнения гидростатики .....	140

## **ГЛАВА 2**

### **ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И РАСЧЕТНЫЕ УРАВНЕНИЯ**

<b>ГИДРОДИНАМИКИ</b> .....	141
2.1. Характеристики движения жидкостей .....	142
2.1.1. Скорость и расход жидкости .....	142
2.1.2. Гидравлический радиус и эквивалентный диаметр .....	143
2.1.3. Установившийся и неустановившийся потоки .....	143
2.1.4. Режимы движения жидкости .....	143
2.1.5. Критерии гидрогазодинамического подобия .....	144
2.1.6. Уравнение Бернулли .....	145
2.1.7. Образование газожидкостных структур и сопротивления их движению по трубопроводам .....	146
2.2. Истечение жидкости через сопла и насадки .....	152
2.2.1. Расход жидкости через сопла лемнискатного и коноидального типов .....	153
2.2.2. Измерение расхода жидкости или газа с помощью трубки Пито – Прандтля .....	155
2.2.3. Измерение расхода жидкости или газа диафрагмой и соплами .....	156
2.3. Гидродинамическая кавитация .....	160
2.3.1. Общие сведения .....	160
2.3.2. Некоторые физические эффекты при кавитации .....	167
2.4. Гидравлический удар .....	170

## **ГЛАВА 3**

<b>ГАЗОДИНАМИКА</b> .....	173
3.1. Основные расчетные уравнения газодинамики .....	173
3.2. Конденсация и кристаллизация в газовых потоках .....	176
3.2.1. Гомогенная спонтанная конденсация в однокомпонентном сверхзвуковом потоке .....	176
3.2.2. Гетерогенная конденсация в двухкомпонентном сверхзвуковом потоке .....	180
3.2.3. Конденсация в потоке многокомпонентного углекислотного газа .....	182
3.2.4. Кристаллизация твердой фазы в сверхзвуковых потоках .....	184

## **ГЛАВА 4**

### **НАГНЕТАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ, КОМПРИМИРОВАНИЕ И РАСШИРЕНИЕ ГАЗОВ** .....

4.1. Насосные установки .....	186
4.2. Вентиляторы, газодувки .....	191
4.3. Компрессоры .....	192
4.4. Детандеры .....	198
4.5. Монтежу .....	198

## **ГЛАВА 5**

<b>СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И АППАРАТЫ</b> .....	199
5.1. Общие сведения об эжекционных течениях и струйных нагнетателях .....	199
5.2. Гидроприводные струйные компрессорные агрегаты .....	214
5.3. Создание вакуума .....	227
5.4. Вихревой эффект. Термотрансформатор Ранка –Хилша .....	228
5.5. Процесс энергоразделения в пульсационной струе .....	238

## **ГЛАВА 6**

<b>ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ</b> .....	251
6.1. Осаждение тяжелой фазы под действием гравитационной силы .....	253
6.1.1. Свободное осаждение .....	253
6.1.2. Стесненное осаждение .....	261
6.1.3. Разделители .....	263
6.2. Очистка газа от жидкости под действием центробежных сил .....	267
6.3. Отделение дисперсной жидкости от газа под действием инерционных сил .....	282
6.3.1. Общие сведения .....	282
6.3.2. Сепараторы с насыпными слоями .....	287
6.3.3. Сетчатые сепараторы (демистеры) .....	290
6.3.4. Сепараторы жалюзийные .....	293
6.3.5. Сепараторы с регулярными насадками .....	296
6.3.6. Эффективность насадочных сепараторов .....	298
6.4. Фильтрация .....	301
6.4.1. Общие сведения .....	301
6.4.2. Очистка газа в капиллярных фильтрах .....	310
6.4.3. Электрокинетическое удаление жидкости из фильтров .....	314
6.5. Отделение больших масс жидкости от газа .....	318
6.5.1. Нестационарные процессы при поступлении большой массы жидкости из газопровода в емкость .....	318
6.5.2. Параметры динамического напора жидкостной пробки, поступающей в емкость аппарата из газопровода .....	320
6.5.3. Техника для улавливания больших масс жидкости, поступающих в виде пробок из газопровода .....	320
6.5.3.1. Схемы оборудования .....	320
6.5.3.2. Устройства, применяемые для уменьшения динамического напора жидкости .....	328
6.5.3.2.1. Сужающийся насадок .....	328
6.5.3.2.2. Сопло Вентури .....	331
6.5.3.3. Рассекатель потока жидкости .....	334
<b>Литература к разделу 1</b> .....	337

## **РАЗДЕЛ 2**

### **ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ..... 347**

#### **ГЛАВА 1**

<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>347</b>
<b>1.1. Трубчатые теплообменники .....</b>	<b>349</b>
1.1.1. Кожухотрубные теплообменники .....	349
1.1.2. Теплообменники «труба в трубе» .....	354
1.1.3. Оросительные теплообменники .....	355
1.1.4. Погружные теплообменники .....	356
<b>1.2. Пластинчатые теплообменники .....</b>	<b>356</b>
<b>1.3. Спиральные теплообменники .....</b>	<b>357</b>
<b>1.4. Теплообменники с поверхностью теплообмена,     образованной стенками аппарата .....</b>	<b>358</b>
<b>1.5. Теплообменники с оребренными поверхностями теплообмена .....</b>	<b>360</b>
<b>1.6. Сравнение и выбор теплообменных аппаратов .....</b>	<b>362</b>

#### **ГЛАВА 2**

##### **ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ФОРМУЛЫ**

<b>ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ .....</b>	<b>366</b>
<b>2.1. Тепловой баланс .....</b>	<b>366</b>
<b>2.2. Уравнение теплопроводности .....</b>	<b>367</b>
<b>2.3. Уравнение теплопередачи .....</b>	<b>369</b>
<b>2.4. Тепловое подобие .....</b>	<b>373</b>
<b>2.5. Теплоотдача .....</b>	<b>376</b>
2.5.1. Конвективная теплоотдача .....	376
2.5.1.1. Теплоотдача при вынужденной конвекции .....	376
2.5.1.2. Теплоотдача при свободной конвекции .....	378
2.5.1.3. Теплоотдача при конденсации пара .....	379
2.5.1.4. Теплоотдача при кипении жидкости .....	381
2.5.2. Теплоотдача при непосредственном соприкосновении теплоносителей .....	383
2.5.3. Экспериментальные коэффициенты теплоотдачи .....	383
<b>2.6. Теплопередача при тепловом излучении твердых тел .....</b>	<b>385</b>
2.6.1. Общие сведения .....	385
2.6.2. Закон Стефана – Больцмана .....	385
2.6.3. Закон Кирхгофа .....	386
2.6.4. Теплообмен лучеиспусканием между телами .....	386
2.6.5. Лучеиспускание газов .....	387
2.6.6. Совместная передача тепла конвекцией и лучеиспусканием .....	389
<b>2.7. Интенсификация теплообмена .....</b>	<b>390</b>
2.7.1. Рациональная интенсификация теплообмена .....	390
2.7.2. Поверхность с регулярной шероховатостью .....	391
2.7.3. Гидродинамика и теплопередача в винтообразно профилированных трубах .....	394

2.7.4. Теплоотдача и сопротивление в каналах с кольцевой накаткой .....	399
2.7.5. Механизм интенсификации теплоотдачи в профилированных каналах .....	401
2.7.6. Влияние интенсификации теплоотдачи на солеотложения в трубах .....	402
2.7.7. Особенности образования отложений на стенке с интенсификаторами теплосъема .....	403

## **ГЛАВА 3**

<b>ХОЛОДИЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>403</b>
3.1. Дросселирование газов .....	404
3.2. Охлаждение газов при их расширении в детандере .....	407
3.3. Охлаждение испаряющейся жидкостью .....	408
3.4. Холодильные циклы, используемые при охлаждении и разделении нефтяных и природных газов .....	409
3.4.1. Холодильные циклы, основанные на использовании Джоуль-Томсоновского эффекта .....	409
3.4.2. Дроссельные холодильные циклы, основанные на испарении жидкости .....	410
3.4.3. Цикл, основанный на использовании изоэнтропийного расширения газа .....	411
3.4.4. Холодильный цикл на многокомпонентном холодильном агенте .....	412
3.5. Методы охлаждения газа в струйных аппаратах и установках .....	413
3.5.1. Теплогазодинамический сепаратор .....	413
3.5.2. Эжекторная холодильная установка .....	422
<b>Литература к разделу 2 .....</b>	<b>424</b>

## **РАЗДЕЛ 3**

<b>МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>426</b>
-------------------------------------	------------

## **ГЛАВА 1**

<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>426</b>
1.1. Равновесие между фазами .....	428
1.2. Материальный баланс процессов массообмена .....	429
1.3. Уравнение массопередачи .....	431
1.4. Процесс массообмена между фазами .....	433
1.5. Связь коэффициента массопередачи и коэффициентов массоотдачи ...	437
1.6. Массопередача с твердой фазой .....	437
1.7. Средняя движущая сила и методы расчета процессов массопередачи .	440

## **ГЛАВА 2**

<b>АБСОРБЦИЯ</b> .....	444
2.1. Физические основы процесса абсорбции .....	444
2.1.1. Равновесие между фазами .....	444
2.2. Устройство абсорберов .....	448
2.2.1. Поверхностные абсорберы .....	448
2.2.2. Пленочные абсорберы .....	449
2.2.3. Трубчатый абсорбер .....	449
2.2.4. Абсорбер с листовой насадкой .....	450
2.2.5. Насадочные абсорберы .....	450
2.2.6. Барботажные (тарельчатые) абсорберы .....	465
2.2.7. Распыливающие абсорберы .....	481
2.2.8. Эжекционные абсорберы .....	485
2.3. Расчет абсорберов .....	488
2.3.1. Расчет насадочных абсорберов .....	489
2.3.2. Расчет барботажных тарельчатых абсорберов .....	492
2.4. Десорбция.....	494
2.5. Схемы абсорбционных установок .....	495

## **ГЛАВА 3**

<b>ДИСТИЛЛЯЦИЯ</b> .....	497
3.1. Простая дистилляция .....	497
3.2. Дистилляция в токе водяного пара и инертных газов .....	500
3.3. Молекулярная дистилляция .....	501

## **ГЛАВА 4**

<b>РЕКТИФИКАЦИЯ</b> .....	502
4.1. Сущность процесса ректификации .....	502
4.2. Схемы ректификационных установок для разделения бинарных смесей .....	503
4.3. Материальный и тепловой балансы непрерывной ректификации бинарных смесей .....	506
4.4. Ректификация многокомпонентных смесей .....	512
4.5. Устройство ректификационных аппаратов .....	514
4.6. Специальные виды ректификации .....	517

## **ГЛАВА 5**

<b>ЖИДКОСТНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ И ЭКСТРАГИРОВАНИЕ</b> .....	522
5.1. Общая характеристика процесса .....	523
5.2. Методы экстракционного разделения .....	528

## **ГЛАВА 6**

<b>АДСОРБЦИЯ</b> .....	533
6.1. Общие сведения .....	533

6.2. Пористая структура адсорбентов .....	536
6.3. Основные виды пористых адсорбентов .....	538
6.4. Теплота адсорбции .....	549
6.5. Типы адсорбционных процессов и установок .....	550
<b>Литература к разделу 3 .....</b>	<b>559</b>

#### **РАЗДЕЛ 4**

##### **НЕКОТОРЫЕ ПРОЦЕССЫ СИНТЕЗА ЖИДКОСТЕЙ**

<b>ИЗ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ .....</b>	<b>561</b>
--------------------------------------	------------

<b>Литература к разделу 4 .....</b>	<b>593</b>
-------------------------------------	------------