

Е.П. Запорожец, Д.Г. Антониади, Г.К. Зиберт,  
И.М. Валиуллин, Е.Е. Запорожец, А.И. Гриценко,  
В.В. Ключко, О.В. Савенок

**РЕГУЛЯРНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ СБОРА,  
ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ  
НЕФТЯНЫХ  
И ПРИРОДНЫХ  
ГАЗОВ**

**Е.П. Запорожец, Д.Г. Антониади, Г.К. Зиберт,  
И.М. Валиуллин, Е.Е. Запорожец, А.И. Гриценко,  
В.В. Ключко, О.В. Савенок**

**РЕГУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ СБОРА,  
ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ  
НЕФТЯНЫХ И ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ**

*учебное пособие*

Краснодар  
2012

УДК 656.6(075.8)  
ББК 35.514я73  
Р 32

*Рецензент*

*Доктор технических наук, профессор Г.Г. Гилаев*

Р 32            **Регулярные процессы и оборудование в технологиях сбора, подготовки и переработки нефтяных и природных газов** : учебное пособие / Е.П. Запорожец, Д.Г. Антониади, Г.К. Зиберт и др.; ФГБОУ ВПО КубГТУ. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2012. – 620 с.

ISBN 978-5-91718-198-1

Книга предназначена для студентов технических вузов и специалистов газовой и нефтяной промышленности. В книге кратко представлены: свойства и инженерные методы расчетов параметров индивидуальных углеводородов и их смесей; гидрогазомеханических процессов и оборудования; тепловых и массообменных процессов; описаны некоторые процессы синтеза жидкости из углеводородных газов. Приведены пути повышения эффективности процессов и оборудования.

Настоящий том входит в серию книг под общим наименованием «Углеводородные природные и нефтяные газы». В этой серии излагаются знания, накопленные в ходе развития и становления газодобывающей и газоперерабатывающей подотрасли, сведения по особенностям технологий и техники добычи, сбора, подготовки и переработки углеводородных природных и нефтяных газов с получением моторных топлив.

ББК 35.514я73  
УДК 656.6(075.8)

ISBN 978-5-91718-198-1

- © Е.П. Запорожец, Д.Г. Антониади,  
Г.К. Зиберт, И.М. Валиуллин,  
Е.Е. Запорожец, А.И. Гриценко,  
В.В. Ключко, О.В. Савенок, 2012
- © ООО «Издательский Дом – Юг»,  
2012

## Содержание

<b>ЧАСТЬ 1.</b>	
<b>СВОЙСТВА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ СМЕСЕЙ .....</b>	<b>11</b>
<b>ГЛАВА 1.</b>	
<b>ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ И РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Идеальные газы .....	11
1.2 Реальные газы .....	13
<b>ГЛАВА 2.</b>	
<b>ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ, УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ СМЕСЕЙ .....</b>	<b>18</b>
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 Поверхностное натяжение .....	28
2.6 Вязкость .....	31
2.6.1 Вязкость индивидуальных жидкостей и их смесей .....	33
2.6.2 Вязкость газов и паров .....	36
2.7 Парахор, реохор, лиопарахор, ортохор .....	38
2.8 Факторы сжимаемости, ацентричности, характеристический .....	40
2.9 Температура кипения .....	43
2.10 Критические и псевдокритические температура, давление, молекулярный объем и фактор сжимаемости .....	44
2.11 Давление насыщенных паров .....	49
2.12 Фугитивность, активность, химический и термодинамический потенциалы .....	54
2.13 Теплоемкость, показатель адиабаты .....	62
2.14 Теплота испарения .....	68
2.15 Энтальпия .....	71
2.16 Теплопроводность .....	76
2.17 Параметры движения молекул в газах и жидкостях .....	87

2.18	Теплота сгорания топлива, теоретический и действительный расход воздуха, коэффициент избытка воздуха .....	92
2.19	Таблицы термодинамических параметров некоторых неуглеводородных газов и воды .....	94

### **ГЛАВА 3.**

#### **ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ**

<b>УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>113</b>
3.1 Система жидкость – пар в равновесных условиях .....	114
3.2 Система жидкость – пар в неравновесных условиях .....	116

### **ГЛАВА 4.**

#### **КРИСТАЛЛОГИДРАТЫ И ИХ СВОЙСТВА .....**

<b>4.1 Общие сведения .....</b>	<b>117</b>
4.2 Физико-химические параметры и механические свойства гидратов .....	138
4.2.1 Диэлектрические свойства .....	138
4.2.2 Механические свойства .....	141
4.3 Теплофизические свойства .....	143
4.3.1 Теплота образования (разложения) газовых гидратов .....	143
4.3.2 Теплоемкость гидратов .....	144
4.3.3 Теплопроводность гидратов .....	146

<b>Литература к части 1 .....</b>	<b>147</b>
-----------------------------------	------------

## **ЧАСТЬ II.**

### **РЕГУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ СБОРА, ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ И ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ .....**

<b>150</b>
------------

#### **РАЗДЕЛ 1.**

<b>ГИДРОГАЗОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>153</b>
---	------------

#### **ГЛАВА 1.**

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

<b>ГИДРОСТАТИКИ .....</b>	<b>153</b>
1.1 Уравнение гидростатики .....	153
1.2 Принцип сообщающихся сосудов .....	154
1.3 Некоторые практические приложения основного уравнения гидростатики .....	154

## **ГЛАВА 2.**

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

<b>ГИДРОДИНАМИКИ .....</b>	<b>156</b>
2.1 Характеристики движения жидкостей .....	156
2.1.1 Скорость и расход жидкости .....	156
2.1.2 Гидравлический радиус и эквивалентный диаметр .....	157
2.1.3 Установившийся и неустановившийся потоки .....	157
2.1.4 Режимы движения жидкости .....	158
2.1.5 Критерии гидрогазодинамического подобия .....	159
2.1.6 Уравнение Бернулли .....	160
2.1.7 Образование газожидкостных структур и сопротивления их движению по трубопроводам .....	160
2.2 Истечение жидкости через сопла и насадки .....	167
2.2.1 Расход жидкости через сопла лемнискатного и коноидального типов .....	167
2.2.2 Измерение расхода жидкости или газа с помощью трубки Пито-Прандтля .....	170
2.2.3 Измерение расхода жидкости или газа диафрагмой и соплами ..	171
2.3 Гидродинамическая кавитация .....	175
2.3.1 Общие сведения .....	175
2.3.2 Некоторые физические эффекты при кавитации .....	181
2.4 Гидравлический удар .....	185

## **ГЛАВА 3.**

<b>ГАЗОДИНАМИКА .....</b>	<b>188</b>
3.1 Основные расчетные уравнения газодинамики .....	188
3.2 Конденсация и кристаллизация в газовых потоках .....	190
3.2.1 Гомогенная спонтанная конденсация в однокомпонентном сверхзвуковом потоке .....	190
3.2.2 Гетерогенная конденсация в двухкомпонентном сверхзвуковом потоке .....	194
3.2.3 Конденсация в потоке многокомпонентного углеводородного газа .....	196
3.2.4 Кристаллизация твердой фазы в сверхзвуковых потоках .....	198

## **ГЛАВА 4.**

### **НАГНЕТАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ, КОМПРИМИРОВАНИЕ**

<b>И РАСШИРЕНИЕ ГАЗОВ .....</b>	<b>201</b>
4.1 Насосные установки .....	201
4.2 Вентиляторы, газодувки .....	206
4.3 Компрессоры .....	207
4.4 Детандеры .....	213
4.5 Монтежю .....	214

## **ГЛАВА 5.**

<b>СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И АППАРАТЫ .....</b>	<b>215</b>
5.1 Общие сведения об эжекционных течениях и струйных нагнетателях .....	215
5.2 Гидроприводные струйные компрессорные агрегаты .....	230
5.3 Создание вакуума .....	244
5.4 Вихревой эффект. Термотрансформатор Ранка-Хилша .....	244
5.5 Процесс энергоразделения в пульсационной струе .....	255
5.5.1 Пульсационные термотрансформаторы .....	260

## **ГЛАВА 6.**

<b>ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>268</b>
6.1 Осаждение тяжелой фазы под действием гравитационной силы ...	270
6.1.1 Свободное осаждение .....	270
6.1.2 Стесненное осаждение .....	278
6.1.3 Разделители .....	280
6.2 Очистка газа от жидкости под действием центробежных сил .....	285
6.3 Отделение дисперсной жидкости от газа под действием инерционных сил .....	298
6.3.1 Общие сведения .....	298
6.3.2 Сепараторы с насыпными слоями .....	304
6.3.3 Сетчатые сепараторы (демистеры) .....	307
6.3.4 Сепараторы жалюзийные .....	310
6.3.5 Сепараторы с регулярными насадками .....	313
6.3.6 Эффективность насадочных сепараторов .....	315
6.4 Фильтрование .....	318
6.4.1 Общие сведения .....	318
6.4.2 Очистка газа в капиллярных фильтрах .....	327
6.4.3 Электрокинетическое удаление жидкости из фильтров .....	331
6.5 Отделение больших масс жидкости от газа .....	335
6.5.1 Нестационарные процессы при поступлении большой массы жидкости из газопровода в емкость .....	336
6.5.2 Параметры динамического напора жидкостной пробки, поступающей в емкость аппарата из газопровода .....	337
6.5.3 Техника для улавливания больших масс жидкости, поступающих в виде пробок из газопровода .....	338
6.5.3.1 Схемы оборудования .....	338
6.5.3.2 Устройства, применяемые для уменьшения динамического напора жидкости .....	345
6.5.3.2.1 Сужающийся насадок .....	345
6.5.3.2.2 Сопло вентури .....	348
6.5.3.3 Рассекатель потока жидкости .....	351

<b>Литература к разделу 1 .....</b>	<b>354</b>
-------------------------------------	------------

**РАЗДЕЛ 2.**  
**ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ..... 367**

**ГЛАВА 1.**

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ..... 367**

- 1.1 Трубчатые теплообменники ..... 369
  - 1.1.1 Кожухотрубные теплообменники ..... 369
  - 1.1.2 Теплообменники труба в трубе ..... 374
  - 1.1.3 Оросительные теплообменники ..... 375
  - 1.1.5 Погружные теплообменники ..... 376
- 1.2 Пластинчатые теплообменники ..... 377
- 1.3 Спиральные теплообменники ..... 378
- 1.4 Теплообменники с поверхностью теплообмена,  
образованной стенками аппарата ..... 379
- 1.5 Теплообменники с ребренными поверхностями теплообмена ..... 380
- 1.6 Сравнение и выбор теплообменных аппаратов ..... 382

**ГЛАВА 2.**

**ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ФОРМУЛЫ**

**ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ ..... 386**

- 2.1 Тепловой баланс ..... 386
- 2.2 Уравнение теплопроводности ..... 387
- 2.3 Уравнение теплопередачи ..... 389
- 2.4 Тепловое подобие ..... 393
- 2.5 Теплоотдача ..... 396
  - 2.5.1 Конвективная теплоотдача ..... 396
    - 2.5.1.1 Теплоотдача при вынужденной конвекции ..... 396
    - 2.5.1.2 Теплоотдача при свободной конвекции ..... 398
    - 2.5.1.3 Теплоотдача при конденсации пара ..... 400
    - 2.5.1.4 Теплоотдача при кипении жидкости ..... 401
  - 2.5.2 Теплоотдача при непосредственном  
соприкосновении теплоносителей ..... 403
  - 2.5.3 Экспериментальные коэффициенты теплоотдачи ..... 403
- 2.6 Теплопередача при тепловом излучении твердых тел ..... 405
  - 2.6.1 Общие сведения ..... 405
  - 2.6.2 Закон Стефана-Больцмана ..... 405
  - 2.6.3 Закон Кирхгофа ..... 406
  - 2.6.4 Теплообмен лучеиспусканием между телами ..... 406
  - 2.6.5 Лучеиспускание газов ..... 407
  - 2.6.6 Совместная передача тепла конвекцией  
и лучеиспусканием ..... 409
- 2.7 Интенсификация теплообмена ..... 410
  - 2.7.1 Рациональная интенсификация теплообмена ..... 410
  - 2.7.2 Поверхность с регулярной шероховатостью ..... 411



2.7.3	Гидродинамика и теплопередача в винтообразно профилированных трубах .....	414
2.7.4	Теплоотдача и сопротивление в каналах с кольцевой накаткой .....	419
2.7.5	Механизм интенсификации теплоотдачи в профилированных каналах .....	422
2.7.6	Влияние интенсификации теплоотдачи на солеотложения в трубах .....	422
2.7.7	Особенности образования отложений на стенке с интенсификаторами теплосъема .....	423
<b>ГЛАВА 3.</b>		
<b>ХОЛОДИЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>		<b>424</b>
3.1	Дросселирование газов .....	424
3.2	Охлаждение газов при их расширении в детандере .....	428
3.3	Охлаждение испаряющейся жидкостью .....	429
3.4	Холодильные циклы, использующиеся при охлаждении и разделении нефтяных и природных газов .....	430
3.4.1	Холодильные циклы, основанные на использовании Джоуль-Томсоновского эффекта .....	430
3.4.2	Дроссельные холодильные циклы, основанные на испарении жидкости .....	431
3.4.3	Цикл, основанный на использовании изоэнтропийного расширения газа .....	432
3.4.4	Холодильный цикл на многокомпонентном холодильном агенте .....	433
3.5	Методы охлаждения газа в струйных аппаратах и установках ...	434
3.5.1	Теплогазодинамический сепаратор .....	434
3.5.2	Эжекторная холодильная установка .....	443
<b>Литература к разделу 2 .....</b>		<b>445</b>
<b>РАЗДЕЛ 3.</b>		
<b>МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....</b>		<b>448</b>
<b>ГЛАВА 1.</b>		
<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>		<b>448</b>
1.1	Равновесие между фазами .....	450
1.2	Материальный баланс процессов массообмена .....	451
1.3	Уравнение массопередачи .....	453
1.4	Процесс массообмена между фазами .....	455
1.5	Связь коэффициента массопередачи и коэффициентов массоотдачи .....	459

1.6	Массопередача с твердой фазой .....	459
1.7	Средняя движущая сила и методы расчета процессов массопередачи .....	462
<b>ГЛАВА 2.</b>		
<b>АБСОРБЦИЯ .....</b>		<b>467</b>
2.1	Физические основы процесса абсорбции .....	467
2.1.1	Равновесие между фазами .....	467
2.2	Устройство абсорберов .....	471
2.2.1	Поверхностные абсорберы .....	471
2.2.2	Пленочные абсорберы .....	471
2.2.3	Трубчатый абсорбер .....	472
2.2.4	Абсорбер с листовой насадкой .....	473
2.2.5	Насадочные абсорберы .....	473
2.2.6	Барботажные (тарельчатые) абсорберы .....	488
2.2.7	Распыливающие абсорберы .....	504
2.2.8	Эжекционные абсорберы .....	508
2.3	Расчет абсорберов .....	511
2.3.1	Расчет насадочных абсорберов .....	512
2.3.2	Расчет барботажных тарельчатых абсорберов .....	515
2.4	Десорбция .....	517
2.5	Схемы абсорбционных установок .....	518
<b>ГЛАВА 3.</b>		
<b>ДИСТИЛЛЯЦИЯ .....</b>		<b>520</b>
3.1	Простая дистилляция .....	520
3.2	Дистилляция в токе водяного пара и инертных газов .....	523
3.3	Молекулярная дистилляция .....	524
<b>ГЛАВА 4.</b>		
<b>РЕКТИФИКАЦИЯ .....</b>		<b>525</b>
4.1	Сущность процесса ректификации .....	525
4.2	Схемы ректификационных установок для разделения бинарных смесей .....	526
4.3	Материальный и тепловой балансы непрерывной ректификации бинарных смесей .....	530
4.4	Ректификация многокомпонентных смесей .....	535
4.5	Устройство ректификационных аппаратов .....	538
4.6	Специальные виды ректификации .....	540
<b>ГЛАВА 5.</b>		
<b>ЖИДКОСТНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ И ЭКСТРАГИРОВАНИЕ .....</b>		<b>546</b>
5.1	Общая характеристика процесса .....	546
5.2	Методы экстракционного разделения .....	552

<b>ГЛАВА 6.</b>	
<b>АДСОРБЦИЯ</b> .....	<b>557</b>
6.1 Общие сведения .....	557
6.2 Пористая структура адсорбентов .....	559
6.3 Основные виды пористых адсорбентов .....	562
6.4 Теплота адсорбции .....	573
6.5 Типы адсорбционных процессов и установок .....	574
<b>Литература к разделу 3</b> .....	<b>583</b>
<b>РАЗДЕЛ 4.</b>	
<b>НЕКОТОРЫЕ ПРОЦЕССЫ СИНТЕЗА ЖИДКОСТЕЙ</b>	
<b>ИЗ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ</b> .....	<b>585</b>
<b>Литература к разделу 4</b> .....	<b>617</b>