

УДК 60.011.665.6/7(075.8)  
ББК 33.36  
С44

**Книга выпущена при содействии ОАО "Газпром"**

Рецензенты:

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии Московской государственной академии тонкой химической технологии (МИТХТ) им. М.В. Ломоносова; д-р техн. наук проф. ё.ё. ёА10,

**Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А.**  
С44 Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии:  
Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. — 677 с: ил.  
ISBN 5-8365-0035-5

В третьем издании (2-е изд. — 1982 г.) изложены теоретические основы типовых процессов переработки нефти, газа и другого углеводородного сырья, принципиальное устройство и методы расчета аппаратов и машин, приведены современные и перспективные конструкции аппаратов ведущих российских производителей оборудования и ряда зарубежных фирм.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению "Оборудование и агрегаты нефтегазового производства". Книга будет полезна для широкого круга инженерно-технических работников предприятий, занимающихся разработкой и эксплуатацией оборудования нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

**ISBN 5-8365-0035-5**

© А.И. Скобло, Ю.К. Молоканов, А.И. Владимиров,  
В.А. Щелкунов, 2000  
© Оформление. ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000

# С Î ÄÅÐÆÀ Í ÈÀ

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Предисловие .....                                                                           | 3          |
| <b>Введение. Общие сведения по курсу "Процессы и аппараты" .....</b>                        | <b>5</b>   |
| Содержание курса и его назначение .....                                                     | 5          |
| Тенденции развития процессов нефтегазопереработки.....                                      | 6          |
| Классификация основных (типовых) процессов и аппаратов технологии нефтегазопереработки..... | 7          |
| Назначение расчета процессов и аппаратов и его содержание .....                             | 11         |
| Общие положения о составлении материальных и энергетических балансов.....                   | 13         |
| Роль теорий подобия и моделирования в современных условиях.....                             | 16         |
| ×ÀÇÒÛ ÎÄÄÀÆ. ÎÄÑÎÎÄÎÄÍÛÀ (ÆÈÒÒÓÇÍÛÀ) ÎÐÎÄÑÑÛ                                                | 19         |
| <b>Глава I. Основные понятия и законы массообмена .....</b>                                 | <b>19</b>  |
| Роль массообменных процессов в нефтегазопереработке и нефтехимии .....                      | 19         |
| Общие признаки массообменных процессов.....                                                 | 20         |
| Способы выражения состава фаз.....                                                          | 20         |
| Основные законы массообмена.....                                                            | 24         |
| Дифференциальные уравнения молекулярной и конвективной диффузии.....                        | 26         |
| Основное уравнение массопередачи.....                                                       | 30         |
| Определение коэффициента массопередачи через коэффициенты массоотдачи .....                 | 31         |
| Материальный баланс массообменного процесса.....                                            | 34         |
| Средняя движущая сила диффузионного процесса и число единиц переноса.....                   | 40         |
| Число теоретических тарелок.....                                                            | 43         |
| Подобие в процессах массообмена .....                                                       | 46         |
| Массообмен в системах с твердой фазой.....                                                  | 48         |
| <b>Глава II. Равновесные системы.....</b>                                                   | <b>50</b>  |
| Правило фаз и его применение к процессам массообмена.....                                   | 50         |
| Насыщенные и перегретые пары.....                                                           | 53         |
| Определение давления насыщенных паров индивидуальных веществ и нефтепродуктов .....         | 54         |
| Классификация двухкомпонентных смесей жидкостей.....                                        | 57         |
| Основные законы фазового равновесия .....                                                   | 58         |
| Равновесные составы фаз.....                                                                | 61         |
| Равновесие двухкомпонентных систем.....                                                     | 63         |
| Уравнение и кривая равновесия фаз бинарной смеси.....                                       | 66         |
| Изобарные температурные кривые.....                                                         | 68         |
| Энтальпийная диаграмма.....                                                                 | 69         |
| Расчет равновесных составов фаз при помощи констант фазового равновесия.....                | 71         |
| Равновесие при высоких давлениях.....                                                       | 72         |
| Равновесие двухкомпонентных систем, частично отклоняющихся от закона Рауля.....             | 73         |
| Равновесие взаимно растворимых двухкомпонентных систем, образующих азеотропные смеси.....   | 75         |
| Равновесие частично растворимых жидкостей.....                                              | 77         |
| Равновесие взаимно нерастворимых жидкостей.....                                             | 79         |
| Равновесие многокомпонентной смеси в присутствии водяного пара (инертного газа) .....       | 81         |
| <b>Глава III. Испарение и конденсация.....</b>                                              | <b>83</b>  |
| Сущность процессов испарения и конденсации.....                                             | 83         |
| Однократное испарение (конденсация) .....                                                   | 85         |
| Многократное испарение и конденсация.....                                                   | 93         |
| Постепенное испарение (конденсация).....                                                    | 97         |
| <b>Глава IV. Ректификация .....</b>                                                         | <b>101</b> |
| Сущность процесса ректификации двухкомпонентных смесей.....                                 | 101        |

|                                                                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Принципиальное устройство ректификационной колонны .....                                                             | 103        |
| Материальный баланс ректификационной колонны .....                                                                   | 105        |
| Уравнение рабочей линии.....                                                                                         | 107        |
| Расчет составов потоков в секции питания.....                                                                        | 113        |
| Минимальные потоки орошения и паров.....                                                                             | 116        |
| Тепловой баланс колонны.....                                                                                         | 117        |
| Построение рабочих линий на энтальпийной диаграмме .....                                                             | 120        |
| Влияние изменения потоков паров и флегмы по высоте колонны на рабочую линию ...                                      | 124        |
| Построение рабочей линии на диаграмме $x-y$ при помощи энтальпийной диаграммы .....                                  | 125        |
| Определение числа теоретических тарелок графическим методом на диаграмме $x-y$ .....                                 | 127        |
| Определение числа теоретических тарелок методом "от тарелки к тарелке" .....                                         | 132        |
| Графическое определение числа теоретических тарелок на энтальпийной диаграмме.....                                   | 134        |
| Аналитические методы расчета числа теоретических тарелок.....                                                        | 137        |
| Определение оптимального флегмового (парового) числа .....                                                           | 141        |
| Эффективность тарелки .....                                                                                          | 143        |
| Способы создания орошения в колонне.....                                                                             | 144        |
| Способы подвода тепла в низ колонны .....                                                                            | 149        |
| Влияние температуры вводимого сырья на работу ректификационной колонны.....                                          | 151        |
| Влияние давления на процесс ректификации.....                                                                        | 154        |
| Расчет температур в различных сечениях колонны.....                                                                  | 155        |
| Особенности работы ректификационной колонны с вводом водяного пара.....                                              | 158        |
| Ректификация многокомпонентных смесей.....                                                                           | 161        |
| Особенности расчета ректификации многокомпонентных смесей .....                                                      | 165        |
| Расчет режима полного орошения при ректификации многокомпонентных смесей .....                                       | 169        |
| Приближенный метод расчета ректификации многокомпонентных смесей при рабочем флегмовом числе .....                   | 173        |
| Аналитический расчет числа тарелок в колонне при ректификации многокомпонентной смеси.....                           | 175        |
| Особенности расчета сложной колонны для ректификации многокомпонентной смеси .....                                   | 178        |
| Особенности работы сложной колонны с промежуточным орошением.....                                                    | 181        |
| <b>Глава V. Азеотропная и экстрактивная ректификация.....</b>                                                        | <b>183</b> |
| Особенности ректификации близкокипящих и азеотропных смесей.....                                                     | 183        |
| Влияние концентрации разделяющего агента и температуры системы на величину коэффициента относительной летучести..... | 186        |
| Принципиальные схемы азеотропной и экстрактивной ректификации.....                                                   | 188        |
| <b>Глава VI. Абсорбция и десорбция.....</b>                                                                          | <b>191</b> |
| Физическая сущность процесса абсорбции.....                                                                          | 191        |
| Основное уравнение массопередачи при абсорбции.....                                                                  | 193        |
| Принципиальные схемы абсорбционных установок.....                                                                    | 194        |
| Материальный баланс абсорбера.....                                                                                   | 196        |
| Графический расчет числа теоретических тарелок в абсорбере.....                                                      | 200        |
| Тепловой баланс абсорбера.....                                                                                       | 201        |
| Графический расчет числа теоретических тарелок в десорбере .....                                                     | 202        |
| Тепловой баланс десорбера.....                                                                                       | 204        |
| Расчет процесса абсорбции многокомпонентной смеси .....                                                              | 205        |
| Расчет процесса десорбции многокомпонентной смеси.....                                                               | 209        |
| Осушка природных газов.....                                                                                          | 211        |
| Основные факторы, влияющие на процессы абсорбции и десорбции.....                                                    | 214        |
| Конструкции абсорберов .....                                                                                         | 215        |
| <b>Глава VII. Основные типы и расчет ректификационных и абсорбционных колонн.....</b>                                | <b>220</b> |
| Основы классификации аппаратов колонного типа .....                                                                  | 220        |
| Тарельчатые колонны .....                                                                                            | 221        |
| Гидравлический расчет тарелок с переливными устройствами.....                                                        | 238        |
| Гидравлический расчет тарелок провального типа .....                                                                 | 251        |
| Определение диаметра тарельчатых колонн.....                                                                         | 255        |
| Эффективность тарелок различных конструкций.....                                                                     | 258        |
| Насадочные колонны.....                                                                                              | 260        |
| <b>Глава VIII. Адсорбция.....</b>                                                                                    | <b>274</b> |
| Сущность процесса адсорбции.....                                                                                     | 274        |
| Характеристики адсорбентов.....                                                                                      | 276        |
| Изотерма адсорбции .....                                                                                             | 277        |
| Десорбция.....                                                                                                       | 279        |
| Расчет процесса адсорбции (десорбции).....                                                                           | 282        |
| Адсорберы .....                                                                                                      | 284        |
| Расчет основных размеров адсорбера (десорбера) .....                                                                 | 293        |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава IX. Экстракция</b> .....                                                         | 295 |
| Сущность процесса экстракции.....                                                         | 295 |
| Треугольные диаграммы.....                                                                | 297 |
| Основные свойства треугольной диаграммы.....                                              | 300 |
| Кривая равновесия фаз на треугольной диаграмме.....                                       | 303 |
| Основные методы осуществления экстракции.....                                             | 305 |
| Расчет однократной экстракции.....                                                        | 308 |
| Расчет многократной экстракции.....                                                       | 310 |
| Расчет противоточной экстракции.....                                                      | 312 |
| Расчет противоточной экстракции на диаграмме $x-y$ .....                                  | 316 |
| Экстракторы.....                                                                          | 319 |
| Расчет основных размеров экстракционных аппаратов.....                                    | 327 |
| <b>Глава X. Сушка</b> .....                                                               | 330 |
| Основные представления о сушке.....                                                       | 330 |
| Физические свойства влажного воздуха.....                                                 | 331 |
| Равновесная влажность и виды связи влаги с материалом.....                                | 332 |
| Материальный и тепловой балансы процесса сушки.....                                       | 333 |
| Диаграмма $H-x$ для влажного воздуха.....                                                 | 337 |
| Определение расхода воздуха и тепла на сушку по диаграмме $H-x$ .....                     | 339 |
| Кинетика газовой сушки.....                                                               | 343 |
| Конструкции газовых сушилок.....                                                          | 344 |
| Контактные сушилки.....                                                                   | 353 |
| ×ΑΝΘΥ ΑΟΙΔΑΒ. ΑΕΑΒΙ ΙΑΟΑΙΕ×ΑΝΕΕΑ ΙΒΙΟΑΝΝΟ.....                                            | 358 |
| <b>Глава XI. Характеристика дисперсных систем</b> .....                                   | 358 |
| <b>Глава XII. Отстаивание</b> .....                                                       | 360 |
| Скорость осаждения.....                                                                   | 360 |
| Производительность отстойников.....                                                       | 366 |
| Аппаратура для отстаивания.....                                                           | 367 |
| <b>Глава XIII. Фильтрование</b> .....                                                     | 373 |
| Виды фильтрующих перегородок и осадков.....                                               | 374 |
| Теоретические основы фильтрования.....                                                    | 375 |
| Фильтрование при постоянном перепаде давления.....                                        | 377 |
| Фильтрование при постоянной скорости.....                                                 | 378 |
| Промывка осадка на фильтре.....                                                           | 380 |
| Аппаратура для фильтрования.....                                                          | 381 |
| Схема расчета фильтров.....                                                               | 393 |
| Фильтрование газов.....                                                                   | 395 |
| <b>Глава XIV. Центробежное осаждение и центробежное фильтрование</b> .....                | 397 |
| Центробежная сила и фактор разделения.....                                                | 397 |
| Отстойное центрифугирование.....                                                          | 398 |
| Центробежное фильтрование.....                                                            | 402 |
| Конструкции центрифуг и сепараторов.....                                                  | 404 |
| Разделение неоднородных систем в циклонах.....                                            | 415 |
| <b>Глава XV. Электрическое осаждение</b> .....                                            | 421 |
| Электрические способы разделения нефтяных эмульсий.....                                   | 421 |
| Электрическая очистка газа.....                                                           | 425 |
| Расчет электрофильтров.....                                                               | 430 |
| <b>Глава XVI. Разделение газовых дисперсных систем</b> .....                              | 433 |
| <b>Глава XVII. Перемешивание жидкостей</b> .....                                          | 443 |
| Назначение и способы перемешивания.....                                                   | 443 |
| Механическое перемешивание.....                                                           | 443 |
| Барботажное перемешивание.....                                                            | 449 |
| Гидравлические способы перемешивания.....                                                 | 452 |
| <b>Глава XVIII. Гидродинамика слоя зернистых материалов</b> .....                         | 456 |
| Движение потока газа (паров или жидкости) через плотный слой зернистого материала.....    | 457 |
| Движение потока газа (паров или жидкости) через взвешенный слой зернистого материала..... | 462 |
| Режим пневмотранспорта.....                                                               | 468 |
| Гидродинамика стояков, затворов, распределительных решеток.....                           | 471 |

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ×ÀCÒÛ ÒÐÀÒÛ℄. İAÖAíÈ×AÑÈÈA İĐİÖAÑŇÛ                                                                | 479 |
| <b>Г л а в а XIX. Измельчение твердых материалов</b>                                               | 479 |
| Физические основы измельчения твердых материалов                                                   | 479 |
| Машины крупного дробления                                                                          | 483 |
| Машины среднего и мелкого дробления                                                                | 484 |
| Машины тонкого измельчения                                                                         | 488 |
| <b>Г л а в а XX. Классификация и дозирование твердых материалов</b>                                | 494 |
| Основные виды классификации зернистого материала                                                   | 494 |
| Классификаторы                                                                                     | 495 |
| Дозирование твердых материалов                                                                     | 501 |
| ×AÑÒÛ ×AÒÄAÐÒÄ℄. ÒAİÈİÄÛA İĐİÖAÑCÛ                                                                 | 504 |
| <b>Г л а в а XXI. Трубчатые печи</b>                                                               | 504 |
| Теплообмен в трубчатой печи                                                                        | 504 |
| Основные показатели работы трубчатых печей                                                         | 509 |
| Расчет процесса горения топлива                                                                    | 510 |
| Тепловой баланс                                                                                    | 513 |
| Полезная тепловая нагрузка печи и расход топлива                                                   | 515 |
| Поглощение тепла пучком радиантных труб                                                            | 515 |
| Основные типы печей                                                                                | 520 |
| Расчет радиантной поверхности                                                                      | 534 |
| Расчет конвекционной поверхности                                                                   | 545 |
| Утилизация тепла дымовых газов                                                                     | 548 |
| Гидравлический режим и расчет потери напора в трубчатом змеевике                                   | 552 |
| Газовое сопротивление и тяга                                                                       | 562 |
| <b>Г л а в а XXII. Теплообменные аппараты</b>                                                      | 565 |
| Классификация теплообменных аппаратов                                                              | 566 |
| Нагревающие и охлаждающие агенты                                                                   | 595 |
| Расчет поверхностных теплообменных аппаратов                                                       | 598 |
| Выбор и расчет системы регенерации тепла нефтеперерабатывающих установок                           | 607 |
| Особенности расчета конденсаторов-холодильников, пародистиллятных регенераторов и кристаллизаторов | 608 |
| Особенность расчета аппаратов воздушного охлаждения                                                | 614 |
| Гидравлический расчет теплообменных аппаратов                                                      | 616 |
| ×AÑÒÛ İVÒÄ℄. İĐİÖAÑŇÛ ÒÈİÈ×AÑÈİÉ İAÐAÐAAİÐÈÈ İAÖÖİİAİ ŇÛÐÛ℄                                        | 618 |
| <b>Г л а в а XXIII. Основные закономерности нефтехимических процессов</b>                          | 618 |
| Краткая характеристика важнейших химических процессов переработки нефтяного сырья                  | 618 |
| Основы классификации химических процессов и реакторов                                              | 620 |
| Тепловой эффект химической реакции                                                                 | 622 |
| Основы кинетики нефтехимических реакций. Определение реакционного объема                           | 624 |
| Особенности материального баланса химического процесса                                             | 629 |
| <b>Г л а в а XXIV. Реакционные аппараты</b>                                                        | 631 |
| Основные типы реакционных аппаратов                                                                | 631 |
| Схема расчета реакционных аппаратов                                                                | 653 |
| С п и с о к л и т е р а т у р ы                                                                    | 659 |
| П р е д м е т н ы й у к а з а т е л ь                                                              | 663 |

# ВВЕДЕНИЕ

---

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО КУРСУ "ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ"

### СОДЕРЖАНИЕ КУРСА И ЕГО НАЗНАЧЕНИЕ

Развитие нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности на современном этапе характеризуется значительным расширением ассортимента и повышением качества выпускаемой продукции, увеличением глубины переработки нефти, строительством наряду с установками большой единичной мощности модульных малотоннажных установок комплексной переработки нефти, газа и газового конденсата, позволяющих получать широкую гамму нефтепродуктов с учетом потребностей в них нефтегазодобывающих районов. Такие малогабаритные установки должны обеспечить не только первичную переработку путем физического разделения газонефтяного сырья, но и проведение вторичных процессов химической переработки с использованием высокоэффективных катализаторов.

Технологическое и аппаратное оформление промышленных процессов крайне многообразно. Во многих производственных процессах требуется разделять исходное сырье на составляющие компоненты, производить нагрев и охлаждение продуктов, осуществлять механическое разделение различных фаз системы. При этом одинаковые по своей физической природе процессы могут применяться на различных стадиях технологического процесса, обеспечивая получение продукции требуемых качества и свойств.

В ряде случаев для проведения различных процессов могут применяться однотипные аппараты и, наоборот, для однотипных по своей природе процессов могут использоваться различные по конструкции аппараты.

В отличие от химической технологии, занимающейся изучением последовательности и методов переработки природного или искусственного сырья в соответствующие продукты, в курсе «Процессы и аппараты» изучаются общие закономерности типовых процессов и аппаратура для их реализации вне зависимости от их места в конкретной технологической цепочке.

Это дает возможность эффективно совершенствовать технологию переработки на базе выбора наиболее рациональных для данных условий процессов и аппаратуры, а также их сочетаний.

Задачей данного курса является изучение: а) теоретических основ

типовых процессов нефтегазопереработки и нефтехимии; б) принципов устройства оборудования для осуществления этих процессов; в) основных методов расчета типовых процессов и аппаратов нефтегазопереработки и нефтехимии.

Знание указанных вопросов позволяет ориентироваться в том многообразии конкретных технологических процессов и аппаратуре, которое характерно для современной нефтегазопереработки и нефтехимии, и разрабатывать пути их совершенствования.

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ

Процессы переработки нефти и газа претерпели в своем развитии как качественные, так и количественные изменения, вытекающие из задач развития народного хозяйства нашей страны. В настоящее время в нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности широкое применение находят совмещенные процессы, для которых характерно использование многофункциональных аппаратов с одновременным протеканием стадий реакции, тепло- и массопереноса. Особенно актуально использование многофункциональных аппаратов в малогабаритных малотоннажных установках переработки углеводородного сырья для доведения показателей качества целевых продуктов до требований стандартов.

Чтобы увеличить глубину переработки нефти, необходимо повысить долю вторичных процессов, разработать и внедрить более эффективные катализаторы и прогрессивное оборудование. Для развития микробиологической промышленности необходимо организовать крупнотоннажное производство жидких парафинов.

Предусмотрено комплексное использование попутного нефтяного и природного газов с получением из них газового конденсата, серы, гелия и других ценных продуктов. Газовый конденсат, являющийся ценным углеводородным сырьем, в зависимости от фракционного и группового состава может быть переработан по варианту с преобладающим топливным профилем или по нефтехимическому профилю с получением сырья для нефтехимического синтеза.

Россия владеет примерно 40 % от мировых запасов природного газа, большая часть которых расположена в арктических и субарктических районах Сибири, поэтому преобразование газа в жидкое состояние или жидкое топливо непосредственно на месторождении позволит транспортировать его по более экономичной схеме.

Современное нефте- и газоперерабатывающее предприятие представляет собой комплекс мощных установок первичной переработки нефти и газа, каталитического крекинга, гидроочистки, риформинга, депарафинизации масел, производства битума и др., оснащенных современным оборудованием, поставляемым заводами химического и нефтяного машиностроения.

Производительность современных установок первичной переработки нефти достигла 8+9 млн. т/год и газа 5 млрд. м<sup>3</sup>/год. Существенно возросли мощности установок, осуществляющих вторичные процессы (вторичная перегонка бензинов, каталитический крекинг, пиролиз и др.).

Значительное расширение ассортимента нефтепродуктов и дальнейшее повышение требований к их качеству в связи с интенсивным развитием техники обусловили необходимость использования широкой гаммы процессов химической технологии при переработке нефти и газа; имеются в виду такие процессы, как ректификация, абсорбция, экстракция, адсорбция, сушка, отстаивание, фильтрование, центрифугирование и др., а также различные химические и каталитические процессы: пиролиз, каталитический крекинг, риформинг, гидроочистка и др. Это позволило ориентировать нефтегазопереработку на обеспечение народного хозяйства не только топливом, маслами и другими товарными продуктами, но и дешевым сырьем для химической и нефтехимической отраслей промышленности, производящих различные синтетические продукты: пластические массы, синтетические каучуки, химические волокна, спирты, синтетические масла и др.

Осуществление столь разнообразных процессов при переработке нефти и газа потребовало применения аппаратуры, работающей в широком интервале изменения рабочих параметров. Так, например, температуры могут составлять от  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кристаллизация в производстве масел) до  $800\div 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  (пиролиз), а давления — от глубокого вакуума (переработка тяжелых нефтяных остатков) до 150 МПа (производство полиэтилена).

Это предъявляет высокие требования к расчету аппаратуры и обоснованию рабочих параметров процесса.

#### КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ (ТИПОВЫХ) ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ТЕХНОЛОГИИ НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ

Основные или типовые процессы нефтегазопереработки рассмотрены главным образом с точки зрения их применения для разделения исходных смесей за счет обмена веществом и энергией.

В основу классификации основных процессов могут быть положены разные принципы, однако ввиду большого разнообразия этих процессов представляется наиболее целесообразным классифицировать их по способу создания движущей силы процесса.

В этой связи основные процессы химической технологии можно разделить на следующие классы.

**Массообменные или диффузионные процессы** связаны с переходом вещества из одной фазы в другую за счет диффузии. В процессах массообмена всегда участвуют две фазы, например, жидкая и паровая, жидкая и газообразная, две жидкие фазы, твердая и жидкая и т. д. К этому классу процессов относятся перегонка, ректификация, абсорбция, адсорбция, экстракция, сушка, кристаллизация и др.

Движущей силой массообменных процессов является разность концентраций или градиент концентраций между фактической концентрацией компонента в данной фазе и равновесной с другой фазой, а скорость процесса определяется законами массопередачи.

**Гидромеханические процессы** связаны с обработкой неоднородных систем — жидкостей и газов (паров), содержащих взвешенные в них твердые частицы или капли жидкости. К этим процессам относятся различные виды отстаивания (в поле силы тяжести, в центробежном поле, в



электрическом и магнитном полях), фильтрование, перемешивание, течение газа или жидкости через слой сыпучих материалов и др.

Движущей силой гидромеханических процессов является разность давлений или градиент давлений, обусловленные разностью плотностей обрабатываемых материалов или иными причинами. Скорость процесса определяется законами гидродинамики неоднородных систем.

**Механические процессы** связаны с обработкой твердых материалов. Сюда относятся процессы измельчения, рассева, транспортирования, дозирования, смешивания.

Движущей силой процесса является разность сил, давлений или градиент напряжения (сжатия, сдвига, растяжения). Скорость процесса определяется законами механики твердых тел.

**Тепловые процессы** связаны с передачей тепла от одного тела к другому. К ним относятся следующие основные процессы: нагревание, охлаждение, испарение, конденсация, плавление, затвердевание (кристаллизация).

Движущей силой тепловых процессов является разность температур или градиент температур, а скорость процесса определяется законами теплопередачи.

**Химические процессы** связаны с превращением обрабатываемых материалов, целью которого является получение новых соединений. К этому классу процессов относится группа термokatалитических процессов: каталитический крекинг, пиролиз, риформинг, гидроочистка и др.

Движущей силой процесса являются разности концентраций реагирующих веществ. Скорость процесса определяется законами химической кинетики.

В отличие от массообменных процессов, в которых составляющие части исходной системы, не изменяясь, переходят из одной фазы в другую, при химических процессах исходные компоненты (вещества) претерпевают коренные изменения, приводящие к появлению в системе новых веществ, свойства которых отличаются от свойств исходных веществ.

На рис. В-1 приведена схема классификации основных (типовых) процессов нефтегазопереработки и нефтехимии.

По тем же признакам можно классифицировать аппараты и машины для проведения типовых процессов. Схема такой классификации представлена на рис. В-2.

Во многих случаях в одном аппарате могут одновременно протекать несколько типовых процессов. Так, например, химический процесс сопровождается переносом массы и тепла, диффузионный процесс ректификации — теплообменом и т. п. Такое совместное протекание нескольких типовых процессов осложняет их изучение и разработку всесторонне обоснованной научной классификации. Поэтому в основу приведенной выше классификации аппаратов и машин положен основной процесс, определяющий назначение аппарата (машины).

По способу осуществления различных процессов во времени их подразделяют на *периодические* и *непрерывные*.

**Периодические процессы** характеризуются единством места проведения различных стадий процесса и в связи с этим неустановившимся состоянием во времени. Работа периодически действующих аппаратов проводится по определенным циклам, в течение которых осуществляются все стадии процесса. По окончании цикла аппарат разгружается; после его загрузки

ки новой порцией материалов весь производственный цикл повторяется. Нестационарность периодических процессов затрудняет их автоматизацию, усложняет эксплуатацию аппаратуры, усложняет конструкцию аппаратов и создание крупнотоннажных производств. Однако в целом ряде малотоннажных производств и опытных установок периодические процессы имеют широкое распространение.

**Непрерывные процессы** характеризуются единством времени проведения всех стадий процесса, каждая из которых осуществляется в специальном аппарате, благодаря чему непрерывные процессы характеризуются установившимся во времени режимом. При этом обеспечивается непрерывный подвод исходных материалов и вывод получаемых в результате процесса продуктов. Установившееся состояние понимается как среднестатистическое, так как неизбежны случайные колебания параметров процесса во времени.

Благодаря стационарности непрерывных процессов облегчается их автоматизация, упрощается конструкция аппаратов и их обслуживание, однако для одновременного проведения всех стадий процесса необходимо большое число аппаратов.

Современные крупнотоннажные производства нефтегазопереработки развиваются на основе непрерывных процессов.

## НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ И ЕГО СОДЕРЖАНИЕ

Расчет аппарата выполняется с целью обоснования его размеров, выбора оптимального режима работы, определения расходов (топливо, водяной пар, вода, электроэнергия, реагенты, катализаторы и пр.), выбора конструкции аппарата в целом и его отдельных узлов, а также их материального оформления.

Основными являются следующие три типа расчетов, выполняемых для процессов и аппаратов: технологический, гидравлический и механический.

**Технологический расчет.** При его проведении обосновываются рабочие параметры процесса (давление, температура и т.п.), определяются материальные и энергетические потоки и уточняются расходные нормы.

**Гидравлический расчет.** При его проведении определяются размеры рабочих сечений аппарата и перепады давления, обеспечивающие работу при полученных в технологическом расчете материальных и энергетических потоках рабочих сред.

**Механический расчет.** При его проведении обосновываются выбор материалов, конструкции элементов аппарата, толщины стенок и т.п., обеспечивающие безопасную, надежную и длительную эксплуатацию аппарата.

Необходимо отметить, что расчет процесса и аппарата, как правило, характеризуется различными вариантами рабочих параметров, потоков, конструктивного оформления и т.д. Это требует выполнения большого объема вычислительной работы, наиболее просто и быстро реализуемой с применением персональных ЭВМ. В результате сопоставления нескольких

вариантов может быть выбран оптимальный, в котором используется какой-либо критерий (минимальные удельные капитальные вложения, минимальные энергетические затраты, максимальный выход товарной продукции, минимальная удельная металлоемкость и т.п.). Выбор критерия оптимальности диктуется спецификой процесса, стоимостью его отдельных составляющих, наличием нужных материалов, хладагентов, теплоносителей и т.п.

Расчет процессов и аппаратов является одним из основных факторов, обеспечивающих выбор экономически целесообразных и технически оправданных условий работы оборудования.

При использовании стандартизированной аппаратуры проводится проверочный расчет, задачей которого является обоснование производительности аппарата и режима его работы на основе имеющихся размеров, а также выявление возможности использования данного стандартного аппарата при заданных рабочих условиях.

Приняты три стадии проектирования:

- проектное задание;
- технический проект;

- рабочие чертежи.

**В проектном задании** решаются основные принципиальные вопросы, определяются выбор технологической схемы процесса, набор основного оборудования. Расчеты выполняются по укрупненным показателям, позволяющим выбрать тип оборудования, его габариты, массу, энергетические и материальные затраты. Более подробные расчеты на этой стадии проектирования выполняются для оборудования нового типа.

**В техническом проекте** расчеты выполняются достаточно подробно, так чтобы на их основе можно было выполнить рабочие чертежи.

**В рабочих чертежах** разрабатывают подробную техническую документацию (чертежи, расчеты, макеты и т.п.), которая дает возможность изготовить необходимую технологическую оснастку, детали, узлы и аппарат в целом; эта документация позволяет осуществить конкретное материальное исполнение инженерных решений. При этом возможны коррективы технической документации, ранее принятой в техническом проекте.

Для расчета аппаратов необходимо задать производительность по сырью, полуфабрикатам или целевым продуктам, возможную продолжительность работы для аппарата непрерывного действия, продолжительность цикла работы и отдельных стадий для аппаратов периодического действия, выходы и качество получаемых продуктов или показатели, позволяющие определить их расчетом. В отдельных случаях задают рабочие параметры процесса (температуру, давление, время контакта и т.п.), проверяя их приемлемость при последующих расчетах.

В задании должны быть указаны как нормальные условия работы аппарата, так и возможные отклонения от них (максимальные и минимальные), особые условия и требования к ведению процесса, сведения о коррозионных и токсических свойствах перерабатываемых продуктов. При расчетах стандартизированных аппаратов обычно используют типовые методики.

На современном этапе развития техники и технологии проектирование машин и аппаратов нефтегазопереработки без применения САПР воспринимается как архаизм. Чертежи перспективной и конкурентноспособной продукции, выполненные вручную на кульмане, могут произвести от-

рицательное впечатление, перечеркнув надежды на сотрудничество и выгодные контракты.

В настоящее время применяются следующие системы САПР:

**CAD** — Computer aided design — инженерное программное обеспечение для проектирования и конструирования;

**CAM** — Computer aided manufacturing — общее название инженерного программного обеспечения для подготовки производства;

**CAE** — Computer aided engineering — программное обеспечение для проведения расчетов (прочность, динамика, акустика и др.).

К современным CAD системам можно отнести AutoCAD — электронный кульман, SolidWorks, а также российскую систему T-FLEX CAD, разработанную в "Станкине" совместно с АО "Топ Системы".

Одной из наиболее распространенной в мире и в России среди CAD/CAM систем является Pro/ENGINEER американской фирмы Parametric Technology Corporation, охватывающая весь цикл конструирования — производство в машиностроении. К этой же группе относится также российская система "КОМПАС", разработанная в АО "Аскон".

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ О СОСТАВЛЕНИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСАХ

Проведение любого процесса в химической технологии связано с использованием различных материалов и видов энергии, передаваемых главным образом в форме теплоты. Материальные балансы основаны на законе сохранения массы, а энергетические (тепловые) — на законе сохранения энергии.

И материальный, и энергетический балансы должны составляться как для процесса в целом, так и для отдельных его стадий.

Цель составления балансовых соотношений состоит в выявлении всех участвующих в процессе потоков вещества и энергии с учетом потерь и распределении их в соответствии с закономерностями процесса и типом применяемого аппарата (машины).

Принцип составления материальных (или энергетических) балансов заключается в том, что вводимые в систему потоки вещества (или энергии), составляющие приходные статьи баланса, должны равняться потокам вещества (или энергии), выводимым из системы, которые составляют расходные статьи баланса. В общем случае в расходные статьи баланса должны быть включены также потери вещества (или энергии).

Для неустановившегося процесса баланс составляется по принципу: разность между приходными и расходными статьями баланса равна изменению массы вещества (или количества энергии) в системе за данный отрезок времени. В частном случае отсутствия такого изменения получают материальный баланс установившегося процесса.

Материальный и энергетический (или тепловой) балансы могут быть составлены в виде уравнений, таблиц или схем с указанием соответствующих потоков вещества и энергии.

В табл. В-1 приведена одна из форм балансовых соотношений, а на рис. В-3 — схема потоков, используемых при составлении балансов.

В согласии с изложенными принципами можно записать следующие балансовые уравнения.

Для установившегося процесса:  
материальный баланс

Т а б л и ц а В-1

## Статьи материального и теплового балансов процесса (потоки см. рис. В-3)

| Поток и его условное обозначение | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Температура, °С | Энтальпия, кДж/кг | Поток массы, кг/с    | Поток тепла, Вт      |
|----------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| П р и х о д                      |                              |                 |                   |                      |                      |
| Нефть (н)                        | $\rho'_н$                    | $t'_н$          | $h'_н$            | $G'_н$               | $Q'_н$               |
| Горячая струя (г.с)              | $\rho'_{г.с}$                | $t'_{г.с}$      | $h'_{г.с}$        | $G'_{г.с}$           | $Q'_{г.с}$           |
| Хладагент (охл)                  | $\rho'_{охл}$                | $t'_{охл}$      | $h'_{охл}$        | $G'_{охл}$           | $Q'_{охл}$           |
| И т о г о                        |                              |                 |                   | $\sum_{i=1}^n G'_i$  | $\sum_{i=1}^n Q'_i$  |
| Р а с х о д                      |                              |                 |                   |                      |                      |
| Газ (г)                          | $\rho''_г$                   | $t''_г$         | $h''_г$           | $G''_г$              | $Q''_г$              |
| Бензин (б)                       | $\rho''_б$                   | $t''_б$         | $h''_б$           | $G''_б$              | $Q''_б$              |
| Нефть отбензиненная (н.о.)       | $\rho''_{н.о}$               | $t''_{н.о}$     | $h''_{н.о}$       | $G''_{н.о}$          | $Q''_{н.о}$          |
| Горячая струя (г.с.)             | $\rho''_{г.с}$               | $t''_{г.с}$     | $h''_{г.с}$       | $G''_{г.с}$          | $Q''_{г.с}$          |
| Хладагент (охл)                  | $\rho''_{охл}$               | $t''_{охл}$     | $h''_{охл}$       | $G''_{охл}$          | $Q''_{охл}$          |
| Потери (пот)                     | $\rho''_{пот}$               | $t''_{пот}$     | $h''_{пот}$       | $G''_{пот}$          | $Q''_{пот}$          |
| И т о г о                        |                              |                 |                   | $\sum_{i=1}^n G''_i$ | $\sum_{i=1}^n Q''_i$ |

$$\sum_{i=1}^n G'_i = \sum_{i=1}^n G''_i;$$

энергетический (тепловой) баланс

$$\sum_{i=1}^n Q'_i = \sum_{i=1}^n Q''_i;$$

для неустановившегося процесса:  
материальный баланс

$$\sum_{i=1}^n dG'_i - \sum_{i=1}^n dG''_i = dG;$$

энергетический (тепловой) баланс

$$\sum_{i=1}^n dQ'_i - \sum_{i=1}^n dQ''_i = dQ.$$

Анализ отдельных статей материального и энергетического (теплого) балансов позволяет выяснить их удельную роль в общих потоках вещества и энергии и выявить взаимосвязи потоков. При анализе действующего производства материальный и тепловой балансы позволяют определить размеры потерь и их источники, а также наметить пути их уменьшения.

Рис. В-3. Схема внешних потоков для составления материального и энергетического (теплового) балансов

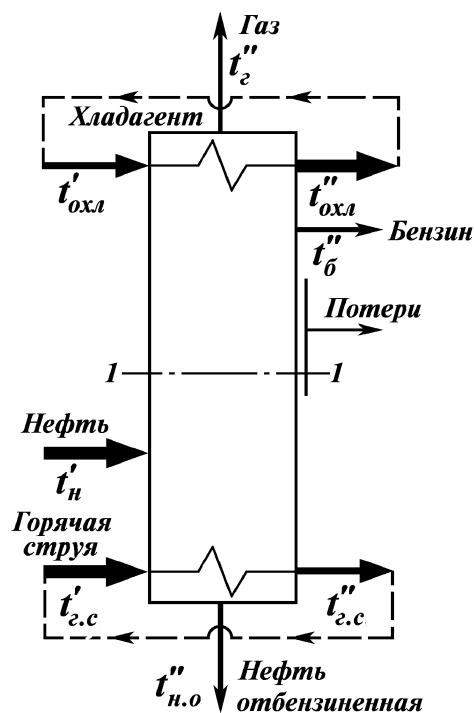
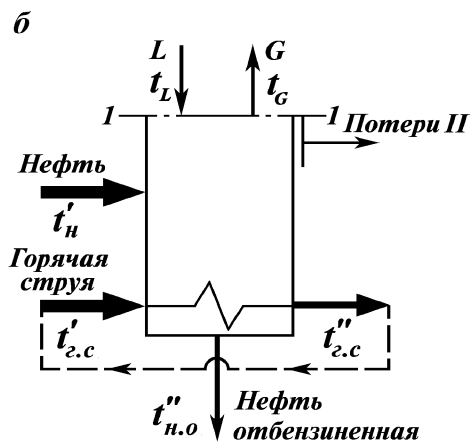
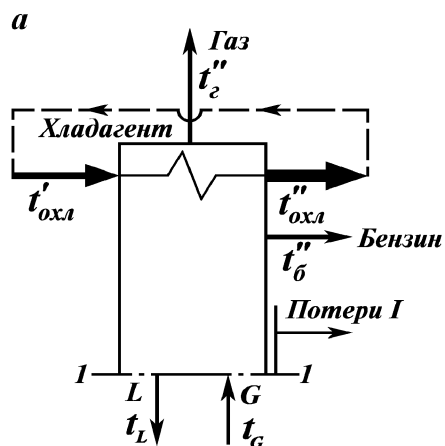


Рис. В-4. Схема для определения внутренних потоков:  
а — верхняя часть аппарата (выше сечения I—I); б — нижняя часть аппарата (ниже сечения I—I)



При составлении энергетических (или тепловых) балансов особое внимание следует обращать на переход одного вида энергии в другой, на изменение агрегатного состояния веществ, сопровождающегося выделением или поглощением тепла, тепловыми эффектами химических реакций и т.п.

Материальный баланс может быть составлен как по потокам массы в целом, так и по отдельным веществам (компонентам) или видам атомов, например, по углероду, водороду, сере и т.д.

Материальные и энергетические балансы, составленные для аппарата (процесса) в целом, позволяют рассчитать внешние потоки вещества и энергии, т.е. потоки, входящие в данную систему и покидающие ее.

Для расчета размеров аппарата (площади поперечного сечения, высоты, размеров внутренних устройств и т.п.) недостаточно знать только внешние потоки вещества и энергии, необходимо определить материальные и тепловые потоки в соответствующих сечениях внутри аппарата. По своей величине внутренние потоки могут значительно превосходить внешние, а кроме того, они могут претерпевать изменения по высоте аппарата (в различных его сечениях) вследствие изменения давлений, температур и теплофизических свойств веществ.

Схема, поясняющая определение внутренних потоков  $L$  и  $G$  в произвольном сечении аппарата, приведена на рис. В-4. Для определения указанных потоков мысленно разрезают аппарат в интересующем нас сечении  $1-1$  (см. рис. В-3) и отбрасывают одну из частей (см. рис. В-4, а, б). Действие отброшенной части на оставшуюся заменяют внутренними потоками. Затем для любого из двух вариантов, представленных на рис. В-4, записывают уравнения материального и энергетического балансов. Так, например, для части аппарата, находящейся выше сечения  $1-1$ , материальный и тепловой балансы будут выглядеть следующим образом:

материальный баланс

$$\sum_{i=1}^n G'_i + G = \sum_{i=1}^n dG'_i + L; \quad (B.1)$$

тепловой баланс

$$\sum_{i=1}^n Q'_i + GH_G = \sum_{i=1}^n dG'_i + Lh_L. \quad (B.2)$$

При известных энтальпиях внутренних потоков  $H_G$  и  $h_L$  из уравнений (B.1) и (B.2) можно определить внутренние потоки  $L$  и  $G$ .

Выполнив аналогичные расчеты для нескольких сечений аппарата, получим величины потоков в рабочей зоне аппарата, определяющие размеры его соответствующих сечений.

Необходимо подчеркнуть, что изменение величин внутренних потоков в разных сечениях аппарата можно выявить лишь при одновременном анализе уравнений материальных и тепловых балансов.

## РОЛЬ ТЕОРИЙ ПОДОБИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

При разработке промышленных аппаратов для проведения соответствующего процесса необходимо располагать основными закономерностями, определяющими размеры аппарата и его производительность при заданных требованиях к качеству получаемых продуктов.

Основой получения этих закономерностей является эксперимент, базирующийся на глубоком знании существенных сторон процесса. Оно позволяет осуществлять моделирование процессов и аппаратов при проведении экспериментов на установках сравнительно небольшого масштаба. Полученные данные, представленные в виде уравнений, графиков или таблиц, используют для расчетов промышленных аппаратов.

Современная теория моделирования может быть представлена в виде следующих трех разновидностей:

- физическое моделирование;
- гидравлическое моделирование;
- математическое моделирование.

**Физическое моделирование** заключается в исследовании основных закономерностей процесса на реальных рабочих системах и при рабочих параметрах, которые предполагается осуществить в промышленных условиях. Установка, на которой выполняют физическое моделирование, отличается от промышленной установки своими размерами и величинами потоков. Конструкции аппаратов также могут быть не похожими на промышленные. На модельной установке варьируют основные рабочие параметры процесса (температуры, давления, концентрации, скорости потоков и т.д.), чтобы выяснить связи между ними.

**Гидравлическое моделирование** осуществляется на специальных стендах, включающих фрагменты основных рабочих элементов аппарата в натуральную величину. В качестве рабочих сред используют модельные системы: воду, воздух, песок и т. п.

При гидравлическом моделировании выявляют закономерности, определяющие гидравлическое сопротивление и производительность аппарата для различных типов контактных устройств.

По данным физического и гидравлического моделирования, можно выбрать оптимальные условия процесса и размеры аппарата.

**Математическое моделирование** развилось в последние годы в связи с широким использованием персональных ЭВМ. Этот вид моделирования является ценным дополнением физического и гидравлического моделирования.

Под математическим моделированием понимается разработка и анализ систем уравнений процесса при соответствующих начальных и граничных условиях с целью выявления оптимальных условий проведения процесса или работы аппарата. Использование этого метода предполагает достаточно глубокое знание основных закономерностей процесса (работы аппарата).

Математическое моделирование распадается на следующие основные этапы:

- а) составление систем уравнений, начальных и граничных условий;
- б) анализ систем уравнений с применением ЭВМ (деформация модели);
- в) корректировка параметров уравнений модели на основе данных физического и гидравлического моделирования;
- г) проверка соответствия модели реальному объекту (проверка адекватности модели объекту) и внесение в случае необходимости корректив в модель.

Этап (б), связанный с деформацией модели, позволяет выявить, как те или иные переменные влияют на конечные показатели процесса (выход продуктов, степень конверсии сырья, чистоту продуктов и т.д.), и отобрать наиболее важные из них. Этот этап в какой-то мере дополняет физический эксперимент, но ни в коей мере не заменяет его.

После этапа деформации модели проведение физического и гидравлического моделирования — этап (в) — может быть выполнено более целенаправленно и при меньшем объеме экспериментов.



Поскольку математическое моделирование основывается на данных экспериментов, возникают этапы (в, г), требующие уточнения параметров уравнений модели, которые будут использованы при расчетах промышленных объектов. На этих этапах математического моделирования широко привлекаются данные, полученные на аналогичных укрупненных или промышленных установках.

Обработку экспериментальных данных с целью получения расчетных зависимостей выполняют с привлечением безразмерных критериев подобия, позволяющих применять уравнения для целого класса подобных процессов (аппаратов). Если уравнения модели достаточно хорошо разработаны и их форма удобна для расчетной инженерной практики, то параметры соответствующих уравнений определяют на основе экспериментальных данных.

В настоящее время пользователям персональных ЭВМ предлагаются различные программы для математического моделирования процессов и аппаратов нефтегазопереработки и нефтехимии. Большая часть предлагаемых программ включает как минимум три составляющих: "библиотеку" баз данных по свойствам индивидуальных компонентов, составленную Институтом по расчетам физических свойств (Design Institute for Physical Property Research) и (или) Американским институтом инженеров химиков (American Institute of Chemical Engineers) и др.; средства для обработки информации с применением одного или нескольких методов расчета; алгоритмы для синтеза данных по физическим свойствам, например с помощью метода регрессии.

Американская компания Simulation Sciences Inc. (Бри, шт. Калифорния) разработала несколько программ для инженерных расчетов в нефтеперерабатывающей, химической и газовой промышленности, среди которых можно выделить PRO/II для моделирования и оптимизации технологических процессов, HEXTRAN для моделирования систем теплообмена, INPLANT для расчета заводских трубопроводов, PROTESS для динамического моделирования и др. Программы компании Simulation Sciences Inc дополнены графическим интерфейсом PROvision на базе Microsoft Windows, облегчающем ввод и анализ данных по моделированию.

Интегрированный пакет программ под названием Hysys для статического и динамического моделирования разработала канадская фирма Huprotech Ltd. (Калгари, пров. Альберта). Вся система Hysys для повышения ее приспособляемости и универсальности была переписана на языке C++.

Можно отметить также пакет программ ChemCad III американской компании Chemstations Inc. (Хьюстон) и моделирующую программу Prosim компании Bryan Research & Engineering (Брайен, шт. Техас), разработанную в основном для нефтегазовой промышленности. Программа Prosim позволяет решать задачи, связанные с разделением сырой нефти и переработкой природного и нефтяного газа, например обезвоживания гликолями, выделения и фракционного разделения жидких нефтяных газов. Её аналог Tsweet предназначен специально для процессов очистки газов аминами.