

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Расчет материального баланса в химической технологии: реактор

Казань

2014

УДК 614.841.12 (076.5)

А89

Ахметова, Р.Т. Расчёт материального баланса химического реактора : метод. указания для выполнения практической работы по дисциплине «Промышленная экология» / Р.Т. Ахметова, В.Ю. Осипова. – Казань : КГАСУ, 2014. – 21 с.

Методические указания включают теоретическую часть по теме работы и примеры расчета материального баланса реактора. В конце указаний приводятся варианты заданий для самостоятельной подготовки.

Методические указания предназначены для выполнения практической работы по дисциплине «Промышленная экология» для студентов специальности 280002 «Техносферная безопасность».

Рекомендованы к изданию Редакционно-издательским советом КГАСУ

Рецензент: д.т.н., профессор кафедры ТНВМ Казанского национального исследовательского университета Ахметов Т.Г.

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2014

© Ахметова Р.Т., Осипова В.Ю.,
2014

Введение

Для экологической оценки производственного процесса, образования газообразных веществ или отходов и побочных продуктов очень часто бывает необходимо произвести расчет материального баланса того или иного аппарата. Основным аппаратом многих технологических процессов является реактор.

Химический реактор – автоматизированный аппарат для проведения химических реакций объемом от нескольких миллилитров до десятков кубометров. Основное назначение химических реакторов – обеспечение полностью автоматизированного, безопасного, структурированного и четкого контроля химических превращений. Целью его функционирования является получение заданного количества вещества определенного качества при достижении высокой эффективности функционирования, создании необходимых условий проведения процессов, обеспечении устойчивости и стабильности режимов при низких энергетических затратах, низкой материалоемкости аппарата, соответствия требованиям промышленной экологии и эстетики.

Во время химической реакции можно производить нагрев, охлаждение, повышать или понижать давление, регулировать скорость подачи компонентов химической реакции, автоматически контролировать изменение состояния реагентов. Показателями эффективности функционирования химического реактора является степень превращения исходных веществ, выход целевого продукта, селективность, производительность и интенсивность.

Цель практической работы – научиться проводить расчёт материального баланса химического реактора для выяснения степени экологичности производства, контроля возможных выделений газообразных соединений.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы расчётов материального баланса для химического реактора.
2. Изучить пример расчёта материального баланса проточного реактора на почасовую производительность.
3. Выяснить исходные данные к выполнению практической работе и осуществить расчёт материального баланса химического реактора по индивидуальному заданию.
5. Определить погрешность расчёта материального баланса химического реактора на почасовую производительность.

Теоретические основы расчёта материального баланса

Аппаратурный состав любой технологической системы рассчитывают на основе уравнений материального баланса, являющихся конкретным выражением закона сохранения массы, который гласит, что масса всех веществ, вступивших в реакцию равна массе всех продуктов реакции. Обычно материальный баланс составляют в расчете на единицу массы 100% - го готового продукта. Различают теоретический и практический материальные балансы. Теоретический материальный баланс рассчитывают на основе стехиометрических уравнений реакции и известных молекулярных масс реагирующих компонентов. Практический материальный баланс составляют с учетом состава сырья и целевого продукта; при этом учитывают необходимые избытки некоторых компонентов, а также допустимые потери сырья, промежуточных и конечных продуктов, которые неизбежны при периодическом способе организации технологических процессов. Средние значения потерь составляют при фильтровании 1-2%, при сушке 1-10%, при размоле, дроблении и смешении 0,5%, при выпаривании, дистилляции, ректификации 5-15%, при фасовке и упаковке 0,5%.

Существенная особенность технологических систем периодического действия состоит в многостадийности процессов и их многооперационности. В процессе смены операций, протекающих в одном и том же аппарате, в общем случае изменяется объем находящейся в нем реакционной массы (могут добавляться реагенты, инертные растворители, может удаляться часть содержимого аппарата). Поэтому расчет оборудования на основе интегрированного материального баланса, составляемого для стадии в целом, часто приводит к завышенным размерам аппаратов. Более правильно составлять материальный баланс для каждой операции и выделять ту из них, которой соответствует максимальный объем реакционной массы. В общем виде уравнение материального баланса принято записывать в виде:

$$\sum GN = \sum GK, \quad (1)$$

где GN и GK – массы компонентов начальной и конечной систем, соответственно.

Большинство технологических стадий процессов синтеза продуктов химических производств реализуется в аппаратах периодического действия, и представляют собой упорядоченные последовательности технологических и организационных мероприятий. В процессе смены операций количество массы, находящейся в аппарате (например, реакторе), может меняться, поэтому материальный баланс составляется для каждой операции в отдельности.

В основе составления материального баланса химического реактора также лежит закон сохранения массы вещества. При составлении материального баланса химического реактора непрерывного действия (или

проточного реактора) наиболее часто используют материальный баланс на почасовую производительность по одному из участников химического превращения.

Для более полного представления количественных характеристик рассматриваемого процесса и удобства расчёта помимо массовых потоков веществ в таблицах материальных балансов представляют объёмные и мольные потоки вещества, которые соотносятся между собой следующим образом:

$$G = V \cdot \rho, \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³;
 G – массовый поток вещества, кг/ч;
 V – объёмный поток вещества, м³/ч.

$$G = N \cdot MM, \quad (3)$$

где N – мольный поток вещества, кмоль/ч;
 MM – молярная масса вещества, кг/кмоль.

Согласно определению, моль – это количество вещества, содержащее такое же количество структурных единиц (атомов, молекул и т.д.), которое содержится в 12 граммах изотопа С12. Следовательно, масса моля вещества численно равна его молекулярной массе.

$$V = N \cdot 22,4 \quad (4)$$

где 22,4 м³/кмоль – величина молярного объёма для газов.

Для характеристики состава исходной и конечной смесей веществ используют понятие концентрации. Наиболее распространённой формой выражения состава газовой смеси является объёмная доля вещества. Для смеси из нескольких веществ с известными величинами объёмных потоков и известным суммарным объёмным потоком, объёмная доля i -го вещества

$$Z_i = V_i / V_{\text{сум}}, \quad (5)$$

Где Z_i – объёмная доля i -го вещества;
 V_i – объёмный поток i -го вещества, м³/ч;
 $V_{\text{сум}}$ – суммарный объёмный поток вещества, м³/ч.
Сумма всех объёмных долей компонентов равна единице.

Производительность по каждому конкретному веществу рассчитывается как

разность между конечным и начальным потоками вещества. Например, мольная производительность

$$NR_i = NK_i - NN_i, \quad (6)$$

где NR_i – мольная производительность по i -му веществу, кмоль/ч;
 NN_i – мольный поток i -го вещества на входе в реактор, кмоль/ч;
 NK_i – мольный поток i -го вещества на выходе из реактора, кмоль/ч.

Объёмная производительность рассчитывается

$$VR_i = VK_i - VN_i, \quad (7)$$

где VR_i – по i -му веществу, м³/ч;

VN_i – объёмный поток i -го вещества на входе в реактор, м³/ч;

VK_i – объёмный поток i -го вещества на выходе из реактора, м³/ч.

Массовая производительность равна

$$GR_i = GK_i - GN_i, \quad (8)$$

где GR_i – массовая производительность по i -му веществу, кг/ч;

GN_i – массовый поток i -го вещества на входе в реактор, кг/ч;

GK_i – массовый поток i -го вещества на выходе из реактора, кг/ч.

Следует обратить внимание, что производительность для продуктов реакции – величина положительная, а для исходных веществ – отрицательная.

Степень превращения – это отношение количества вещества, вступившего в реакцию к начальному количеству вещества:

$$X_i = -VR_i / VN_i, \quad (9)$$

$$X_i = -NR_i / NN_i, \quad (10)$$

$$X_i = -GR_i / GN_i, \quad (11)$$

где X_i – степень превращения i -го исходного реагента, доли.

Пример решения задачи по расчету материального баланса реактора

Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными
2. Расход исходной газовой смеси 50000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,12; кислород 0,1; остальное – азот.

Степень превращения диоксида серы – 0,9.

Решение:



1. Расчёт объёмной доли азота на входе в реактор

$$ZN(N_2) = 1 - 0.12 - 0.1 = 0.78$$

2. Расчёт объёмных потоков

$$VN(SO_2) = 50000 \cdot 0.12 = 6000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$VN(O_2) = 50000 \cdot 0.1 = 5000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$VN(N_2) = 50000 \cdot (1 - 0.12 - 0.1) = 39000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3. Расчёт мольных потоков веществ на входе в реактор

$$NN(SO_2) = 6000 / 22,4 = 267,9 \text{ кмоль/ч}$$

$$NN(O_2) = 5000 / 22,4 = 223,2 \text{ кмоль/ч}$$

$$NN(N_2) = 39000 / 22,4 = 1741,1 \text{ кмоль/ч}$$

4. Расчёт массовых потоков веществ на входе в реактор

$$GN(SO_2) = 267,9 \cdot 64 = 17145,6 \text{ кг/ч}$$

$$GN(O_2) = 223,2 \cdot 32 = 7142,4 \text{ кг/ч}$$

$$GN(N_2) = 1741,1 \cdot 28 = 48751 \text{ кг/ч}$$

$$GN_{\text{сум}} = 17145,6 + 7142,4 + 48751 = 73039 \text{ кг/ч},$$

где 64, 32 и 28 кг/кмоль – молярные массы диоксида серы, кислорода и азота соответственно.

5. Расчёт производительности по диоксиду серы

$$VR(SO_2) = -6000 \cdot 0,9 = -5400 \text{ м}^3/\text{ч}$$

6. Расчёт производительности по диоксиду серы согласно формуле



Следовательно, на каждые два моля диоксида серы расходуется один моль кислорода и образуется два моля триоксида серы

$$VR(O_2) = -5400 \cdot 1/2 = -2700 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$VR(SO_3) = -(-5400) \cdot 2/2 = 5400 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Суммарное изменение объёма реакционной смеси

$$VR_{\text{сум}} = -5400 - 2700 + 5400 = -2700 \text{ м}^3/\text{ч}$$

7. Расчёт конечных объёмных потоков компонентов

$$VK(SO_2) = 6000 - 5400 = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$VK(O_2) = 5000 - 2700 = 2300 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$VK(SO_3) = 0 + 5400 = 5400 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Триоксид серы в исходной смеси отсутствовал, поэтому он принят равным нулю.

$$VK(N_2) = 0 + 39000 = 39000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Азот в реакции участия не принимает, поэтому его производительность равна нулю.

$$VK_{\text{сум}} = 600 + 2300 + 5400 + 39000 = 47300 \text{ м}^3/\text{ч}$$

8. Расчёт мольных потоков веществ на выходе из реактора

$$NK(SO_2) = 600 / 22,4 = 26,9 \text{ кмоль}/\text{ч}$$

$$NK(O_2) = 2300 / 22,4 = 102,7 \text{ кмоль}/\text{ч}$$

$$NK(SO_3) = 5400 / 22,4 = 241,1 \text{ кмоль}/\text{ч}$$

$$NKN(N_2) = 39000 / 22,4 = 1741,1 \text{ кмоль}/\text{ч}$$

9. Расчёт массовых потоков на выходе из реактора

$$GK(SO_2) = 26,9 \cdot 64 = 1721,6 \text{ кг}/\text{ч}$$

$$GK(O_2) = 102,7 \cdot 32 = 3286,4 \text{ кг}/\text{ч}$$

$$GK(SO_3) = 241,1 \cdot 80 = 19288 \text{ кг}/\text{ч}$$

$$GK(N_2) = 1741,1 \cdot 28 = 48751 \text{ кг}/\text{ч}$$

$$GK_{\text{сум}} = 1721,6 + 3286,4 + 19288 + 48751 = 73047 \text{ кг}/\text{ч},$$

где 64, 32, 80, и 28 кг/кмоль – молярные массы диоксида серы, кислорода, триоксида серы и азота соответственно.

10. Расчёт состава конечной смеси по формуле

$$ZK(SO_2) = 600 / 47300 = 0,013$$

$$ZK(O_2) = 2300 / 47300 = 0,049$$

$$ZK(SO_3) = 5400 / 47300 = 0,11$$

$$ZK(N_2) = 39000 / 47300 = 0,83$$

Сумма объёмных долей компонентов в конечной смеси

$$0,013 + 0,049 + 0,11 + 0,83 = 1,002 \approx 1$$

Результаты расчёта подставим в таблицу 1.

Таблица 1. Сводная таблица материального баланса реактора

Вещество	Исходная смесь				Конечная смесь				Производительность, м3/ч
	кг	м3/ч	кмоль	доля	кг	м3/ч	кмоль	доля	
SO2	17145,6	6000	267,9	0,12	1721,6	600	26,9	0,013	-5400
O2	7142,4	5000	223,2	0,1	3286,4	2300	102,7	0,049	-2700
SO3	0	0	0	0	19288	5400	241,1	0,11	5400
N2	48751	39000	1741,1	0,78	48751	39000	1741,1	0,83	0
Σ	73039	50000	2232,2	1,0	73047	47300	2111,8	1,002	-2700

Погрешность расчёта составляет

$$8/73047 \times 100 \% = 0,011\%$$

Варианты выполнения практической работы

Задача 1. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 40000 м³/ч.
3. Состав исходной газовой смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,13; кислород 0,1; остальное – азот.
4. Степень превращения диоксида серы – 0,9.

Задача 2. Составить материальный баланс реактора для окисления азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход кислорода 6500 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксид азота – 0,12; остальное – сухой воздух: кислород 0,21, азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,97.

Задача 3. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Производительность по триоксиду серы 8000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,1; кислород 0,1; триоксид серы – 0,01; остальное – азот.
4. Степень превращения диоксида серы – 0,92.

Задача 4. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.

2. Начальный расход монооксида углерода 2500 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; кислород 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,9.

Задача 5. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 22000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,1; кислород 0,12; остальное – азот.
4. Степень превращения диоксида серы – 0,88.

Задача 6. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход кислорода 5000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,06; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 7. Составить материальный баланс реактора для окисления оксида азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 20000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксид азота – 0,12; диоксид азота – 0,01; остальное – сухой воздух (объёмные доли): кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,85.

Задача 8. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Производительность по диоксиду углерода 1500 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 9. Составить материальный баланс реактора для окисления оксида азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход оксида азота 5000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксида азота – 0,1; остальное – сухой воздух : кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,95.

Задача 10. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 25000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 11. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход кислорода 4000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,06; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 12. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Производительность по диоксиду углерода 1300 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 13. Составить материальный баланс реактора для окисления оксида азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 25000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксид азота – 0,12; диоксид азота – 0,01; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,9.

Задача 14. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 50000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,12; кислород – 0,1; остальное – азот.
4. Степень превращения диоксида серы – 0,95.

Задача 15. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход кислорода 3000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,06; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 16. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходно газовой смеси 15000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения монооксида углерода – 0,95.

Задача 17. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 25000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,12; кислород – 0,1; остальное – азот.
4. Степень превращения оксида азота – 0,95.

Задача 18. Составить материальный баланс реактора для окисления оксида азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 25000 м³/ч.

3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксид азота – 0,12; диоксид азота – 0,01; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,88.

Задача 19. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход кислорода 25000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,06; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,9.

Задача 20. Составить материальный баланс реактора для окисления оксида азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Начальный расход кислорода 3500 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксид азота – 0,12; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,94.

Задача 21. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Производительность по триоксиду серы 6500 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,1; кислород – 0,1; триоксид серы – 0,01; остальное – азот.
4. Степень превращения оксида азота – 0,94.

Задача 22. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Производительность по диоксиду углерода 1500 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,92.

Задача 23. Составить материальный баланс реактора для окисления монооксида углерода на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными
2. Расход исходной смеси 10000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): монооксид углерода – 0,07; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,96.

Задача 24. Составить материальный баланс реактора для окисления оксида азота на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. Расход исходной газовой смеси 15000 м³/ч.
3. Состав исходной смеси (объёмные доли): оксид азота – 0,12; диоксид азота – 0,01; остальное – сухой воздух: кислород – 0,21; азот – 0,79.
4. Степень превращения оксида азота – 0,95.

Задача 25. Составить материальный баланс реактора для окисления диоксида серы на часовую производительность по следующим исходным данным:

1. Все газы считать идеальными.
2. асход исходной газовой смеси 17000 м³/ч.

3. Состав исходной смеси (объёмные доли): диоксид серы – 0,1; кислород – 0,12; остальное – азот.
4. Степень превращения оксида азота – 0,86.

Список рекомендуемой литературы

1. Общая химическая технология: материальный баланс химико-технологического процесса: Учебное пособие для вузов. / И.М. Кузнецова, Х.Э. Харлампики, Н.Н. Батыршин– М.: Логос, 2007. – 264с.
2. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. – СПб.: НИИАтмосфера, 2005. – 210 с.
3. Адсорбционно-каталитические методы очистки газовых сред в химической технологии / А.В. Путилов, С.Л. Кудрявцев, И.В. Петрухин. – М.: Химия, 1989. – 18 с.

Содержание

Введение

Теоретические основы расчета материального баланса

Пример решения задачи по расчету материального баланса реактора

Варианты выполнения практической работы

Список рекомендуемой литературы