

В. И. Игнатенков

ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: ТЕОРИЯ, ПРИМЕРЫ, ЗАДАЧИ

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

2-е издание

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по инженерно-техническим направлениям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 66.01(075.8)

ББК 35.10я73

И26

Автор:

Игнатенков Владимир Иванович — доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химической технологии факультета инженерной химии Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева.

Рецензенты:

Харлампиди Х. Э. — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химической технологии факультета нефти и нефтехимии института нефти, химии и нанотехнологий Казанского национального исследовательского технологического университета;

Беренгартен М. Г. — профессор Московского политехнического университета, лауреат Премии Правительства Российской Федерации.

Игнатенков, В. И.

И26 Общая химическая технология: теория, примеры, задачи : учеб. пособие для академического бакалавриата В. И. Игнатенков. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 195 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-09222-6

В учебном пособии представлены примеры и задачи, предназначенные для закрепления материала основных разделов курсов «Химические процессы и реакторы» и «Общая химическая технология» и практического освоения разнообразных расчетов, встречающихся в практике работ инженера-технолога. В соответствии с программой курсов «Химические процессы и реакторы» и «Общая химическая технология» данное пособие включает расчеты по разделам «Химические процессы», «Химические реакторы» и «Химико-технологические системы». Для удобства пользования пособием в каждой главе приведены краткие сведения о процессе, расчетные уравнения и формулы, примеры расчетов.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Учебное пособие предназначено для студентов химических и химико-технологических факультетов ВУЗов, а также будет полезно при изучении других курсов по химической технологии.

УДК 66.01(075.8)

ББК 35.10я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-09222-6

© Игнатенков В. И., 2005

© ООО «Издательство Юрайт», 2019

Оглавление

От автора.....	4
Условные обозначения	6
Глава 1. Химическая технология и основные технологические показатели химического производства.....	8
Глава 2. Физико-химические закономерности химических процессов	17
2.1. Стехиометрические закономерности в расчетах химических процессов	17
2.2. Термодинамические закономерности в расчетах химических процессов	33
2.3. Кинетика в расчетах химических процессов.....	40
2.4. Гетерогенные химические процессы	51
2.5. Гетерогенно-каталитический процесс.....	60
Глава 3. Химические реакторы	68
3.1. Расчет химического реактора и процесса, осуществляемого в изотермических условиях.....	68
3.2. Неизотермический процесс в химическом реакторе.....	94
Глава 4. Сравнение и выбор химических реакторов и их схем	105
4.1. Последовательные и параллельные схемы реакторов	105
4.2. Схемы реакторов с рециклом	121
4.3. Задачи на оптимальную себестоимость продукта	134
Глава 5. Материальный и тепловой балансы элементов химико-технологической системы и ХТС в целом	145
Глава 6. Примеры расчета материального и теплового балансов химического производства	162
Ответы.....	183
Использованная литература.....	193
Новые издания по дисциплине «Общая химическая технология» и смежным дисциплинам.....	194

От автора

Цель курса «Общая химическая технология: теория, примеры и задачи» — общее ознакомление с химическим производством, его структурой и компонентами и привитие знаний и навыков анализа и синтеза процессов в химическом производстве, в организации химико-технологических процессов в отдельных элементах химико-технологической системы ХТС в целом.

После изучения курса «Общая химическая технология» студент должен:

знать:

— основные принципы организации химического производства и его иерархической структуры, методы оценки эффективности производства;

— общие закономерности химических процессов;

— основы теории расчета процесса в химическом реакторе;

уметь:

— рассчитывать основные характеристики химического процесса, оценивать технологическую эффективность производства;

— произвести выбор реактора и произвести расчет технологических параметров для заданного процесса.

владеть

— методами анализа эффективности работы химических производств;

— методами расчета и анализа процессов в химических реакторах, определения технологических показателей, методами выбора химических реакторов.

Учебное пособие «Общая химическая технология: теория, примеры, задачи» предназначено для освоения теоретического материала, получения практических навыков решения задач по расчету химико-технологических процессов, расчету реакторов и их схем, расчету отдельных элементов химических производств и в целом химико-технологических систем. Пособие охватывает основные разделы учебных дисциплин «Химические процессы и реакторы» и «Общая химическая технология»: физико-химические основы химических процессов, химические процессы и реакторы, химико-технологические системы. Теория в данном учебном пособии изложена кратко и в основном касается только решения предложенного большого пакета задач, ответы на которые приведены в конце пособия. В соответствии с общей направленностью

курса основное внимание уделено расчетам процессов с химическими превращениями. Предлагается расчет основных технологических показателей производства с использованием данных по протекающим в нем химическим превращениям. Расчетный материал представлен последовательно «от частного к общему»: физико-химические закономерности химических процессов, расчет химического реактора и системы реакторов, материальный и тепловой балансы отдельных элементов ХТС и химического производства в целом. Исключение составляет раздел «Материальный и тепловой балансы химических производств» — в нем приведены только примеры технологического расчета конкретного производства, чтобы показать логику разных расчетов и форму их представления.

В основу пособия положен многолетний опыт преподавания в Российском химико-технологическом университете им. Д. И. Менделеева курсов «Химические процессы и реакторы» и «Общая химическая технология». Также использован опыт других высших учебных заведений и материалы отечественных и зарубежных изданий для подготовки контрольных заданий.

Автор благодарит сотрудников кафедры ОХТ РХТУ им. Д.И. Менделеева за оказанную помощь в подготовке материала пособия.

Условные обозначения

Ниже приведены обозначения основных и переменных параметров, которые используются в научной и технической литературе и, естественно в настоящем пособии, а также некоторые принятые обозначения.

- A, B, \dots, R, S — обозначения исходных веществ и продуктов реакции;
 $^{\circ}\text{C}$ — градус Цельсия;
 C_i — текущая концентрация i -го вещества, моль/л;
 $C_{i,0}$ — начальная концентрация i -го вещества, моль/л;
 C_p — удельная теплоемкость: мольная Дж/(моль \cdot К); массовая Дж/(кг \cdot К); объемная Дж/(м³ \cdot К).
 D — коэффициент диффузии, м²/с; диаметр, м;
 E_i — выход i -го продукта;
 E — энергия активации, Дж/моль;
 F — сечение реактора; общая поверхность теплообмена, м²;
 H — энтальпия, Дж/моль; высота аппарата, м;
 k — константа скорости реакции, константа скорости превращения;
 K — градус Кельвина;
 K_p, K_c — константа равновесия;
 K_m — константа массопередачи, м/с;
 K_T — константа теплопередачи, Дж/(м² \cdot с \cdot К);
 n — порядок реакции;
 N_i — количество i -го вещества, моль; мольный поток, моль/с;
 P — общее давление, Па;
 p_i — парциальное давление i -го компонента в газе, Па;
 Q, q — тепловой поток, Дж/с;
 Q_p — тепловой эффект реакции, КДж/моль;
 R — газовая постоянная Дж/(моль \cdot К), радиус твердой частицы, м;
 r — скорость реакции по маршруту;
 S_i — селективность процесса по продукту, поверхность контакта фаз, м²;
 S'_i — дифференциальная селективность по i -му продукту;
 T — температура, К;
 v_p — объем реактора, катализатора, л;
 V_0 — начальный объемный поток, л/с;
 $W_i(C)$ — скорость превращения i -го вещества, моль / | (л \cdot с);
 $W_n(C)$ — наблюдаемая скорость превращения;
 x — степень превращения;

β — коэффициент массоотдачи, м/с; степень абсорбции;

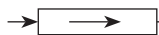
ν_i — стехиометрический коэффициент i -го компонента;

τ — условное время пребывания;

η — степень использования внутренней поверхности пористого катализатора;



→ — реактор идеального смешения;



→ — реактор идеального вытеснения.

Глава 1

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Химическая технология — прикладная наука о способах и процессах переработки сырья в продукты с участием различных физико-химических превращений.

Химическая технология как наука изучает химическое производство, то есть способы и процессы переработки исходных веществ в необходимые продукты и ее цель создание целесообразных способов производства.

Техническое совершенство процесса или производства определяется его техническими показателями.

Производительность или мощность производства P определяет количество продукта, вырабатываемого в единицу времени, и обычно имеет размерность «тонн/сутки» или «тыс. тонн/год» или «кг/ч».

Химическое производство работает 300—330 суток в году, т. е. за исключением времени на планово-предупредительные ремонты и возможные аварийные остановки. Таким образом,

$$P \text{ [т/сут]} \approx 0,3 P \text{ [тыс.т/год]}.$$

При расчете часовой производительности принимают, что производство работает 8000 часов в году, т. е.

$$P \text{ [т/час]} = P \text{ [тыс.т/год]} / 8000.$$

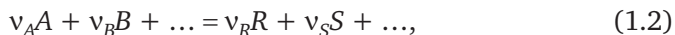
Расходный коэффициент K определяет расходы сырья, воды, топлива, электроэнергии, пара на тонну произведенной продукции:

$$K = G_{\text{исх}} / G_{\text{продукта}} \quad (1.1)$$

где $G_{\text{исх}}$ — затраты сырья, топлива, энергии при производстве продукта в количестве G .

Расходные коэффициенты могут иметь размерность «тонн сырья на тонну продукта», «м³ газа на тонну продукта», «кВт электроэнергии на тонну продукта» и т. д. Расходный коэффициент отражает эффективность данной технологии по ресурсо- и энергосбережению и по сырью. Часто является определяющим показателем эффективности процесса.

Теоретический расходный коэффициент K_T учитывает стехиометрические соотношения по которым происходит превращение исходных веществ в целевой продукт. Для этого используют брутто-реакцию стехиометрических уравнений химического превращения исходного сырья в конечный продукт



которые показывают в каких соотношениях вещества вступают в химическое взаимодействие друг с другом и какое количество продукта образуется. Если превратилось N_A молей вещества A , то расходуется $N_A \cdot (v_B / v_A)$ молей вещества B и образуется $N_A \cdot (v_R / v_A)$ молей продукта R и $N_A \cdot (v_S / v_A)$ молей продукта S .

Практический расходный коэффициент учитывает производственные потери на всех стадиях процесса, а также побочные реакции, если они имеют место.

Эффективностью производства может служить отношение теоретического расходного коэффициента по сырью к практическому расходному коэффициенту.

Выход продукта E от теоретической величины является показателем совершенства процесса и показывает отношение количества полученного продукта G к его теоретическому количеству $G_{\text{теор}}$, которое могло бы быть получено из этого же количества сырья при идеальной организации процесса

$$E = G / G_{\text{теор}} \text{ или } E_R = N_A \rightarrow R / N_{A0}. \quad (1.3)$$

Величину $G_{\text{теор}}$ определяют или из равновесного превращения исходного вещества при условиях процесса или по полному превращению исходного сырья в продукт (исключается образование побочных продуктов).

В определении выхода продукта и в определении практического расходного коэффициента учитывается неполнота превращения исходного вещества, образование побочных продуктов и производственные потери исходного вещества.

О размерностях величин в расчетах ХТС

Подготовка данных — важнейший этап вычислений, от которых зависит достоверность конечных результатов. Размерность используемых величин должна быть проверена на их «совместимость» в балансовых уравнениях — исходную информацию получают из разных источников с данными различной размерности. Материальный баланс, чаще всего, рассчитывают на расходы веществ в час, причем количества измеряют в кг, т, м³, молях. Для материального баланса удобно использовать размерность потоков в массовых величинах (кг/ч, г/мин, т/ч и т. д.). Показатели химической реакции традиционно используют измерения в молях. Задаваемые концентрации могут иметь, например,

размерности [%] или [доля], но «доля» бывает весовая, молярная или объемная. Численно они различаются.

Есть основной способ проверки правильности использования размерностей: подставить в балансовое уравнение на место используемых величин их размерности. Если все в порядке, то все слагаемые уравнения должны получиться одинаковой размерности. В противном случае в каждый член уравнения надо вводить пересчетные коэффициенты:

десятичные приставки (кило-, деци-, милли- и др.);

единицы измерения (тонна-килограмм, год-час-секунда);

в виде физических и физико-химических констант (плотность ρ [г/л], молекулярная масса M [г/моль], молярный объем 22,4 [л/(г · моль)], стехиометрический коэффициент ν [моль] и др.). Они имеются в справочной литературе.

Безразмерные величины следует подставлять в их первоначальной размерности: вместо [доля] — [л/л] или [кг/кг].

Указывать в размерности фазовое состояние: [моль/л_г · град] или [кг/л_ж · град] (индексы г, ж относятся к газовой и жидкой фазам).

Обозначать в размерностях наименование компонента: ν [моль R], M_A [г/моль A] и т. д.

Вероятность ошибок значительно уменьшится, а несоответствие размерностей — распространенная ошибка в вычислениях.

Точность вычислений

Расчеты всегда сопровождаются ошибками вычислений. Причин здесь несколько. Во-первых, любая арифметическая операция ограничена разрядностью чисел, с которыми проводятся вычисления. Вычислительная машина (компьютер или калькулятор) оперируют с числами ограниченной (хотя и большой) разрядности. Обозначим Δ_i — точность представления i -го числа и $\Delta_{\text{арифм}}$ — суммарная точность арифметических операций. Тогда

$$\Delta_{\text{арифм}} = \sum \Delta_i$$

(отметим, что при сложении и вычитании суммируются значения абсолютных погрешностей, а при умножении и делении — относительных погрешностей).

Во-вторых, некоторые вычисления связаны с решением уравнений численным методом (например, нахождение корней нелинейных и трансцендентных уравнений). Алгоритм таких решений всегда связан с точностью решения — $\Delta_{\text{алг}}$. В третьих, результаты вычислений обычно округляют, т. е. фиксируются с некоторой точностью (например, четыре значащих цифры или два знака после запятой). Далее полученные результаты служат для дальнейших вычислений (например, суммирование количества всех веществ при расчете материального баланса). Возникает ошибка округления — $\Delta_{\text{окр}}$ (по сути она аналогична $\Delta_{\text{арифм}}$). Ошибка округления проявляется наиболее часто как человеческий фактор.

Приведем простой пример

Имеется 100 кг вещества *A*. Две трети его превратилось в вещество *B*. Округляя до трех значащих цифр, получим $100 \cdot (2 / 3) \approx 66,7$ кг *B*. Затем две трети *B* превратилось в вещество *C*. Опять фиксируя три значащих цифры, получим $66,7 \cdot (2/3) \approx 44,5$ кг *C*. Прямой расчет с конечным округлением: $100 \cdot (2 / 3) \cdot (2 / 3) \approx 44,4$ кг *C* — дал иную цифру. Из-за округления промежуточного результата образовалась относительная ошибка расчета 0,2%, хотя точность представления первого результата вследствие его округления составила всего 0,05% (66,7 — округленный результат и 66,6666... — точный).

Суммарная ошибка конечного расчета

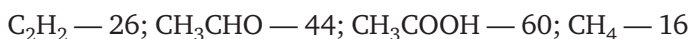
$$\Delta = \Delta_{\text{арифм}} + \Delta_{\text{алг}} + \Delta_{\text{окр}}.$$

Расчет материального баланса предполагает равенство масс входящих и выходящих потоков. Из-за ошибки вычислений и округлений промежуточных результатов расчетный баланс может не выполняться. Это будет отмечено в некоторых дальнейших примерах.

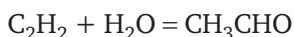
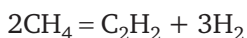
Примеры расчета

Пример 1.1

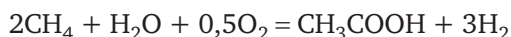
Рассчитать расходный коэффициент по природному газу, содержащему 97% (об.) метана, в производстве уксусной кислоты из ацетальдегида. Выход ацетилена $E_{\text{ац}}$ из метана составляет 15%, выход ацетальдегида из ацетилена $E_{\text{ацд}} = 60\%$, а выход уксусной кислоты из ацетальдегида $E_{\text{ук}} = 90\%$. Молекулярные массы веществ



Уксусную кислоту получают многостадийным методом при последовательном протекании следующих реакций:



Теоретический расход метана на $G_{\text{ук}} = 1$ т уксусной кислоты, рассчитанный по брутто-реакции



составит

$$K_{\text{CH}_4, \text{теор}} = \frac{G_{\text{ук}} \cdot \nu_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{CH}_4}}{\nu_{\text{ук}} \cdot M_{\text{ук}}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 16}{1 \cdot 60} = 0,534 \text{ т метана/т укс. кислоты.}$$

Находим практический расход метана (расходный коэффициент по метану K_{CH_4}) с учетом значений выходов по стадиям:

$$K_{\text{CH}_4, \text{прак}} = \frac{K_{\text{CH}_4, \text{твор}}}{E_{\text{ац}} \cdot E_{\text{альд}} \cdot E_{\text{ук}}} = \frac{0,534}{0,15 \cdot 0,6 \cdot 0,90} = 6,59 \text{ т метана/т укс. кислоты}$$

или

$$\frac{6,59 \cdot 1000 \cdot 22,4}{M_{\text{CH}_4}} = 9226 \text{ м}^3 \text{ метана/т укс. кислоты.}$$

С учетом содержания метана в природном газе находим расходные коэффициенты природного газа:

$$K_{\text{пр.газа}} = \frac{K_{\text{CH}_4, \text{прак}}}{C_{\text{CH}_4}} = \frac{6,59}{0,97} = 6,79 \text{ т пр. газа / т укс. кислоты}$$

или 9511 м³ пр.газа / т. укс. кислоты.

Пример 1.2

Рассчитать расходные коэффициенты по сере и воде в производстве 1000 кг/ч 92,5% серной кислоты. Содержание диоксида серы в обжиговом газе равно 8,0% (об.). Степень окисления диоксида серы составляет 0,99. Степень абсорбции триоксида серы равна 99,9%.

Цепочка превращений серы в серную кислоту



Считается, что сера сгорает полностью, потери серы на стадии ее окисления до диоксида серы и на стадии абсорбции триоксида серы.

Необходимое количество серы рассчитываем по формуле

$$G_{\text{S}} = \frac{\Pi \cdot C_{\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot M_{\text{MSO}_2}}{M_{\text{MH}_2\text{SO}_4} \cdot x_{\text{SO}_2} \cdot \beta_{\text{SO}_3}} = \frac{1000 \cdot 0,925 \cdot 32}{98 \cdot 0,99 \cdot 0,999} = 305,4 \text{ кг.}$$

Рассчитываем расходный коэффициент по сере:

$$K_{\text{S}} = 305,4 / 925 = 0,33 \text{ кг S/кг H}_2\text{SO}_4.$$

Рассчитываем расходный коэффициент по воде.

Вода расходуется на образование моногидрата серной кислоты и на ее разбавление. На образование одного моля моногидрата серной кислоты требуется один моль воды:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = 925 \cdot 18 / 98 + 1000 \cdot 0,075 = 244,9 \text{ кг;}$$

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = 244,9 / 1000 = 0,2449 \text{ кг H}_2\text{O / кг разб. H}_2\text{SO}_4.$$

Задачи

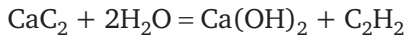
1-1. Рассчитать необходимое количество 68% H_2SO_4 для разложения 100 кг апатитового концентрата, содержащего 39% P_2O_5 .

Реакция разложения

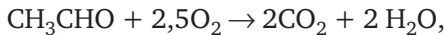
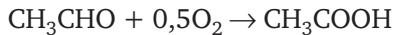


1-2. Рассчитать расходные коэффициенты по аммиаку и воде в производстве 1400 кг/ч 63% азотной кислоты. Концентрация аммиака в аммиачно-воздушной среде равна 8,6% (об.), концентрация паров воды 3,5% (об.). Выход оксида азота при окислении аммиака равен 95%, степень окисления аммиака равна 100%, а степень абсорбции диоксида азота равна 99,9%. Аммиак окисляется полностью.

1-3. Определить расходный коэффициент по техническому карбиду кальция в производстве 1000 м³ ацетилена. Содержание CaC_2 в техническом продукте 83%, а степень превращения CaC_2 в производстве равна 0,88.



1-4. Рассчитать теоретический и практический расходные коэффициенты технического ацетальдегида, содержащего 98% ацетальдегида для получения 1 тонны уксусной кислоты в процессе окисления ацетальдегида по реакции



если выход кислоты по альдегиду составляет 80,0%.

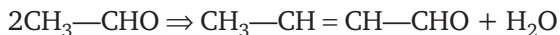
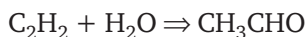
1-5. Рассчитать теоретический и практический расходные коэффициенты по сере и расходный коэффициент по воде в производстве 2500 кг/ч 98% серной кислоты, если степень окисления диоксида серы равна 99%, а степень абсорбции триоксида серы равна 99,5%.

1-6. Рассчитать теоретический и практический расходные коэффициенты по аммиаку и воде в производстве 2000 кг/ч 61% азотной кислоты, если выход диоксида азота при полном окислении аммиака равен 0,97, а степень абсорбции диоксида азота равна 99,5%. Концентрация аммиака в аммиачно-воздушной среде равна 8% (об.). Парциальное давление паров воды в воздухе равно $4,2 \cdot 10^3$ Па.

1-7. Рассчитать расход аммиака и воздуха на 1 т моногидрата HNO_3 , если степень окисления NH_3 в NO равна 0,96, общая степень превращения аммиака равна 1, а степень абсорбции оксидов азота равна 0,98. Содержание аммиака в аммиачно-воздушном потоке равно 8,5% объемных.

Брутто-реакция синтеза аммиака $\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 = \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

1-8. При проведении двух последовательных реакций первого порядка гидратации ацетилен и дегидратации ацетальдегида



из 1,5 моль ацетилен и 3 моля водяного пара получено 0,6 моль ацетальдегида и 0,045 моль кротонового альдегида. Рассчитать степень превращения ацетилен и селективность ацетальдегида.

1-9. Рассчитать расходный коэффициент природного газа, содержащего 97% (об.) метана, в производстве 1000 кг уксусной кислоты из ацетальдегида. Выход ацетилен из метана составляет 15%, выход ацетальдегида из ацетилен 68%, а выход уксусной кислоты из ацетальдегида равен 86%.

1-10. Рассчитать теоретический и фактический расходные коэффициенты производства бензола методом паро-фазовой дегидрогенизации циклогексана.

Химическая схема процесса



В реактор подается 100 кг/ч циклогексана. Степень превращения циклогексана равна 90%. Выход бензола равен 55%.

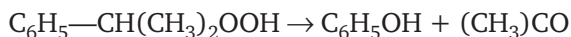
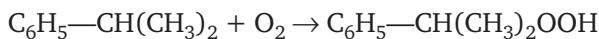
1-11. Рассчитать расходные коэффициенты по сере и воде в производстве 3000 кг/ч 92,5% серной кислоты. Содержание диоксида серы в обжиговом газе равно 8,0% (об.). Степень окисления диоксида серы составляет 0,995. Степень абсорбции триоксида серы равна 99,9%. Рассчитать также концентрацию диоксида серы и триоксида серы в выходящем газовом потоке.

1-12. Рассчитать количество серы, воды для получения 1500 кг/ч 98,2% серной кислоты. Сера окисляется полностью. Содержание сернистого ангидрида в обжиговом газе равно 8% (об.) Степень окисления сернистого ангидрида равна 0,98, а степень абсорбции сернистого ангидрида равна 99,9%.

1-13. Рассчитать количество аммиака, воды и воздуха в производстве 2000 кг/ч 61% азотной кислоты. Содержание аммиака в аммиачно-воздушном потоке равно 7,5% объемных. Степень окисления аммиака равна 100%. Выход диоксида азота при окислении аммиака равен 0,97. Степень абсорбции диоксида азота равна 0,99. Концентрация паров воды в воздухе равна 3,8% (об.).

1-14. Рассчитать расходные коэффициенты по бензолу и пропанпропиленовой фракции газов крекинга, содержащих 30% (об.) пропилен и 70% (об.) пропана для производства 1000 кг фенола. Получение фенола из бензола и пропилен состоит из трех стадий:





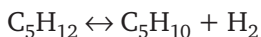
Выход изопропилбензола из бензола составляет 90%, а выход фенола из изопропилбензола — 93%.

Молекулярные массы: бензола — 78, пропилена — 42, фенола — 94.

1-15. Рассчитать расходные коэффициенты по сере и воде в производстве 1000 кг/ч 98,5% серной кислоты. Содержание диоксида серы в обжиговом газе равно 7,6% (об.). Степень окисления диоксида серы составляет 0,98. Степень абсорбции триоксида серы равна 99,9%.

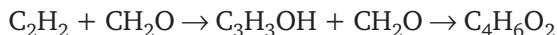
1-16. Рассчитать расходные коэффициенты по сырью в производстве 1 тонны фосфата аммония $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$. Фосфорная кислота имеет концентрацию 58% , а аммиак содержит 2% влаги.

1-17. Рассчитать теоретический и практический коэффициенты 97% изопентана в производстве 1 т изопрена. Процесс каталитического дегидрирования изопентана осуществляется по реакциям



Выход изоамилена составляет 73%, а изопрена — 65% от теоретического.

1-18. Взаимодействие ацетилен с формальдегидом дает промежуточный продукт — пропаргиловый спирт, а затем бутиндиол-1,4 по схеме



Степень превращения по ацетилену составляет 0,98. Селективность по пропаргиловому спирту 0,4. Рассчитать необходимое количество ацетилен и формальдегида для получения 360 кг пропаргилового спирта в час.

1-19. Протекает обратимая реакция $A + 2B \rightleftharpoons 2R + S$. Начальные количества веществ, кмоль: $N_{A0} = 10$, $N_{B0} = 25$. Конечное значение $N_R = 12$ кмоль. В равновесной смеси $N_A = 2,5$ кмоль. Определить степень превращения вещества A и выход продукта R по компоненту A .

1-20. Определить производительность и мощность колонны синтеза аммиака объемом 4 м³, если объемный расход азотно-водородной смеси составляет 30 000 м³/ч. Равновесная степень превращения реагентов, взятых в стехиометрическом соотношении 0,26, а выход аммиака 0,8.

1-21. При дегидратации этилового спирта



степень превращения спирта составила 0,8. Найти состав полученной смеси и выход продукта, если исходное количество спирта 10 молей.

1-22. Рассчитать расход аммиака и воздуха на 1 т моногидрата HNO_3 , если степень окисления NH_3 в NO равна 0,96, общая степень превращения аммиака равна 1, а степень абсорбции оксидов азота равна 0,98. Содержание аммиака в аммиачно-воздушном потоке равно 8,5% (об.).
Брутто-реакция синтеза аммиака $\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 = \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Глава 2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Стехиометрические закономерности в расчетах химических процессов

Стехиометрическое уравнение показывает, в каком соотношении реагенты вступают в реакцию друг с другом, и имеет вид

$$v_A A + v_B B = v_R R + v_S S. \quad (2.1)$$

Продукты реакции R , S образуются также в соответствии с их стехиометрическими коэффициентами.

Отметим, что стехиометрическое уравнение — балансовое, и может не отражать механизм химических превращений.

В соответствии со стехиометрическим уравнением соотношение между реагентами и продуктами реакции имеет вид

$$\frac{N_{A0} - N_A}{v_A} = \frac{N_{B0} - N_B}{v_B} = \frac{N_R - N_{R0}}{v_R} = \frac{N_S - N_{S0}}{v_S}, \quad (2.2)$$

здесь $(N_{A0} - N_A)$, $(N_{B0} - N_B)$ — количества превратившихся веществ A и B ; $(N_R - N_{R0})$ и $(N_S - N_{S0})$ — количества образовавшихся продуктов R и S .

Уравнение (2.1.) удобно представить в форме алгебраической суммы

$$\sum_i v_i A_i = 0, \quad (2.3)$$

где A_i — обозначения веществ, вступивших или образовавшихся в реакции; v_i — стехиометрические коэффициенты, причем $v_i < 0$ для исходных веществ и $v_i > 0$ для продуктов.

Тогда

$$\frac{N_i - N_{i0}}{v_i} = \text{const}, \quad (2.4)$$

где N_i и N_{i0} — количество i -го вещества до и после превращения.

Если превращение описывается одним стехиометрическим уравнением, такую реакцию в химической технологии реакцию называют *простой*.

Если превращение описывается несколькими стехиометрическими уравнениями и происходит образование целевого и побочных продуктов, то такая реакция называется *сложной*.

Наличие стехиометрической количественной связи между компонентами реакции позволяет рассчитать состав реакционной смеси в процессе химического превращения. Таким образом, стехиометрические уравнения служат основой для составления материального баланса, а на этой основе — расчета теплового баланса и основных технологических показателей.

Для расчета материального баланса необходимо использовать только *стехиометрически независимые* уравнения, т. е. такую систему уравнений, в которой ни одно из них не может быть получено линейной комбинацией других.

Базисная система стехиометрических уравнений, однозначно и полно описывающая процесс, должна содержать число стехиометрически независимых уравнений, равное

для окислительно-восстановительных реакций:

$$U = B - \Xi, \quad (2.5)$$

для обменных реакций:

$$U = B - \Xi + 1, \quad (2.6)$$

где U — число уравнений в базисной системе; B — число веществ (участников химического превращения); Ξ — число химических элементов, из которых состоят вещества.

Поскольку число уравнений U меньше числа веществ B , то связь между количествами всех веществ определяется через степень превращения одного из исходных веществ — *ключевого компонента*, который находится в недостатке. Одним из основных показателей химического процесса является степень превращения ключевого элемента.

Степень превращения вещества — это отношение количества превращенного вещества к его первоначальному количеству:

$$x_A = \frac{N_{A0} - N_A}{N_{A0}}. \quad (2.7)$$

Используя определение степени превращения (2.7) и соотношение (2.2) между количествами превращенных компонентов, получим уравнение для расчета степени превращения и количества другого вещества в реакционной смеси при протекании простой реакции:

$$\frac{N_{i0} \cdot x_i}{v_i} = \frac{N_{A0} \cdot x_A}{v_A} \quad (2.8)$$

или

$$x_i = \frac{N_{A0}}{N_{i0}} \cdot \frac{v_i}{v_A} x_A.$$

Концентрация вещества C_i в мольных долях определяется уравнением

$$C_i = N_i / \Sigma N_i, \quad (2.9)$$

где ΣN_i — суммарное количество молей всех веществ, включая инерты (не участвующие в реакции).

Для простой газофазной реакции типа $\nu_A A + \nu_B B = \nu_R R + \nu_S S$

$$N_i = \Sigma N_{i0} - \Delta \nu / \nu_A \cdot N_{A0} x_A; \quad (2.10)$$

$$C_i = \frac{C_{i0} - \frac{\nu_i}{\nu_A} C_{A0} x_A}{1 - \frac{\Delta \nu}{\nu_A} C_{A0} x_A}, \quad (2.11)$$

где $\Delta \nu = \Sigma \nu_i = \nu_R + \nu_S - \nu_A - \nu_B$ — изменение числа молей веществ в реакции.

Степень превращения из уравнения (2.11)

$$x_A = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0} \left(1 + \frac{\Delta \nu}{\nu_A} C_A\right)}. \quad (2.12)$$

Если реакция протекает без изменения объема реакционной смеси или не происходит изменения общего числа молей реагирующих веществ, то степень превращения можно выразить через концентрации

$$x_A = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}}, \quad (2.13)$$

откуда

$$C_A = C_{A0} (1 - x_A); \quad (2.14)$$

$$C_i = C_{i0} - \Delta \nu / \nu_A \cdot C_{A0} x_A, \quad (2.15)$$

где C_{A0} , C_A — начальная и текущая концентрации вещества A; C_{i0} , C_i — начальная и текущая концентрации i -го вещества.

Для количественной характеристики реакционной смеси используют различные способы выражения концентраций (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Способы выражения концентраций

	N	C_i	n_i	C	γ_i	g_i	γ	P_i
N	1	$C_i V$	$C_i n_i V$	$C_i n_i V$	$\gamma V / M_i$	$\gamma g_i V / M_i$	$\gamma g_i V / M_i$	$P_i V / RT$
C_i	N / V	1	$C_i n_i$	$C_i n_i$	γ_i / M_i	$\gamma g_i / M_i$	$\gamma g_i / M_i$	P_i / RT