

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Составители: Г.Л. Пашков,
С.В. Сайкова

КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Химическая технология: Методическая разработка для студ. IV курса хим. фак-та/ Краснояр. гос. ун-т; Сост. Г.Л. Пашков, С.В. Сайкова. Красноярск, 2002. 28 с.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

**Методическая разработка
для студентов IV курса химического факультета**

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного университета

Часть I

© Красноярский
государственный
университет, 2002

Красноярск 2002

Семинар 1. Химико-технологические системы (ХТС) Расчёты материального и теплового балансов ХТС

Любое химическое производство представляет собой совокупность большого числа взаимосвязанных технологических аппаратов, предназначенных для выполнения требуемого физико-химического преобразования исходного сырья. Наибольший экономический эффект получается при оптимизации не отдельных аппаратов, а их совокупности, например, в пределах цеха или даже производства, так как оптимальные значения критерия функционирования всего производства не являются аддитивными функциями оптимальных значений критериев функционирования каждого аппарата. Поэтому в химической технологии рассматривают химико-технологические системы.

Химико-технологическая система – это совокупность взаимосвязанных технологическими потоками и действующих как одно целое аппаратов, в которых осуществляется определенная последовательность технологических операций (подготовка сырья, химические превращения, выделение целевых продуктов).

Элемент системы – самостоятельная и условно неделимая единица. В химической технологии – аппарат, в котором протекает процесс (иногда совокупность или часть аппарата).

Подсистема – группа элементов, обладающая определенной целостностью и целенаправленностью. Это самостоятельно функционирующая часть системы. Например, совокупность трех элементов химико-технологической системы – ректификационной колонны, подогревателя и сепаратора - образует систему дистилляции и подсистему сложной химико-технологической системы производства карбамида.

Связь между элементами, между данной системой и окружающей средой осуществляется с помощью физических потоков и отражает перенос потоком вещества, теплоты, энергии от элемента к элементу. В ХТС выделяют физические потоки двух видов: **технологические и условные**.

Технологические обеспечивают взаимосвязь элементов между собой, между системой и окружающей средой.

Условные потоки отображают рассеивание (потери) вещества или энергии ХТС в окружающую среду, а также возмущающие воздействия (материальные или энергетические) внешней среды на ХТС.

Кроме того, рассматривают **внешние и внутренние** источники (стоки) вещества или энергии системы.

Внешние источники вещества (энергии) соответствуют материальным и энергетическим физическим потокам, поступающим в систему.

Внешние стоки направлены от системы и соответствуют материальным и энергетическим потокам, образующимся в результате функционирования системы.

Внутренний материальный источник соответствует количеству компонента, вступившего в химическую реакцию.

Внутренний материальный сток соответствует количеству компонента, образующегося в химической реакции.

Внутренний тепловой источник (сток) отвечает количеству тепла, выделяющегося или поглотившегося в ходе химической реакции.

Для связи этих потоков используется система уравнений балансов ХТС.

Установление балансов, т.е. определение выхода основного и побочного продуктов, расходных коэффициентов по сырью, производственных потерь, позволяет производить расчеты оборудования, коммуникаций, оценить экономическую эффективность и целесообразность процесса.

Баланс материальных потоков носит название **материального баланса**. Баланс энергетических (тепловых) потоков – это **тепловой баланс**.

В основе балансов лежат законы сохранения массы вещества и энергии, а также стехиометрические соотношения.

Материальный баланс может быть представлен уравнением:

$$\Sigma G = \Sigma G' + G_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где ΣG – масса (или количество молей) всех видов сырья и материалов, поступающих на переработку; $\Sigma G'$ – масса (или количество молей) продуктов; $G_{\text{пот}}$ – масса (или количество молей) производственных потерь.

Составляют материальный баланс по уравнению основной суммарной реакции с учетом побочных реакций на единицу массы основного продукта (кг, т) или на единицу времени (ч, сут).

Выделяют два вида балансов – теоретический и практический.

Теоретический материальный баланс рассчитывают на основании стехиометрического уравнения реакции, а в **практическом материальном балансе** учитывается состав исходного сырья и готовой продукции, избыток одного из компонентов сырья, степень превращения, потери и т.д.

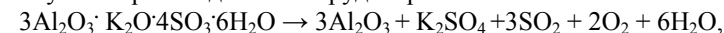
На основе материального баланса составляют тепловой, позволяющий определить потребность в топливе, размеры теплообменных поверхностей, расход теплоты, хладагентов и т.д.

1. Расчеты расходных коэффициентов

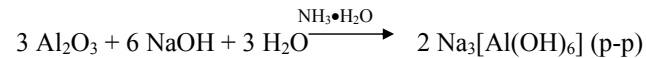
Расходные коэффициенты – это величины, характеризующие расход различных видов сырья, воды, топлива, электроэнергии, пара на единицу выработанной продукции. Особенно важны расходные коэффициенты сырья, т.к. для большинства химических производств они определяют на 60-70 % себестоимость продукции.

Задача 1

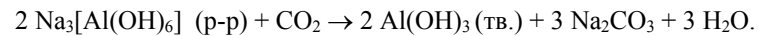
Рассчитать расход алунитовой руды ($3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 4 \text{ SO}_3 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$), содержащей 23 % (масс.) Al_2O_3 , для получения 1 т алюминия, если потери Al на всех производственных стадиях – 12 % (масс.). Для получения алюминия из алунита производят обжиг руды при 550-580 °С:



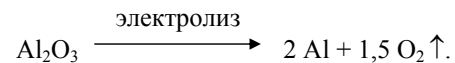
далее обрабатывают продукт водным раствором аммиака и избытком щёлочи. Алюминий при этом переходит в раствор:



После разделения фаз через полученный раствор пропускают CO_2 до выпадения $\text{Al}(\text{OH})_3$, который прокаливают до Al_2O_3 :



Последняя стадия – электролиз оксида алюминия, растворенного в расплавленном криолите:



Так как $\frac{M(\text{Al}_2\text{O}_3)}{2M(\text{Al})} = \frac{102}{2 \cdot 27} = 1,88$ т Al_2O_3 из 1 моля образуется 2 моля Al, то для получения 1 т Al требуется:

или (с учетом доли Al_2O_3 в алунитовой руде):

$$\frac{1,88}{0,23} = 8,21 \text{ т руды,}$$

с учетом потерь

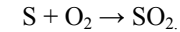
$$\frac{8,21}{0,88} = 9,33 \text{ т руды.}$$

2. Составление материальных балансов необратимых химико-технологических процессов

Задача 2

Составить материальный баланс печи для сжигания серы производительностью 60 т/сут. Доля окисленной серы – 0,95 (остальная сера улетает и сгорает вне печи). Объёмный коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$. Расчет вести на производительность печи по сжигаемой сере в кг/ч.

5. Запишем уравнение процесса:



6. Найдем производительность печи по сжигаемой сере в кг/час:

$$\frac{60 \cdot 1000}{24} = 2500 \text{ кг/ч.}$$

3. Определим массу серы, окисленной до SO_2 :

$$2500 \cdot 0,95 = 2375 \text{ кг,}$$

не окисленной:

$$2500 - 2375 = 125 \text{ кг.}$$

4. Найдем количество кислорода (м^3 , кг), израсходованного на окисление:

$$\frac{2375 \text{ кг}}{32 \text{ г/моль}} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 1662,5 \text{ м}^3.$$

С учетом коэффициента избытка воздуха (α):

$$1662,5 \cdot 1,5 = 2493,8 \text{ м}^3,$$

или

$$\frac{2493,8 \text{ м}^3 \cdot 32 \text{ г/моль}}{22,4 \text{ л/моль}} = 3562,5 \text{ кг.}$$

5. Рассчитаем количество азота, поступившего с кислородом (в виде воздуха):

$$\frac{2493,8 \text{ м}^3 \cdot 79 \%}{21 \%} = 9381,4 \text{ м}^3$$

или

$$\frac{9381,4 \text{ м}^3 \cdot 28 \text{ г/моль}}{22,4 \text{ л/моль}} = 11726,8 \text{ кг.}$$

6. Найдем количество SO_2 , образовавшегося по реакции $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$:

$$\frac{2375 \text{ кг} \cdot 64 \text{ г/моль}}{32 \text{ г/моль}} = 4750 \text{ кг.}$$

или

$$\frac{4750 \text{ кг} \cdot 22,4 \text{ л/моль}}{64 \text{ г/моль}} = 1662,5 \text{ м}^3.$$

7. Рассчитаем количество неизрасходованного кислорода – избыток от теоретически необходимого для окисления серы:

$$1662,5 \cdot 0,5 = 831,2 \text{ м}^3$$

или

$$\frac{831,2 \text{ м}^3 \cdot 32 \text{ г/моль}}{22,4 \text{ л/моль}} = 1187,5 \text{ кг}$$

8. Занесем полученные данные в табл. 1.

Материальный баланс печи сжигания серы (на 1 ч)

Таблица 1

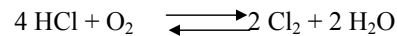
Приход	кг	м ³	Расход	кг	м ³
S	2500	-	S	125	-
O ₂	3562,5	2493,8	O ₂	1187,5	831,2
N ₂	11726,8	9381,4	N ₂	11726,8	9381,4
			SO ₂	4750	1662,5
ИТОГО:	17789,3	11875,2	ИТОГО:	17789,3	11875,1

3. Составление материального баланса промышленных процессов, основанных на обратимых реакциях

Задача 3

Исходная смесь для окисления HCl содержит (мол. %) HCl – 35,5; O₂ – 13,5; N₂ – 51. Процесс окисления протекает при P = 0,1 МПа и t = 370⁰С на оксидном хромовом катализаторе. По окончании реакции в газе содержится 13,2 мол % Cl₂. Рассчитать равновесный состав газовой смеси и значение константы равновесия.

1. Запишем уравнение химической реакции



и выражение для константы равновесия

$$K_{\text{равн.}} = \frac{p_{\text{Cl}_2}^2 p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{HCl}}^4 p_{\text{O}_2}}$$

где p_i - парциальное давление i-го компонента.

2. Пусть в момент равновесия количество окисленной смеси равно 1 моль, тогда она содержит: 0,132 моль Cl₂; 0,132 моль H₂O и (1 – 0,264) = 0,736 моль HCl + N₂ + O₂.

3. Рассчитаем количество израсходованных газов, моль:

$$n_{\text{HCl(израсх.)}} = 0,132 \cdot 2 = 0,264; n_{\text{O}_2(\text{израсх.})} = 0,132/2 = 0,066.$$

4. Определим количество молей смеси в начальный момент.

0,736 моль – это количество HCl + N₂ + O₂ в момент равновесия, но исходная смесь должна была содержать еще дополнительное количество израсходованного HCl и O₂, т.е.

$$0,264 + 0,066 = 0,330 \text{ моль.}$$

Таким образом, число молей исходной смеси равно:

$$0,736 + 0,330 = 1,066 \text{ моль, в том числе}$$

$$n_{\text{HCl}}^0 = 1,066 \cdot 0,355 = 0,379 \text{ моль,}$$

$$n_{\text{O}_2}^0 = 1,066 \cdot 0,135 = 0,144 \text{ моль,}$$

$$n_{\text{N}_2}^0 = 1,066 \cdot 0,135 = 0,144 \text{ моль.}$$

5. Найдем состав смеси в момент равновесия:

$$n_{\text{HCl}} = n_{\text{HCl}}^0 - n_{\text{HCl(израсх.)}} = 0,379 - 0,264 = 0,115 \text{ моль,}$$

$$n_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2}^0 - n_{\text{O}_2(\text{израсх.})} = 0,144 - 0,066 = 0,078 \text{ моль,}$$

$$n_{\text{N}_2} = n_{\text{N}_2}^0 = 0,144 \text{ моль,}$$

$$n_{\text{Cl}_2} = 0,132 \text{ моль,}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 0,132 \text{ моль.}$$

6. Рассчитаем парциальные давления (МПа) компонентов смеси в момент равновесия и величину K_{равн.}

$$P_i = P_{\text{атм}} \cdot x_i, \quad (2)$$

где x_i – мольная доля компонента.

$$x_i = n_i/n \text{ смеси.} \quad (3)$$

Так как в нашем случае n_{смеси} = 1 моль, то x_i = n_i

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{атм.}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1 \cdot 0,132;$$

$$p_{\text{O}_2} = 0,1 \cdot 0,078;$$

$$p_{\text{Cl}_2} = 0,1 \cdot 0,132;$$

$$p_{\text{HCl}} = 0,1 \cdot 0,115;$$

$$K_{\text{равн.}} = \frac{p_{\text{Cl}_2}^2 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{HCl}}^4 \cdot p_{\text{O}_2}} = \frac{0,1^2 \cdot 0,132^2 \cdot 0,1^2 \cdot 0,132^2}{0,1^4 \cdot 0,115^4 \cdot 0,1 \cdot 0,078} = \frac{0,132^4}{0,115^4 \cdot 0,1 \cdot 0,078} = 222,5 \text{ МПа}^{-1}$$

7. Составление теплового баланса

Энергетический (тепловой) баланс любого аппарата может быть представлен в виде уравнения, связывающего приход и расход энергии (теплоты) процесса (аппарата).

$$\sum Q_{\text{прих.}} = \sum Q_{\text{расх.}} \quad (4)$$

Для аппаратов **непрерывного действия** тепловой баланс составляют **на единицу времени**, а для аппаратов **периодического действия** – **на время цикла обработки**.

Тепловой баланс рассчитывают на основе данных материального баланса с учетом тепловых эффектов (экзотермического и эндотермического) химической реакции, физических превращений (испарение, конденсация и

др.), происходящих в аппарате, с учетом подвода теплоты извне и отвода ее с продуктами реакции через стенки аппарата.

Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6, \quad (5)$$

где $Q_1 + Q_2 + Q_3$ - теплота, подводимая с твердыми, жидкими и газообразными, соответственно, исходными веществами;

$Q'_1 + Q'_2 + Q'_3$ - теплота, уносимая продуктами,

Q_4 - теплоты физических процессов, протекающих в аппарате,

Q_5 - теплота самой химической реакции,

Q_6 - теплота, подводимая извне, например, через стенки аппарата,

$Q > 0$, $Q' < 0$.

Как известно, $Q_1 - Q_3$ рассчитывается по формуле

$$Q = G \cdot c \cdot T, \quad (6)$$

где G - количество вещества (моль, кг), T - температура, c - средняя теплоемкость вещества при данной температуре.

Теплоемкость является функцией температуры:

$$c = a_0 + a_1 T + a_2 T^2, \quad (7)$$

где a_0, a_1, a_2 - константы.

Однако в случае приближенных расчетов можно считать ее постоянной величиной.

Для расчета теплоемкости смеси существует уравнение:

$$c_{\text{смеси}} = \frac{G_1 \cdot c_1 + G_2 \cdot c_2 + G_3 \cdot c_3}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad (8)$$

где $c_1 - c_3$ - теплоемкости компонентов смеси, $G_1 - G_3$ - количества вещества компонентов смеси.

Учет теплоты физических процессов, протекающих в аппарате, производится по формулам:

$$Q_4 = G \cdot \lambda, \quad (9)$$

$$Q_4 = G \cdot \gamma, \quad (10)$$

где λ и γ - соответственно, удельная теплота кристаллизации и парообразования.

Подвод теплоты в аппарат (Q_6) можно учитывать:

а) по потере теплоты теплоносителем:

$$\text{греющей водой: } Q_6 = G_{\text{воды}} \cdot c_{\text{воды}} \cdot (t_{\text{нач.}} - t_{\text{кон.}}), \quad (11)$$

где $t_{\text{нач.}}$ и $t_{\text{кон.}}$ - температура воды на входе в аппарат и на выходе из него;

$$\text{паром: } Q_6 = G(\text{пара}) \cdot r. \quad (12)$$

б) по формуле теплопередачи через греющую стенку:

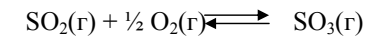
$$Q_{\text{п}} = k_r \cdot F \cdot (t_r - t_x) \cdot \tau, \quad (13)$$

где k_r - коэффициент теплопередачи, F - площадь поверхности теплообмена, t_r и t_x - средняя температура греющего и нагреваемого вещества в аппарате, τ - время теплопереноса.

Задача 4

Составить тепловой баланс контактного аппарата для частичного окисления SO_2 производительностью $25000 \text{ м}^3/\text{ч}$ (пересчет на нормальные условия). Газовая смесь содержит (об.%): $\text{SO}_2 - 9$; $\text{O}_2 - 11$; $\text{N}_2 - 80$. Степень окисления 88% , температура входящего газа $t_{\text{вх}} = 460^\circ\text{C}$, температура выходящего газа $t_{\text{вых}} = 580^\circ\text{C}$. Средняя теплоемкость смеси $2,052 \text{ кДж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, условно считать ее постоянной. Потери теплоты в окружающую среду - 5% от прихода. Тепловой эффект реакции окисления SO_2 $Q = 94,21 \text{ кДж/моль}$.

1. Запишем уравнение процесса:



2. Рассчитаем составы исходного газа и газа на выходе из аппарата (по уравнению реакции).

Прореагировало O_2 : $1980 \cdot 2 = 990 \text{ м}^3$, осталось $2750 - 990 = 1760 \text{ м}^3$.

3. Занесем данные материального баланса в табл. 2.

4. Определим приход теплоты:

а) с газами, входящими в аппарат:

б) по реакции:

$$Q_1 = G \cdot c_{\text{см}} \cdot t_{\text{вх}} = 25000 \text{ м}^3/\text{час} \cdot 2,052 \text{ кДж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 460^\circ\text{C} = 2,36 \cdot 10^7 \text{ кДж},$$

$$Q_2 = 94,21 \text{ кДж/моль} \cdot \frac{2250 \text{ м}^3 \cdot 0,88}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}} = 8,33 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

Материальный баланс контактного аппарата окисления SO₂ (на 1 ч)

Таблица 2

Приход	м ³	Расход	м ³
SO ₂	25000 · 0,09 = 2250	SO ₂	2250 · 0,12 = 270
O ₂	25000 · 0,11 = 2750	O ₂	1760
N ₂	25000 · 0,8 = 20000	N ₂	20000
		SO ₃	2250 · 0,88 = 1980
ИТОГО:	25000	ИТОГО:	24010

Итого приход теплоты: $Q_1 + Q_2 = 2,36 \cdot 10^7 + 8,33 \cdot 10^6 = 3,19 \cdot 10^7$ кДж.

5. Рассчитаем расход теплоты:

а) с выходящими из аппарата газами:

$$Q'_1 = 24010 \text{ м}^3/\text{час} \cdot 2,052 \text{ кДж/м}^3 \cdot 0^\circ\text{C} \cdot 580^\circ\text{C} = 2,86 \cdot 10^7 \text{ кДж},$$

$$\text{б) потери: } Q_{\text{пот.}} = (Q_1 + Q_2) \cdot 5\% = 3,19 \cdot 10^7 \cdot 0,05 = 1,59 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

$$\text{Итого расход теплоты: } Q'_1 + Q_{\text{пот.}} = 2,86 \cdot 10^7 + 1,59 \cdot 10^6 = 3,02 \cdot 10^7 \text{ кДж}.$$

Так как приход теплоты больше, чем расход, то теплоту необходимо отводить в количестве:

$$Q_{\text{отв.}} = 3,19 \cdot 10^7 - 3,02 \cdot 10^7 = 1,7 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

6. Занесем данные теплового баланса в табл. 3.

Тепловой баланс контактного аппарата окисления SO₂ (на 1 ч)

Таблица 3

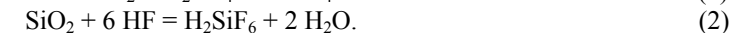
Приход	кДж	Расход	кДж
Q ₁	2,36 · 10 ⁷	Q' ₁	2,86 · 10 ⁷
Q ₂	0,83 · 10 ⁷	Q _{пот.}	0,16 · 10 ⁷
		Q _{отв.}	0,17 · 10 ⁷
ИТОГО:	3,19 · 10 ⁷	ИТОГО:	3,19 · 10 ⁷

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить количество аммиака, требуемого для производства 100000 т/год азотной кислоты, и расход воздуха на окисление аммиака, если цех работает 355 дней в году. Выход NO - 0,97, степень абсорбции - 0,92, содержание аммиака в сухой аммиачно-воздушной смеси - 7,13 мас.%. Расчет вести на кг/ч и м³/ч аммиака.

Задача 2. Определить расход технического карбида кальция, содержащего 85 % CaC₂, для получения 1000 л ацетилена, если степень разложения CaC₂ составляет 92 %.

Задача 3. Составить материальный баланс производства фтороводорода (на 1 т HF) из плавикового шпата, содержащего (масс. %): CaF₂ - 96, SiO₂ - 4. Степень разложения шпата - 0,95. Для разложения применяют 93 %-ную серную кислоту с 15 %-ным избытком от теоретического.



Задача 4. Составить материальный баланс процесса сжигания колчедана в печи КС-200 (на 1 ч работы печи). Производительность печи по колчедану 200 т/сут. Содержание (масс. %) серы в колчедане - 41, влаги в колчедане - 3, серы в огарке 1, SO₂ - в сухом печном газе - 14,1 об.%, O₂ - в сухом печном газе - 2,4 об. %. Температура поступающего воздуха 20 °С, относительная влажность - 50 %.

Задача 5. Рассчитать материальный баланс производства хлора методом электролиза водного раствора хлорида натрия концентрации 310 г/л. Плотность раствора при условиях электролиза 1,17 кг/л. Степень разложения 50 %. Побочные процессы в расчет не принимать. Расчет вести на 1000 м³ хлора.

Задача 6. Процесс окисления NO до NO₂ сопровождается образованием димера. Рассчитать степень полимеризации NO₂ для газовой смеси, содержащей 5 об. % NO₂ в исходном газе, если давление равно 0,1 МПа, температура 40 °С.

$$K_p = p^2_{\text{NO}_2} / p_{\text{N}_2\text{O}_4} = 0,435 \text{ (атм.)}$$

Задача 7. В лабораторном реакторе объемом 6 л находится 9,2 г N₂O₄ при температуре 111 °С и давлении 0,1 МПа. Определить константу равновесия реакции N₂O₄ = 2 NO₂.

Задача 8. Определить равновесный выход CO_2 при конверсии CO , если в исходной парогазовой смеси CO и H_2O находятся

- 1) в стехиометрическом соотношении;
- 2) в соотношении $\text{H}_2\text{O}:\text{CO} = 3$ (по объему).

Константа равновесия 0,15.

Задача 9. Рассчитать удельную теплоемкость холодильной смеси, состоящей из 2 л воды, 8 кг льда и 5 кг поваренной соли.

Задача 10. Составить тепловой баланс печи КС 200 по данным материального баланса (задача 4). Температура кипящего слоя 800°C . Потери теплоты 4 % от прихода.

Задача 11. Составить тепловой баланс генератора водяного газа при газификации 1 т кокса, содержащего (мас. %) $\text{C} - 93$, золы – 4, воды – 3, и подаче 1575 кг водяного пара на 1 т кокса. Образовавшиеся 2461 кг водяного газа содержат (масс. %): $\text{CO} - 80,07$, $\text{CO}_2 - 1,73$, $\text{H}_2\text{O} - 12,32$ и водород. Температура водяного газа на выходе из генератора 1000°C , температура подаваемого кокса 25°C и водяного пара 100°C . Теплоемкость золы (молярная масса – 56) принять равной теплоемкости углерода.

Вещество	$\Delta H_0^{\text{обр}}$, Дж/моль	c при указанной T , Дж/моль $^\circ\text{C}^0$
C (зола)	0	8,53
H_2O	-241840	75,3; 33,6 - пар
CO	-110500	31,7
H_2	0	29,8
CO_2	-393150	49,3

Задача 12. В 50 % азотную кислоту пропускают при 20°C газообразный аммиак. Определить тепловой эффект реакции нейтрализации и температуру смеси после окончания реакции взаимодействия между кислотой и аммиаком. Потери теплоты в окружающую среду составляют 15 % от выделившейся. Расчеты вести на 1 моль. Считать соотношения веществ стехиометрическими.

Лабораторные работы

Работа N1

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ НИКЕЛИРОВАНИЕ

Никель является электроотрицательным металлом (стандартный электродный потенциал $E_{\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}}^0 = -0,23 \text{ В}$), но, благодаря склонности к пассивации, приобретает более положительный потенциал и достаточную стойкость против действия атмосферы щелочей и некоторых кислот. В гальванической паре с железом никель является катодом и, следовательно, надежно защищает основной металл (сталь) от коррозии только при отсутствии оголенных участков и пор в покрытии.

Никелирование можно проводить электрохимическим или химическим способом (см. работу N 2). В случае электрохимического никелирования применяют сульфатные, сульфаминовые, борфтористоводородные, хлоридные электролиты. Наибольшее распространение получили сульфатные электролиты.

Влияние состава электролита и условий электролиза на электрохимическое осаждение никеля

Электролиз растворов солей никеля сопровождается значительной катодной и анодной поляризацией.

Катодный и анодный процессы очень чувствительны к концентрации ионов водорода в растворе. На катоде одновременно с разрядом ионов никеля возможен разряд ионов водорода. С уменьшением значения pH выход никеля по току падает, при повышенном значении pH у катода образуются и выпадают из раствора гидроксид и основные соли никеля, что вызывает резкое обеднение прикатодного слоя ионами никеля и связанное с этим ухудшение качества покрытия. Для поддержания постоянства pH в электролит никелирования вводят добавки, сообщающие ему буферные свойства, например борную или янтарную кислоту $(\text{CH}_2)_2(\text{COOH})_2$, ацетат никеля. Выход по току зависит не только от кислотности электролита, но и от температуры - возрастает с повышением температуры электролита.

Особенность анодного процесса - легкая пассивируемость никелевых анодов. Ее можно устранить, повышая концентрацию ионов водорода в растворе. Однако это приводит к снижению катодного выхода никеля по току. Обычно для активации анодов в электролит вводят хлорид ионы в виде $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaCl или KCl .

Кроме того, электролит никелирования очень чувствителен к загрязнениям примесями некоторых металлов, например меди, цинка, свинца, вредное влияние некоторых сказывается уже при очень малом содержании

их в растворе. Медь как более электроположительный металл выделяется на катоде преимущественно перед никелем. Так как при малом содержании меди в растворе разряд ионов меди происходит на предельном токе, то осадки получают губчатыми. Концентрация меди не должна превышать $0,01 \text{ г/дм}^3$.

Аналогичное явление наблюдается в случае загрязнения цинком, который служит причиной образования на катоде губчатых осадков в виде черных пятен и полос. Допустимая концентрация цинка около $0,007 \text{ г/дм}^3$.

Цель работы: ознакомление с процессом никелирования электрохимическим способом; изучение влияния условий процесса и состава электролита на скорость образования и качество никелевых покрытий.

Экспериментальная часть

Подготовка поверхности образцов перед нанесением покрытий

Перед нанесением покрытий поверхность образцов тщательно очищают от механических загрязнений, жировых и оксидных пленок.

Очистку стальных и медных* образцов производят следующим образом.

1. Обезжиривают поверхность последовательной обработкой раствором NaOH ($5-15 \text{ г/дм}^3$) при $60-80 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5-20 мин, водой $60 \text{ }^\circ\text{C}$ и протиркой смесью порошков CaO: MgO (10:1) в виде плотной водной суспензии "кашицы".
2. Промывают водой ($18-25 \text{ }^\circ\text{C}$).
3. Проводят химическое травление HCl или H_2SO_4 ($150-200 \text{ г/дм}^3$) в течение 3-10 мин при $18-25 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Промывают водой ($18-25 \text{ }^\circ\text{C}$).
5. Протирают смесью CaO и MgO.
6. Промывают водой ($18-25 \text{ }^\circ\text{C}$).
7. Проводят активирование образцов раствором H_2SO_4 (50 г/дм^3) при $18-25 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 0,5-1 мин.
8. Промывают водой ($18-25 \text{ }^\circ\text{C}$).
9. Промывают спиртом (для быстрого высушивания).

Подготовленные образцы после высушивания необходимо взвесить сначала на теххимических, а затем на аналитических весах.

Электрохимическое никелирование

Схема установки для проведения электролиза приведена на рис. 1.

Опыт проводят в электролитах разного состава:

* Для медных образцов операции 3-6 не выполняются.

Электролит N1: $250-300 \text{ г/дм}^3 \text{ NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,
 $30 \text{ г/дм}^3 \text{ NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,
 $30 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_3\text{BO}_3$,
 pH 5,0-5,2.

Электролит N2 отличается только меньшим значением pH = 1,8-2,0, а **электролит N3** получают добавлением примесей к электролиту N1.

Перед началом электролиза с помощью pH-метра определяют кислотность исследуемых электролитов и, если нужно, доводят до указанных значений pH добавлением 1 н. раствора серной кислоты (подкисление) или свежесожденного карбоната никеля при нагревании (подщелачивание) с последующей фильтрацией. После электролиза снова определяют кислотность электролитов. В процессе электролиза контролируют температуру электролитов.

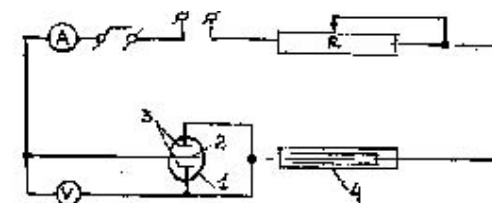


Рис. 1 Принципиальная схема установки для проведения электролиза:
 1 - электролизер; 2 - катод; 3 - анод; 4 - кулонометр

Кулонометр представляет собой стеклянный сосуд, заполненный подкисленным раствором CuSO_4 , (концентрация меди - 50 г/дм^3 , серной кислоты - $180-220 \text{ г/дм}^3$), в который погружены две медные пластинки (катод и анод). Предварительно подготовленный медный катод взвешивают до и после электролиза и по разности масс (по массе осажденной меди) определяют количество электричества, прошедшее через ячейку (электролиз меди протекает со 100 % выходом по току). Это значение используют для расчета выхода по току процесса электрохимического осаждения никеля.

Изучают влияние кислотности, температуры электролита, наличия в нем примесей, а также толщины никелевого покрытия на его качество. Проводят 6 экспериментов, условия которых приведены в табл. 4.

После электролиза катоды с никелевым покрытием тщательно промывают водой (промывные воды собирают), сушат и взвешивают сначала на теххимических, а потом на аналитических весах (кроме эксперимента N5). Качество покрытия оценивают визуально (под микроскопом) и определяют его пористость (см. ниже). Измеряют pH электролита после электролиза. Рассчитывают по данным кулонометра теоретическое значение

массы выделившегося никеля и выход по току. Результаты представляют в виде табл.5.

Таблица 4

Условия экспериментов

№ эксперимента	№ электролита	T, °C	Наличие примесей*	Плотность тока J**, A/m ²	Толщина покрытия (n), мкм	Время электролиза (расчетное)***, мин
1	1	20	-	100-200	5	
2	1	50	-	300	1	
3	1	50	-	300	5	
4	1	50	-	300	15	
5	3	20	+	50-100	5	
6	2	50	-	300	5	

Результаты экспериментов

Таблица 5

№	Сила тока J, А	Напряжение, В	Катод кулонометра			pH кон	Масса катода электролизера, г				Выход по току, %	Качество покрытия	
			m _{Cu} нач., г	m _{Cu} кон., г	g, Кл		m нач	m кон	Δm=m Ni теорет.	n, мкм		визуально	пористость, %

Определение пористости никелевых покрытий

* Природа и концентрация примесей задается преподавателем

** Задается преподавателем

*** Время электролиза рассчитывается по закону Фарадея в соответствии с заданной величиной плотности тока и толщиной покрытия

Методы выявления пор в покрытии заключаются в воздействии реагентов, дающих окрашенные соединения с ионами металла основы или подслоя. К ним относятся: испытание наложением фильтровальной бумаги; испытание с применением паст; электрографический и электрохимический методы. Заслуживает внимания метод с применением паст.

Этим методом можно определять пористость катодных металлических покрытий на стали, меди, алюминии, цинке и их сплавах, а также неметаллических неорганических покрытий на алюминии и его сплавах. При этом испытываемые образцы могут иметь любую форму.

Пасту наносят на поверхность покрытия кистью, пульверизатором, окунанием или другим способом, обеспечивающим получение равномерного слоя, и выдерживают не более 10 мин. Затем подсчитывают число окрашенных участков, соответствующих числу пор, и удаляют пасту, промывая образец дистиллированной водой. После того как образец высохнет, проводят повторное определение на том же участке поверхности. Количество пасты определяют, исходя из площади никелевого покрытия в соответствии с расходом: 50-100 г/м² (расчет показать преподавателю).

Для стальных катодов используют следующий состав пасты: 0,1-0,2 г α,α-бипиридила, о-фенантролина или K₃[Fe(CN)₆] растворяют в 10 мл 0,1-0,2 н раствора HCl, вводят диоксид титана из расчета 10-15 г на 10 мл раствора. Смесь тщательно перемешивают до образования однородной массы. О наличии пор в Ni-покрытии судят по появлению окрашивания.

В конце работы делают выводы обо всех наблюдаемых закономерностях в соответствии с целью работы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое катодная и анодная поляризация?
2. Что такое выход по току?
3. Как условия электрохимического никелирования влияют на качество металлического покрытия?
4. Расскажите о методах защиты от коррозии. Почему для этого используют процесс никелирования, если электродный потенциал пары Ni²⁺/Ni⁰ ниже нуля?

Работа №2

ХИМИЧЕСКОЕ НИКЕЛИРОВАНИЕ

Для проведения никелирования используют гипофосфит натрия, который восстанавливает соли никеля. Этот процесс начинается самопроизвольно только на поверхности никеля, кобальта, железа, палладия и алюминия. Однако никелевые покрытия можно нанести и на другие металлы и сплавы, например медь, латунь и платину, если эти металлы, после погру-

жения их в раствор, привести в контакт с никелем или другими более электроотрицательными металлами. На цинке и кадмии процесс химического восстановления никеля не протекает совсем.

Химический метод никелирования позволяет получить равномерные по толщине покрытия на изделиях сложного рельефа. Вследствие включения в осадок фосфора (1-5%) покрытия обладают повышенной коррозионной стойкостью, твердостью, износоустойчивостью по сравнению с чистыми металлами.

Влияние условий на химическое никелирование

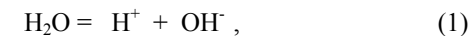
Одним из основных факторов, определяющих скорость процесса, является температура раствора. Установлено, что при низкой температуре процесс практически не протекает, оптимальной является температура 96-98 °С.

Значительное влияние на скорость процесса химического никелирования оказывает кислотность раствора. Учитывать это необходимо потому, что в процессе восстановления металла происходит подкисление раствора. Известно, что лучшие результаты по скорости процесса и качеству никелевых покрытий получаются при pH=4,7-5,5. Скорость восстановления никеля мало изменяется с концентрацией гипофосфита натрия при сохранении постоянной концентрации всех остальных компонентов. Только при изменении соотношения между концентрациями восстанавливаемой соли и гипофосфита натрия можно добиться значительного изменения скорости процесса - чем больше это отношение, тем выше скорость восстановления металла.

Однако при высокой концентрации соли никеля начинается самопроизвольное разложение электролита вследствие восстановления металла в объеме раствора. Для повышения стабильности растворов поддерживают определенное соотношение концентраций ионов никеля и гипофосфита натрия и, кроме того, в раствор вводят комплексообразователи, стабилизирующие добавки (кристаллические яды), поверхностно-активные вещества и буферные соединения.

О механизме восстановления никеля с помощью гипофосфита высказано несколько гипотез. Наибольшим признанием пользовалось представление, согласно которому восстановление никеля происходит посредством атомарного водорода, выделяющегося в результате взаимодействия гипофосфита натрия с водой.

В последнее время предложена схема, по которой реакция взаимодействия гипофосфита натрия с водой представляется как присоединение иона OH⁻ от молекулы воды на месте разрыва связи P=N в молекуле гипофосфита натрия. Эта реакция, протеканию которой способствует каталитическое действие поверхности никеля, может быть выражена следующими уравнениями:



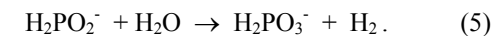
Освобожденный от аниона гипофосфита электрон через металлическую поверхность передается иону водорода и превращает его в атомарный:



Два атома водорода, один из которых образовался из аниона гипофосфита, а другой - из воды, соединяясь между собой, образуют молекулярный водород:



Суммарная реакция гипофосфита натрия с водой соответствует уравнению (5):



Если в растворе присутствуют ионы никеля, то электроны, образующиеся по реакции (2), восстанавливают их до металла (6):



Суммарная реакция восстановления ионов никеля гипофосфитом натрия представлена в виде уравнения:



Таким образом, восстановление никеля сопровождается выделением водорода, образующимся по уравнению (2), причем на один ион Ni²⁺ затрачивается две группы H₂PO₂⁻.

Одновременно с реакцией (6) происходит восстановление анионов гипофосфита до элементарного фосфора и восстановление ионов водорода (3). Предполагается, что восстановление фосфора до элементарного состояния происходит из ионов H₂PO₂⁻, обращенных к каталитической поверхности двумя атомами водорода; при таком расположении расстояние между атомами фосфора и поверхностью будет наименьшим.

Протекание этой реакции может быть представлено уравнением:



Суммарная реакция, включающая реакции (2) и (8),



Уравнение (9) указывает на то, что кислая среда будет благоприятствовать протеканию этой реакции вследствие нейтрализации образующихся ионов OH^- .

Процесс восстановления гипохлоритом натрия является автокаталитическим. Поэтому наличие в растворе даже малого количества порошкообразного никеля приводит к быстрому разложению раствора. При осаждении никеля восстановление его может происходить не только на поверхности металла, но и в объеме раствора в виде порошка.

Цель работы: ознакомление с процессом никелирования путем химического восстановления; изучение влияния условий процесса состава электролита и природы металлического катода на качество никелевого покрытия.

Экспериментальная часть

В качестве электролизеров применяют фарфоровые чашки или термостойкие стаканы. Температуру раствора поддерживают постоянной с помощью глицириновой бани. Объем раствора зависит от размеров электролизера и используемых образцов. Образцы, предварительно подготовленные, как описано в работе 1, и взвешенные сначала на теххимических, затем – на аналитических весах, опускают в раствор и выдерживают в течение 60 минут. Составы электролитов для химического никелирования приведены в табл. 6. Все опытные и расчетные данные записывают в табл. 7.

Эксперимент N1. Определение влияния природы покрываемого металла на процесс химического осаждения никеля и качество покрытий
В сосуды, содержащие электролит N1 при 97-98 °С, погружают предварительно обезжиренные и взвешенные образцы: стальной в первый сосуд и медный или цинковый во второй сосуд.

Эксперимент N2. Определение влияния pH раствора на скорость процесса и качество осадка

В сосуды, содержащие растворы N1 и N2 при 97 °С, загружают образцы из стали, предварительно обезжиренные и взвешенные.

Составы электролитов для химического никелирования

Таблица 6

N электролита	Концентрация, г/дм ³			pH ¹
	Ацетат никеля	Гипофосфит натрия	Глицин (гликокол)	
1	15	30	15	4,7 – 5,5
2	15	30	15	2,7 – 3,0

Результаты экспериментов

Таблица 7

N обр.	pH		Масса образца, г		Масса осадка на дне сосуда, г	Общая масса восстановленного никеля, г	Толщина покрытия, мкм
	начальное	конечное	до нанесения покрытия	После нанесения покрытия			
1							
2							

Эксперимент N3. Определение влияния температуры раствора на процесс никелирования

Эксперимент проводят с электролитом N1 или N2 (по заданию преподавателя) при температуре 60 °С и 97 °С. Материал катодов - сталь, образцы готовятся аналогично.

Эксперимент N4. Определение влияния повторного никелирования на качество полученного покрытия

Эксперимент проводят с электролитом N1 или N2 (по заданию преподавателя) при температуре 60° или 97° С. Катоды – очищенный стальной и стальной, покрытый никелем. При подготовке последнего катода не проводить очистку наждачной бумагой и не выполнять операции 3-6 (см. работу № 1).

По окончании эксперимента промытые и высушенные образцы вновь взвешивают на теххимических и аналитических весах. По увеличению массы катода рассчитывают толщину покрытия, а, следовательно, скорость процесса. Качество осадков оценивают визуально, а также определяют по-

¹ Подкисление электролита до нужного значения pH проводить уксусной кислотой, подщелачивание – свежесажженным карбонатом никеля с последующим фильтрованием

ристость покрытия (см. работу N1). Если на дне сосуда имеется осадок восстановленного никеля, его отфильтровывают на воронке Бюхнера, промывают, высушивают и взвешивают на аналитических весах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о химизме процесса никелирования.
2. Какие факторы и каким образом влияют на процесс химического никелирования?
3. Почему кислая среда препятствует проведению никелирования?
4. На чем основана химическая проверка качества никелевых покрытий?

ВОПРОСЫ экзаменационных билетов по курсу “Химическая технология и промышленная экология”

1. Химическая технология как наука. Связь химической технологии с другими отраслями науки.
2. Зарождение химической технологии как науки. Пять этапов в развитии химической технологии.
3. Влияние на развитие химической технологии химической термодинамики и кинетики. Деятельность В.Н. Ипатьева и Н.Н. Семёнова.
4. Понятие химико-технологической системы. Элементы ХТС. Связь между ними. Материальный и тепловой балансы ХТС.
5. ХТП и его содержание. Классификация ХТП.
6. Экономические и технологические критерии эффективности ХТП. Капитальные и приведённые затраты, себестоимость продукции, производительность труда.
7. Степень превращения исходного реагента, выход продукта, полная и дифференциальная селективность.
8. Понятия анергии, эксергии. Виды эксергии. Отличия энергии и эксергии. Для чего используется эксергия в химической технологии?
9. Понятие «внутренней» энтропии. Выражение 2-го закона термодинамики для реальных технологических систем. Источники внутренней энтропии в ХТС.
10. Термодинамический эксергетический анализ ХТС. Потери эксергии: причины и расчёт. Эксергетический КПД. Меры повышения степени термодинамического совершенства ХТС.
11. Сырьевая база химической и металлургической промышленности. Классификация видов сырья.
12. Комплексное и рациональное использование природного сырья. Вторичные материальные ресурсы, основные направления их переработки.
13. Использование атмосферного воздуха (его составляющих) в химической промышленности.
14. Вода. Эффективность ее использования в технологических процессах.
15. Энергетическая база химической промышленности. Использование тепловой, электрической и механической видов энергии. Рекуператоры, регенераторы, котлы-утилизаторы.
16. Массообмен. Примеры массообменных процессов. Массоотдача и массоперенос.
17. Диффузия. Виды диффузии. Уравнения, описывающие диффузию.
18. Классификация массообменных аппаратов. Пути интенсификации массообменных процессов.
19. Простая перегонка и ректификация. Организация процесса ректификации в химической технологии.

20. Материальный баланс ректификационной колонны периодического и непрерывного действия.
21. Аппаратура, используемая в массообменных процессах в системе «газ-жидкость». Типы тарелок.
22. Азеотропная и экстрактивная ректификации. Ректификация под вакуумом.
23. Процесс экстракции. Основные положения. Терминология. Экстракционная аппаратура. Ее классификация.
24. Расчёт основных параметров экстракции аналитическим и графическим методами.
25. Оборудование для проведения процесса ректификации в химической технологии.
26. Процесс сорбции. Адсорбция и абсорбция. Основные положения. Термодинамика адсорбции. Изотерма адсорбции. Модель Ленгмюра для описания процесса адсорбции.
27. Процесс кристаллизации. Термодинамика и кинетика кристаллизации. Методы кристаллизации. Аппаратура для проведения процесса кристаллизации.
28. Направленная кристаллизация и зонная плавка. Основные принципы выращивания монокристаллов из растворов и расплавов.
29. Принципы обогащения твёрдого, жидкого и газообразного видов сырья. Грохочение, гравитационное разделение, магнитная сепарация, флотационные процессы.
30. Процессы выщелачивания (экстрагирования) и растворения в системах «твёрдое - жидкость». Факторы, влияющие на данные процессы.
31. Организация процесса экстрагирования в химической технологии.
32. Ионный обмен. Основные положения. Терминология. Равновесие ионного обмена.
33. Типы сорбентов. Органические и неорганические иониты. Основные методы их получения.
34. Использование ионного обмена в химической технологии. Аппаратурное оформление процесса ионного обмена.
35. Подготовка сырья и физико-химические основы производства серной кислоты. Аппаратура для производства серной кислоты контактным методом.
36. Нитрозный способ производства серной кислоты. Переработка отходов сернокислотного производства.
37. Производство фосфорной кислоты экстракционным и термическим методами.
38. Производство простого и двойного суперфосфата.
39. Технология связанного азота. Физико-химические и технологические особенности производства аммиака.

40. Физико-химические и технологические особенности производства азотной кислоты.
41. Производство азотных удобрений: нитрата аммония, карбамида. Производство сложных удобрений.
42. Производство кальцинированной соды по методу Леблана, аммиачно-хлоридным методом и из нефелина.
43. Особенности электрохимических производств. Законы Фарадея, электролиз. Получение каустической соды и хлора диафрагменным и ртутным методами.
44. Производство глинозема и алюминия. Экологические проблемы этих производств.
45. Получение чистого алюминия методом электролитического рафинирования.
46. Классификация промышленных загрязнений биосферы. Источники загрязнений.
47. Состав, свойства и классификация промышленных сточных вод. Понятия о ПДК, ПДВ, ОБУВ и других критериях промышленных загрязнений. Виды ПДК, недостатки этого показателя.
48. Защита атмосферы от промышленных загрязнений (аэрозоли, газовые выбросы). Методы обезвреживания выбросов. Примеры.
49. Защита гидросферы от промышленных загрязнений. Методы очистки сточных вод.
50. Защита литосферы от промышленных загрязнений. Методы обезвреживания твёрдых отходов. Примеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Гальперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2 т. М: Химия, 1991. Т.1,2.
2. Кутепов А.М. и др. Общая химическая технология. М.: Высш.шк., 1990. 520 с.
3. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1985. 447 с.
4. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 490 с.
5. Основы химической технологии / Под ред. И.П.Мухленова . М.: Высш.шк., 1983. 336 с.
6. Химико-технологические системы: Синтез, оптимизация и управление/ Под ред. И.П.Мухленова. Л.: Химия, 1986. 442 с.
7. Физико-химические основы металлургических процессов / Под ред. А.А.Жуховицкого и др. М.: Металлургия, 1973. 392 с.

8. Девярых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Глубокая очистка веществ. М.: Высш.шк., 1990. 192 с.

Дополнительная

1. Вольфович С.И. и др. Общая химическая технология: В 2 т. М.; Л.: Госхимиздат. Т.1, 1952; Т.2, 1959.
2. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. М.: Химия, 1982. 288 с.
3. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969. 620 с.
4. Шервуд Т. и др. Массопередача. М.: Химия, 1982. 695 с.
5. Шпильрайн Э.Э. и др. Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
6. Берд Р. и др. Явления переноса. М.: Химия, 1974. 687 с.
7. Вольфович С.И. и др. Общая химическая технология: В 2т. М.; Л.: Госхимиздат. Т.1, 1952. Т. 2, 1959.
8. Кочетков В.Н. Технология комплексных удобрений. М.: Химия, 1971. 200 с.
9. Жданов В.П. Элементарные физико-химические процессы на поверхности. - Новосибирск: Наука, 1988. 321 с.
10. Деверо О.Ф. Проблемы металлургической термодинамики. М.: Металлургия, 1986. 424 с.
11. Глазов В.М., Павлова Л.М. Химическая термодинамика и фазовые равновесия. М.: Металлургия, 1988. 560 с.
12. Машины и аппараты химических производств / Под ред. И.И. Поникарова и др. М.: Машиностроение, 1989. 368 с.
13. Основы жидкостной экстракции/ Под ред. Г.А. Ягодина и др. М.: Химия, 1981. 400 с.
14. Гриссбах Р. Теория и практика ионного обмена. М.: Иностран. лит., 1963. 499 с.

Химическая технология

Составители: Геннадий Леонидович Пашков
Светлана Васильевна Сайкова

Редактор: И.А.Вейсиг
Корректор: Т.Е.Бастрыгина

Тиражируется на электронных носителях

Заказ 465

Дата выхода 31.01.07

Адрес в Internet: www.lan.krasu.ru/studies/editions

Отдел информационных ресурсов управления информатизации КрасГУ

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ауд. 22-05, e-mail:

info@lan.krasu.ru

Издательский центр Красноярского государственного университета

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: rio@lan.krasu.ru