

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова

С.А. Крылова
З.И. Костина
И.В. Понурко
А.В. Горохов

**МАТЕРИАЛЬНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2011

УДК 66.0 (075.8)

Рецензенты:

Заведующая кафедрой химии и методики преподавания химии
Челябинского государственного педагогического университета,
доктор химических наук
С.Г. Левина

Начальник коксохимической лаборатории ЦЛК ОАО «ММК»
А.Ю. Рослый

Крылова С.А., Костина З.И., Понурко И.В., Горохов А.В.

Материальные и тепловые расчеты химико-технологических процессов: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2011. 50 с.

Содержатся основные сведения, примеры и рекомендации для выполнения химико-технологических расчетов на практических занятиях и в курсовой работе. В конце пособия приведено приложение, содержащее справочные таблицы, необходимые при выполнении расчетов.

Предназначено для студентов специальностей 240403, 240304, 050101 высших учебных заведений, изучающих дисциплины «Общая химическая технология» и «Прикладная химия».

УДК 66.0 (075.8)

© Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И. Носова, 2011

© Крылова С.А., Костина З.И.,
Понурко И.В., Горохов А.В., 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РАСЧЕТ РАСХОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ	4
Задачи для самостоятельного решения	6
2. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА	8
Задачи для самостоятельного решения	13
3. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА	15
Задачи для самостоятельного решения	23
4. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ АММОФОСА	26
Задания для самостоятельного расчета	33
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	33
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	
Стандартная энтальпия образования некоторых веществ ΔH_f^0 (кДж/моль)	34
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	
Удельная теплоемкость жидких веществ	35
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	
Удельная теплоемкость твердых веществ	36
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	
Температурная зависимость средней мольной теплоемкости газов	37
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	
Средняя мольная теплоемкость газов от 0 до $t^\circ\text{C}$ при нормальном давлении	38
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	
Энтальпия газов при различных температурах и нормальном давлении (по отношению к 0°C)	40
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	
Теплота сгорания органических соединений при 18°C и нормальном давлении	42
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	
Давление насыщенного водяного пара при различных температурах	43
ПРИЛОЖЕНИЕ 9	
Свойства серной кислоты	44
ПРИЛОЖЕНИЕ 10	
Свойства олеума	47
ПРИЛОЖЕНИЕ 11	
Теплоёмкость водных растворов азотной кислоты	50

ВВЕДЕНИЕ

При осуществлении проектно-конструкторской деятельности перед инженером стоят задачи проектирования новых технологических схем, выбора технологических параметров, расчета и выбора оборудования.

Прежде чем приступить к конструированию какого-либо аппарата химического производства (холодильника, теплообменника, реактора и т.д.), необходимо произвести подробный технoхимический расчет всего процесса производства или той его части, которая непосредственно связана с конструируемым аппаратом. В основу любого технoхимического расчета положены два основных закона: закон сохранения массы вещества и закон сохранения энергии. На первом из них базируется материальный, на втором – энергетический и, в частности, тепловой балансы.

Материальные расчеты являются основой технологических расчетов. Они включают в себя определение выхода основного и побочного продуктов, расходных коэффициентов. Тепловые расчеты позволяют определить расход топлива или другого вида энергии для производства заданного количества продукта. Только определив материальные и тепловые потоки, можно произвести конструктивные расчеты производственного оборудования и коммуникаций, оценить экономическую эффективность и целесообразность процесса. Материальные и тепловые балансы рассчитываются также и на действующем производстве с целью его контроля и регулирования (особенно после ремонтов и при изменении технологических режимов).

Для выпускников специальностей 240403, 240304 умение производить данные расчеты является одним из показателей квалификации инженера. Для выпускников квалификации «Учитель химии с дополнительной специальностью» курс «Прикладная химия» должен обеспечить подготовку высококвалифицированных учителей химии, способных излагать в школе вопросы химической технологии на современном научном уровне и владеющих навыками выполнения основных технoхимических расчетов.

1. РАСЧЕТ РАСХОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

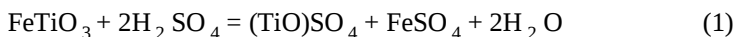
Расходные коэффициенты – величины, характеризующие расход различных видов сырья, воды, топлива, электроэнергии, пара на единицу вырабатываемой продукции.

Теоретические расходные коэффициенты учитывают стехиометрические соотношения, по которым происходят химические превращения.

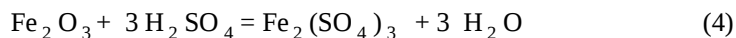
Практические расходные коэффициенты учитывают не только стехиометрические соотношения, но и производственные потери на всех стадиях процесса, а также возможные побочные реакции.

Пример 1. Рассчитать расходные коэффициенты ильменитовой руды и 80% серной кислоты (с 50% избытком от теоретического количества) для получения 1 т TiO_2 , если содержание титана в руде составляет 24,3% (мас.), а степень разложения FeTiO_3 – 89%. В состав ильменитовой руды входят FeTiO_3 и Fe_2O_3 .

Получение TiO_2 идет по следующим реакциям:



Fe_2O_3 также реагирует с H_2SO_4 (побочная реакция):



Решение

Найдем содержание Ti в чистом ильмените:

$$1 \text{ моль } \text{FeTiO}_3 - 1 \text{ моль Ti}$$

$$\text{или } 152 \text{ кг } \text{FeTiO}_3 - 48 \text{ кг Ti.}$$

$$\omega(\text{Ti}) = \frac{48}{152} 100 = 31,5\%.$$

По условию содержание Ti в руде составляет 24,3%.

Найдем содержание FeTiO_3 в руде:

$$\begin{array}{rcl} 31,5 - 100\% & & \\ 24,3 - x & , & x = 78\% \end{array}$$

Значит, Fe_2O_3 в руде содержится $100 - 78 = 22\%$.

Расход FeTiO_3 для получения 1 т TiO_2 по реакциям (1)–(3) составляет:

$$1 \text{ кмоль } \text{FeTiO}_3 - 1 \text{ кмоль } \text{TiO}_2$$

$$152 \text{ кг } \text{FeTiO}_3 - 80 \text{ кг } \text{TiO}_2$$

$$x - 1000 \text{ кг}, \quad x = 1900 \text{ кг.}$$

С учетом степени разложения: $1900: 0,89 = 2130 \text{ кг}$,

с учетом состава руды: $2130: 0,78 = 2731 \text{ кг}$.

Расход H_2SO_4 :

- по реакции (1):

$$\begin{array}{rcl}
 1 \text{ моль } \text{FeTiO}_3 & - & 2 \text{ моль } \text{H}_2\text{SO}_3 \\
 152 \text{ кг} & - & 2 \cdot 196 \text{ кг} \\
 1900 \text{ кг} & - & x, \quad x = 2450 \text{ кг};
 \end{array}$$

- по реакции (4):

$$\begin{array}{rcl}
 1 \text{ моль } \text{Fe}_2\text{O}_3 & - & 3 \text{ моль } \text{H}_2\text{SO}_4 \\
 160 \text{ кг} & - & 294 \text{ кг} \\
 (2731 \cdot 0,22) \text{ кг} & - & x, \quad x = 1104 \text{ кг}
 \end{array}$$

Всего $2450 + 1104 = 3554 \text{ кг}$.

С учетом 50%-го избытка от теоретического:

$$3554 \cdot 1,5 = 5331 \text{ кг}.$$

С учетом 80% концентрации:

$$5331 : 0,8 = 6664 \text{ кг}$$

Ответ: руды 2731 кг, кислоты 6664 кг.

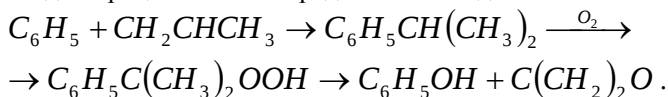
Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать расходный коэффициент алунитовой руды, содержащей 22% Al_2O_3 для получения 1 т алюминия, если потери алюминия на всех стадиях производства составляют 10% (масс.)

Алунит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($M=828 \text{ г/моль}$).

2. Рассчитать расходные коэффициенты бензола и пропан-пропиленовой фракции газов крекинга (30 об.% пропилена и 70 об.% пропана) для производства 1 т фенола, если выход изопропилбензола из бензола составляет 90% от теоретического, фенола из изопропилбензола – 93%.

Стадии процесса можно представить в виде схемы:



3. Определить расходные коэффициенты в производстве карбида кальция (техн.), содержащего (мас.%): CaC_2 – 79, CaO – 12, C – 4, прочие примеси – 5. Известь содержит 96% CaO . Содержание (%) в коксе: золы – 4, летучих – 4, влаги – 3.



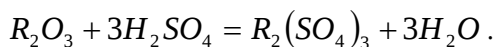
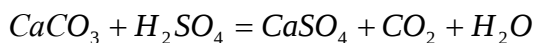
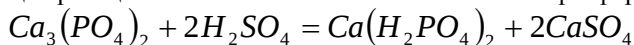
4. Рассчитать расходные коэффициенты для соляно-сульфатного производства (на 1 т Na_2SO_4) и количество получающегося при этом хлороводорода, если в производстве используется поваренная соль, содержащая 95 % NaCl , и купоросное масло, содержащее 93% H_2SO_4 . Степень разложения NaCl составляет 94%.

5. Определить расход технического карбида кальция, содержащего 80% CaC_2 , для получения 1000 л ацетилена, если степень разложения CaC_2 составляет 0,93.

6. Какие объемы растворов серной кислоты с концентрациями 74,0 и 95,0% необходимо взять для приготовления 38 т 80,0%-ной кислоты?

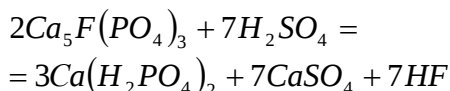
7. Рассчитать расход серной кислоты на 1 кг фосфорита для получения суперфосфата, содержащего 25,5% P_2O_5 , 4,1% CO_2 и 5,9% R_2O_3 .

При разложении фосфоритов серной кислотой протекают следующие реакции с основными составными частями фосфоритов:

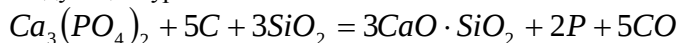


8. При обжиге 1 т известняка образуется 170 м³ диоксида углерода. Содержание $CaCO_3$ в известняке 95 %. Определить степень разложения известняка и его расход на 1000 м³ CO_2 при данных условиях и при полном разложении $CaCO_3$.

9. Рассчитать объем 65%-ной серной кислоты (плотностью 1,56 г/л) с 10% избытком от теоретического, требуемый для разложения 100 кг апатитового концентрата (содержащего 40% P_2O_5) по реакции:

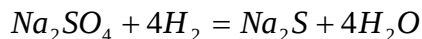


10. Рассчитать расход реагентов для получения 1 т фосфора путем восстановления его из фосфоритного концентрата, если процесс описывается следующим уравнением:



Содержание P_2O_5 в концентрате 28%. Кокс содержит 94% углерода. Степень восстановления фосфора 0,85.

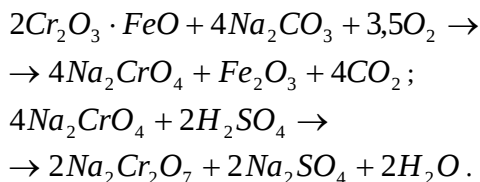
11. Рассчитать расход технического сульфата натрия (содержание Na_2SO_4 – 95%) и электролитического водорода (содержание H_2 – 97%(масс.)) на 1 т технического сульфида натрия (содержание Na_2S – 96%), получающегося по реакции:



На побочные реакции расходуется 2% сульфата натрия и водорода от теоретически необходимого количества для получения 1т технического продукта.

12. Сухой конвертированный газ состава (об.%): CO_2 – 28,0; CO – 3,0; H_2 – 51,4; N_2 – 16,8; $(O_2 + CH_4)$ – 0,5; H_2S – 0,3 подвергается полной очистке от CO_2 , H_2S и CO . Рассчитать: а) состав газа после очистки; б) количество элементарной серы, получающейся из 1000 м³ сухого газа, если очистку его от H_2S вести с утилизацией серы.

13. Рассчитать массу дихромата натрия, которую можно теоретически получить из 1 кг хромистого железняка, содержащего 70% $Cr_2O_3 \cdot FeO$, если процесс выражается следующими уравнениями:



14. Анализ нефелиноапатитовой руды показал, что она содержит 20,6% P_2O_5 и 8,0% Al_2O_3 . Рассчитать содержание в руде апатита и нефелина, если их химические формулы выражаются соответственно: $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaCl_2 \cdot 2CaF_2$ и $Na_2O \cdot K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ и если весь P_2O_5 в руде связан в виде апатита, а Al_2O_3 – в виде нефелина.

15. Сухой коксовый газ имеет следующий состав (об.%):

H_2 – 56,0; CH_4 – 25,5; C_nH_m – 2,5; CO – 7,0; CO_2 – 2,6; O_2 – 0,7; N_2 – 5,7. Рассчитать количество воздуха для полного сгорания этого газа, если коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,2$ и состав продуктов сгорания.

2. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

Основой технологических расчетов являются расчеты материальных потоков при протекании химико-технологических процессов.

Материальный баланс отражает закон сохранения массы вещества: во всякой замкнутой системе масса веществ, вступивших в реакцию, равна массе веществ, получившихся в результате реакции. Применительно к материальному балансу любого технологического процесса это означает, что масса веществ, поступивших на технологическую операцию, – **приход** равна массе всех веществ, получившихся в результате ее, – **расход**.

Материальный баланс процессов с участием химических реакций составляется по уравнению основной суммарной реакции с учетом параллельных и побочных реакций.

Предположим, что технологический процесс основан на химической реакции, которая протекает по схеме:



где B, F, D – исходное сырье;
E – основной продукт;
L – побочный продукт;
b, f, d, e, l – стехиометрические коэффициенты.

Материальный баланс чаще всего составляют на единицу массы (кг, т) основного продукта. Это значит, что для получения m_E (кг) основного продукта необходимо израсходовать m_B , m_F и m_D (кг) сырья. При этом неизбежно получается m_L (кг) побочного продукта. Тогда уравнение материального баланса будет иметь следующий вид:

$$m_B + m_F + m_D = m_E + m_L + m_{\text{пот}},$$

где $m_{\text{пот}}$ – непроизводительные затраты сырья и готового продукта, которые обусловлены неполнотой химических превращений, а также механическими потерями при транспортировке и хранении сырья и готового продукта.

Материальный баланс, чаще всего, представляют в виде таблиц (табл. 1), которые включают приходную и расходную части.

Таблица 1

Материальный баланс

Приход					Расход				
Статья	кг	м ³	кмоль	%	Статья	кг	м ³	кмоль	%
B	m_B				E	m_E			
F	m_F				L	m_L			
D	m_D				потери	$m_{\text{пот}}$			
Итого:					Итого:				

Пример 1. Составить материальный баланс процесса кристаллизации медного купороса: раствор CuSO_4 охлаждается со 100 до 20°C. Растворимость CuSO_4 (г/100 г H_2O) равна 75 (при 100°C) и 20,7 (при 20°C). Твердая фаза выпадает в виде $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Расчет вести на 1 кг исходного раствора.

Решение

Начальная концентрация раствора (при 100°C)

$$C^n = \frac{75}{75 + 100} \cdot 100 = 42,86\%.$$

Конечная концентрация маточного раствора (при 20°C)

$$C^к = \frac{20,7}{20,7 + 100} \cdot 100 = 17,15\%.$$

Пусть из 1 кг исходного раствора получится x кг твердой фазы, тогда масса маточного раствора будет $(1-x)$ кг.

Масса $CuSO_4$ в исходном растворе

$$m^0 = 1 \cdot 0,4286 = 0,4286 \text{ кг}.$$

Масса $CuSO_4$ в составе твердой фазы m_1 :

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ кмоль } CuSO_4 & - & 1 \text{ кмоль } CuSO_4 \cdot 5H_2O \\ 159 \text{ кг} & & - 249 \text{ кг} \\ m_1 \text{ кг} & & - x \text{ кг} \end{array}$$

$$m_1 = \frac{159x}{249} = 0,6386x.$$

Масса $CuSO_4$ в маточном растворе m_2 :

$$m_2 = 0,1715(1 - x) \text{ кг};$$

$$m^0 = m_1 + m_2;$$

$$0,4286 = 0,6386x + 0,1715(x - 1);$$

$$x = 0,55 \text{ кг}.$$

Результаты расчетов представим в виде таблицы (табл. 2).

Таблица 2

Материальный баланс процесса кристаллизации медного купороса

Приход	кг	Расход	кг
Исходный раствор	1,00	Твердая фаза $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0,55
		Маточный раствор	0,45
ИТОГО	1,00	ИТОГО	1,00

Пример 2. Составить материальный баланс окисления аммиака (на 1 т азотной кислоты). Степень окисления NH_3 до NO – 0,97; до N_2 – 0,03; NO до NO_2 – 1,00. Степень абсорбции 0,92. Содержание аммиака в сухой аммиачно-воздушной смеси 7,13% (масс.). Воздух насыщен парами воды при 30°C. Относительная влажность 80%.

Решение

Окисление аммиака идет по основной реакции



и по побочной:



Балансовое уравнение производства HNO_3 из NH_3



Определим расход аммиака на 1 т HNO_3 :

в соответствии с уравнением (3)

$$1 \text{ кмоль } NH_3 - 1 \text{ кмоль } HNO_3$$

$$17 \text{ кг } NH_3 - 63 \text{ кг } HNO_3$$

$$x \quad - 1000 \text{ кг}, \quad x = 269,8 \text{ кг}$$

с учетом потерь на стадиях окисления и абсорбции

$$m(NH_3) = \frac{269,8}{0,97 \cdot 0,92} = 302,3 \text{ кг}.$$

Расход сухого воздуха на 1 т HNO_3 :

$$302,3 \text{ кг } NH_3 - 7,13\%$$

$$x \text{ кг воздуха} - (100 - 7,13), \quad x = 3937,5 \text{ кг}$$

$$V_{\text{сух}} = \frac{3937,5}{29} \cdot 22,4 = 3041,7 \text{ м}^3,$$

в том числе:

$$O_2: 3041,7 \cdot 0,21 = 638,7 \text{ м}^3 (912,4 \text{ кг});$$

$$N_2: 3041,7 \cdot 0,79 = 2402,7 \text{ м}^3 (3003,4 \text{ кг}).$$

С воздухом поступает вода:

$$V(H_2O) = \frac{V_{\text{сух}} \cdot P_{H_2O}}{(P - P_{\text{нас}})},$$

где P – атмосферное давление, Па; $P_{нас}$ – давление насыщенного водяного пара (при температуре t), Па; P_{H_2O} – парциальное давление паров воды (при температуре t и относительной влажности h), Па.

$$P_{H_2O} = P_{нас} \cdot h = 4,22 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 3,37 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

$$V(H_2O) = \frac{3041,4 \cdot 3,37 \cdot 10^3}{(101,3 - 4,22) \cdot 10^3} = 105,6 \text{ м}^3 (84,8 \text{ кг}).$$

По реакции (1) определим:

- образуется NO :

$$m(NO) = \frac{302,3 \cdot 0,97 \cdot 30}{17} = 517,5 \text{ кг};$$

- образуется H_2O :

$$m(H_2O) = \frac{(302,3 \cdot 0,97) \cdot 6 \cdot 18}{17 \cdot 4} = 465,7 \text{ кг};$$

- расходуется O_2 :

$$m(O_2) = \frac{(302,3 \cdot 0,97) \cdot 5 \cdot 32}{17 \cdot 4} = 690 \text{ кг};$$

по реакции (2):

- образуется N_2 :

$$m(N_2) = \frac{(302,3 \cdot 0,03) \cdot 2 \cdot 28}{17 \cdot 4} = 7,5 \text{ кг};$$

- образуется H_2O :

$$m(H_2O) = \frac{(302,3 \cdot 0,03) \cdot 6 \cdot 18}{17 \cdot 4} = 14,4 \text{ кг};$$

- расходуется O_2 :

$$m(O_2) = \frac{(302,3 \cdot 0,03) \cdot 3 \cdot 32}{17 \cdot 4} = 12,8 \text{ кг.}$$

Результаты расчетов представим в виде таблицы (табл.3).

Таблица 3

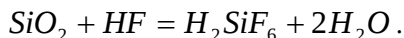
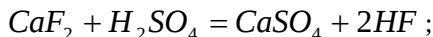
Материальный баланс процесса окисления аммиака

Приход	кг	Расход	кг
NH_3	302,3	NO	517,5
O_2	912,4	O_2	$912,4 - 690 - 12,8 = 209,6$
N_2	3003,4	N_2	$3003,4 + 7,5 = 3010,9$
H_2O	84,8	H_2O	$84,8 + 465,7 + 14,4 = 564,9$
Итого	4303	Итого	4303

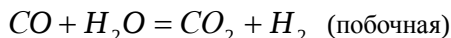
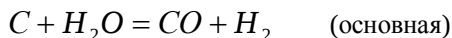
Задачи для самостоятельного решения

1. Составить материальный баланс процесса кристаллизации, если в процесс поступает 1000 кг 95%-ного раствора (плава) аммиачной селитры. Готовый продукт содержит 99,8% NH_4NO_3 и 0,2% влаги.

2. Составить материальный баланс производства фтороводорода (на 1 т HF) из плавикового шпата, содержащего (мас.%): CaF_2 – 97, SiO_2 – 3. Степень разложения шпата 0,96. Для разложения применяют 94%-ую H_2SO_4 с 10%-ным избытком от теоретического. Разложение идет по реакциям:

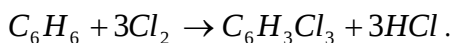
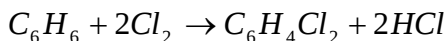
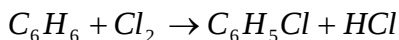


3. Составить материальный баланс процесса газификации 1т кокса (содержащего 96% С и 4% H_2O по массе) с водяным паром. Полученный газ содержит 6% (об.) CO_2 . Процесс газификации протекает по реакциям:



4. Составить материальный баланс контактного аппарата для каталитического окисления SO_2 в SO_3 (по реакции $SO_2 + 0,5O_2 = SO_3$) производительностью 10000 м³/ч исходного газа следующего состава (об. %): SO_2 – 8,0; O_2 – 13,0; N_2 – 79. Степень окисления SO_2 в SO_3 равна 0,97.

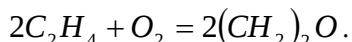
5. Составить материальный баланс хлоратора в производстве хлорбензола (на 1 т). Содержание жидких продуктов (мас.%): бензола – 65,0; хлорбензола – 31,5; дихлорбензола – 3,0; трихлорбензола – 0,5. Технический бензол содержит 97,5% (масс.) C_6H_6 , технический хлор 98%(масс.) Cl_2 . Хлорирование идет по реакциям:



6. Составить материальный баланс нейтрализатора для получения аммиачной селитры производительностью 20 т NH_4NO_3 в час. В про-

изводстве применяется 47%-ная азотная кислота и 100%-ный газообразный аммиак. Потери кислоты и аммиака составляют 1% от теоретически необходимого количества. Из нейтрализатора селитра выходит в виде 60% раствора NH_4NO_3 .

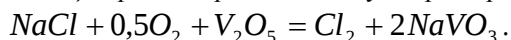
7. Составить материальный баланс производства оксида этилена прямым каталитическим окислением этилена воздухом. Состав исходной газовой смеси (об.%): этилен – 3,5; воздух – 96,5. Степень окисления этилена 0,55. Расчет вести на 1 т оксида этилена. Процесс окисления идет по реакции



8. Рассчитать материальный баланс производства хлора методом электролиза водного раствора хлорида натрия по реакции: $2NaCl + 2H_2O = 2NaOH + Cl_2 + H_2$. Концентрация $NaCl$ в растворе 300 г/л. Плотность раствора при условиях электролиза 1,17 кг/л. Степень разложения 50%. Побочные процессы не учитывать. Расчет вести на 1000 м³ хлора.

9. Составить материальный баланс нитратора в расчете на 1 т продукта – нитробензола. Выход нитробензола 97% от теоретического. Состав нитрующей смеси (мас.%): HNO_3 – 21; H_2SO_4 – 59; H_2O – 20. Расход нитрующей смеси – 4 кг на 1 кг бензола. Процесс идет по реакции: $C_6H_6 + HNO_3 = C_6H_5NO_2 + H_2O$.

10. Составить материальный баланс печи окислительного обжига в производстве ванадата натрия $NaVO_3$. Сырье: ванадиевый шлак, содержащий 15% (мас.%) V_2O_5 , воздух, $NaCl$ (расход $NaCl$ 11% от массы шлака). Процесс протекает по суммарной реакции



11. Составить материальный баланс печи для обжига колчедана производительностью 32 т/сут. Колчедан содержит 43,5% серы. Расход воздуха на 50% больше теоретического. Выход оксида серы (IV) составляет 97%. Расчет вести на производительность кг/ч.

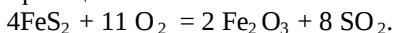
12. Составить материальный баланс печи для сжигания серы кислородом воздуха. Сырье содержит (мас. доли): S – 0,996, H_2O – 0,002, зола – 0,002. Обжиговый газ содержит 12%(об.) SO_2 . Расчет вести на производительность по моногидрату 900 т/сут.

13. Составить материальный баланс дистилляции плава мочевины 1 ступени. Состав плава (кг): мочевина – 12000, карбамат аммония – 8000, аммиак (свободный) – 7000, NH_4OH – 13000, прочие газы – 100.

Степень отгонки аммиака – 0,9, степень разложения карбамата аммония – 0,9, содержание водяных паров в газовой фазе, выходящей из колонны – 0,03 (мас.). Карбамат аммония разлагается по следующей реакции:
$$NH_2COONH_4 = CO_2 + 2NH_3.$$

14. Составить материальный баланс дистилляции плава мочевины 2 ступени. Состав плава – материальный баланс 1 ступени (задача 13). Давление в колонне $3 \cdot 10^5$ Па, температура 110°C , содержание водяных паров в газовой фазе – 0,03 (от объема сухих газов), потери мочевины за счет разложения по реакции $CO(NH_2)_2 + H_2O = NH_2COONH_4$ составляет 500 кг. Разложение карбамата аммония, отгонка аммиака и двуокиси углерода из плава полные.

15. Составить материальный баланс сжигания колчедана (на 1000 кг). Для сжигания используется сухой воздух. Колчедан содержит 41% (масс.) S, а огарок – 0,5%(мас.). Влажность колчедана 7,4%. Концентрация SO_2 в обжиговом газе 10%(об.). Процесс протекает согласно суммарной реакции



3. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Энергетический баланс составляют на основе закона сохранения энергии: в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна.

Обычно в химико-технологических процессах составляется **тепловой баланс**, в соответствии с которым **приход теплоты** в данном процессе (аппарате) должен быть точно **равен ее расходу**: $\Sigma Q_{\text{пр}} = \Sigma Q_{\text{расх.}}$

Приход теплоты определяется по уравнению

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ф}} + Q_{\text{р}} + Q_{\text{ф.п}} + Q_{\text{о}},$$

где $Q_{\text{ф}}$ – физическая теплота материалов, поступающих в процесс или в аппарат;

$Q_{\text{р}}$ – теплота, выделяющаяся в результате экзотермических реакций;

$Q_{\text{ф.п.}}$ – теплота, выделяющаяся в результате физического превращения вещества (абсорбции, конденсации, кристаллизации и т.п.);

$Q_{\text{о}}$ – теплота, подводимая извне, например обогрев.

Расход теплоты определяется по уравнению

$$Q_{\text{расх}} = Q'_{\text{ф}} + Q'_{\text{р}} + Q'_{\text{ф.п}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{отв}},$$

где $Q'_{\text{ф}}$ – физическая теплота продуктов, выходящих из аппарата;

Q'_p – теплота, затраченная на эндотермическую реакцию;
 $Q'_{ф.п}$ – теплота, поглощенная в результате физического превращения вещества (плавление, испарение, десорбция и т.п.);
 $Q'_п$ – потери теплоты в окружающее пространство;
 $Q_{отв}$ – теплота, отводимая из процесса.

Величины $Q_{ф}$ и $Q'_{ф}$ рассчитывают для каждого вещества, поступающего в процесс и выходящего из него, по формуле:

$$Q_{ф} = m \cdot c \cdot t,$$

где m – масса (объем, количество) вещества (кг, м³, кмоль);
 c – средняя удельная теплоемкость вещества (кДж/(кг·К), кДж/(м³·К), кДж/(кмоль·К);
 t – температура, отсчитанная от какой-либо точки (обычно от 0°С).

Теплоемкости газов, участвующих в процессе для данной температуры t°С (или Т К), можно вычислить по формуле:

$$C_p = a + bT + cT^2 + \dots,$$

где a, b, c – коэффициенты, которые приводятся в соответствующей справочной литературе, например [1].

На практике чаще всего приходится иметь дело со смесями веществ. Теплоемкость смеси может быть рассчитана по закону аддитивности:

$$C_{см} = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_i c_i}{(m_1 + m_2 + \dots + m_i)},$$

где $m_1, m_2, \dots, m_i$ – массы отдельных компонентов;
 $c_1, c_2, \dots, c_i$ – теплоемкость отдельных компонентов.

Тепловой эффект реакции Q_p и Q'_p при стандартных условиях можно определить по закону Гесса как разность между энтальпиями образования ($\Delta H^0_{f,i}$) всех продуктов реакции и энтальпиями образования всех исходных веществ:

$$\Delta H^0_p = \left(\sum n_i \Delta H^0_{f,i} \right)_{\text{прод}} - \left(\sum n_i \Delta H^0_{f,i} \right)_{\text{исх}},$$

где n_i – стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции.

Для определения теплового эффекта реакции при заданной температуре можно использовать уравнение Кирхгофа:

$$(\Delta H^0_r)_T = (\Delta H^0_r)_{298} + \int_{298}^T \Delta c_p(T) dT,$$

где $\Delta c_p(T) = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \dots$ – изменение теплоемкости системы в ходе химической реакции.

Если тепловой баланс составляется на 1 т основного продукта реакции Е, то

$$Q_p = \frac{\Delta H_p^0}{e} \cdot \frac{1000}{M_E},$$

где M_E – молярная масса вещества Е;
 e – стехиометрический коэффициент в уравнении реакции перед формулой вещества Е.

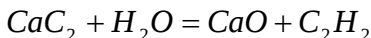
Теплота физического превращения вещества $Q_{ф.п}$ и $Q'_{ф.п}$ определяется по формуле $Q_{ф.п} = m \cdot q$,

где m – масса (объем, количество) вещества, участвующего в фазовом переходе, кг (m^3 , кмоль);
 q – удельная теплота фазового перехода вещества, кДж/кг (кДж/ m^3 , кДж/кмоль).

Тепловой баланс, так же, как и материальный, представляют в виде таблиц, включающих приходную и расходную части.

Пример 1. Рассчитать количество теплоты, выделяющегося при образовании 100 л ацетилена из карбида кальция.

Решение:



Определим тепловой эффект реакции, пользуясь справочными значениями теплоты образования веществ:

$$\Delta H_r = \Delta H_f^0(CaO) + \Delta H_f^0(C_2H_2) - \Delta H_f^0(CaC_2) - \Delta H_f^0(H_2O) =$$

$$= -635100 + 226750 + 62700 + 241840 = -103810 \text{ кДж}.$$

$$1 \text{ кмоль} \quad 22,4 \text{ м}^3 \quad - 103810 \text{ кДж}$$

$$(100 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^3 - x, \quad x = 463 \text{ кДж}$$

Ответ: выделится 463 кДж.

Пример 2. При обжиге шихты, содержащей 10 т известняка и кокс, определить:

а) расход кокса состава (мас.%): С – 91; зола – 7; влага – 2;

б) состав обжиговых газов (об.%);

в) тепловой эффект реакции обжига. Степень разложения при обжиге известняка 95%. Воздух подается с 40% избытком.

Решение:

Термическое разложение известняка идет по следующей реакции:



Тепловой эффект реакции рассчитаем по следующей формуле:

$$\Delta H_r = \Delta H_f^0(CaO) + \Delta H_f^0(CO_2) - \Delta H_f^0(CaCO_3) =$$

$$= -635100 - 393510 + 1206000 = 177390 \text{ кДж.}$$

С учетом степени разложения

$$\Delta H_r = 177390 \cdot 0,95 = 168520 \text{ кДж.}$$

Для разложения 10 т $CaCO_3$ требуется

$$\frac{168520 \cdot 10000}{100} = 16852 \cdot 10^3 \text{ кДж.}$$

Для обеспечения такого количества тепла требуется сжечь чистого

углерода:
$$\frac{16852 \cdot 10^3}{32784} = 514 \text{ кг,}$$

где 32784 – теплота сгорания углерода, кДж/кг.

Так как кокс содержит 91% C , то кокса потребуется: $514:0,91=565 \text{ кг.}$

Отходящие газы будут содержать CO_2 , O_2 , N_2 .

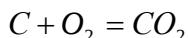
CO_2 : а) образовалось при разложении 10 т $CaCO_3$:

$$100 \text{ кг (1 кмоль)} CaCO_3 - 22,4 \text{ м}^3 CO_2$$

$$10000 \text{ кг} - x, \quad x = 2240 \text{ м}^3.$$

С учетом степени разложения $CaCO_3$: $2240 \cdot 0,95 = 2128 \text{ м}^3$;

б) в результате сгорания кокса в печи по реакции:



$$12 \text{ кг } C - 22,4 \text{ м}^3$$

$$514 \text{ кг} - x, \quad x = 959 \text{ м}^3$$

Всего $2128 + 959 = 3087 \text{ м}^3$

O_2 : - для сгорания C требуется O_2 :

$$12 \text{ кг } C - 22,4 \text{ м}^3$$

$$514 \text{ кг} - x, \quad x = 959 \text{ м}^3$$

- всего поступает O_2 с учетом избытка воздуха:

$$959 \cdot 1,4 = 1342,6 \text{ м}^3$$

- осталось O_2 : $1342,6 - 959 = 383,6 \text{ м}^3$

N_2 : - поступает с воздухом:

$$1342,6 \text{ м}^3 O_2 - 21 \text{ об. } \% O_2$$

$$x - 79 \text{ об. } \% N_2, \quad x = 5051 \text{ м}^3.$$

Состав обжиговых газов сведем в таблицу (табл. 4).

Таблица 4

Состав обжиговых газов

Компонент	м ³	% (об.)
CO ₂	959	15,0
O ₂	383,6	6,0
N ₂	5051	79,0
ИТОГО	6393,6	100

Теплота растворения

В научно-технической литературе различают 3 вида теплоты растворения:

- *интегральную*, когда 1 моль вещества растворяется в бесконечно большом количестве молей ($n \rightarrow \infty$) растворителя;
- *дифференциальную*, когда 1 моль вещества растворяется в бесконечно большом количестве уже готового раствора концентрации 1:n;
- *полную теплоту растворения*, когда 1 моль вещества растворяется в n моль растворителя, причем величина n отвечает насыщенному раствору.

В технологических расчетах чаще всего используется интегральная теплота растворения, для вычисления которой пользуются следующими эмпирическими формулами:

а) для соляной кислоты: $HCl + (n+1)H_2O$

$$q_p = \left(\frac{50,1 \cdot n}{n+1} + 22,5 \right) \text{кДж/моль}; \quad (1)$$

б) для серной кислоты: $H_2SO_4 + nH_2O$

$$q_p = \left(\frac{74,8 \cdot n}{n+1,7983} \right) \text{кДж/моль}; \quad (2)$$

в) для азотной кислоты: $HNO_3 + nH_2O$

$$q_p = \left(\frac{37,6 \cdot n}{n+1,737} \right) \text{кДж/моль}. \quad (3)$$

Пример 1. Рассчитать, сколько теплоты выделится при растворении 100 г моногидрата H_2SO_4 в 200 см³ воды?

Решение:

Рассчитаем, сколько моль воды приходится на 1 моль H_2SO_4 .

$$n(H_2SO_4) = \frac{m}{M} = \frac{100}{98} = 1,02 \text{ моль};$$

$$n(H_2O) = \frac{m}{M} = \frac{200}{18} = 11,11 \text{ моль};$$

$$n(H_2O) : n(H_2SO_4) = 11,11 : 1,02 = 10,89 : 1.$$

Подставим это значение в формулу (2), получим

$$q_p = \frac{74,8 \cdot 10,89}{10,89 + 1,7983} = 64,3 \text{ кДж/моль}.$$

Пример 2. Определить теплоту растворения H_2SO_4 в готовом растворе, содержащем 1 моль H_2SO_4 в 12 моль воды.

Решение:

В данном случае нужно определить дифференциальную теплоту растворения. Продифференцируем уравнение (2), получим:

$$q_{\text{диф}} = \frac{dq_p}{dn} = \frac{74,8 \cdot 1,7983}{(n + 1,7983)^2} = \frac{134,5128}{(n + 1,7983)^2}; \quad (4)$$

при $n = 12$ имеем:

$$q_{\text{диф}} = \frac{dq_p}{dn} = \frac{134,5128}{(12 + 1,7983)^2} = 0,71 \text{ кДж/моль}.$$

Пример 3. Смешали 2 кг 20%-го раствора серной кислоты и 3 кг 12%-го раствора $NaOH$. Определить температуру раствора после смешения, если первоначальная температура кислоты и щелочи $20^\circ C$, потери тепла в окружающую среду 1%.

Решение:

Между кислотой и щелочью протекает экзотермическая реакция нейтрализации:



В 2 кг 20%-го раствора H_2SO_4 содержится:

$$2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ кг} = 400 \text{ г или } 400 : 98 = 4,08 \text{ моль } H_2SO_4;$$

а в 3 кг 12%-го раствора $NaOH$ –

$$3 \cdot 0,12 = 0,36 \text{ кг} = 360 \text{ г или } 360 : 40 = 9,00 \text{ моль } NaOH.$$

По уравнению 1 моль H_2SO_4 реагирует с 2 моль $NaOH$, тогда 4,08 моль H_2SO_4 будут реагировать с 8,16 моль $NaOH$. То есть $NaOH$ будет избыток в количестве $9 - 8,16 = 0,84$ моль или 33,6 г.

В результате реакции образовалось 4,08 моль или 579,4 г Na_2SO_4 .

Общая масса раствора 5000 г, тогда концентрация Na_2SO_4 составит $\frac{579,4}{5000} \cdot 100 = 11,6\%$.

Теплоемкость этого раствора рассчитаем по закону аддитивности:

$$C = C_{\text{в}} \cdot W_{\text{в}} + C_{H_2O} \cdot W_{H_2O},$$

где $C_{\text{в}}$, C_{H_2O} – теплоемкости вещества и воды;

$W_{\text{в}}$, W_{H_2O} – массовые доли вещества и воды в растворе.

$$C = 0,97 \cdot 0,116 + 4,2 \cdot 0,884 = 3,82 \text{ Дж/ (г} \cdot \text{град)}.$$

Температуру раствора t_{κ} после реакции определим из уравнения

$$Q = m_p \cdot C(t_{\kappa} - t_{\text{н}}), \quad (5)$$

где Q – количество тепла, выделяющегося в результате реакции (с учетом теплопотерь), Дж; m_p – масса раствора, г; C – удельная теплоемкость раствора, Дж / (г · град); $t_{\text{н}}$ – температура раствора до реакции, °С.

Количество тепла, выделившееся в результате реакции в расчете на 4,08 моль прореагировавшей кислоты, составит:

$$Q' = 116 \cdot 4,08 = 473,3 \text{ кДж},$$

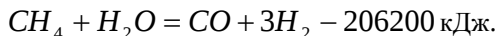
а с учетом теплопотерь (1%): $Q = 473,3 \cdot 0,99 = 468,5 \text{ кДж}$.

Выразим из уравнения (5) t_{κ} и подставим полученные значения:

$$t_{\kappa} = \frac{Q}{m_p \cdot C} + t_{\text{н}} = \frac{468500}{5000 \cdot 3,82} + 20 = 44,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Пример 4. Составить тепловой баланс реактора для получения водорода каталитической конверсией метана. Состав исходной газовой смеси (м³): CH_4 – 100,0; H_2O – 250,0. Потери теплоты составляют 4% от прихода. Температура смеси на входе в реактор – 380°С, на выходе – 800°С.

Процесс идет по реакции



Решение:

Определим состав продуктов и представим его в виде таблицы (табл.5).

Таблица 5

Состав продуктов конверсии

Приход	м ³	Расход	м ³
CH_4	100	CO	100
H_2O	250	H_2	300
ИТОГО	350	H_2O	250 – 100 = 150
		ИТОГО	550

Приход теплоты:

физическая теплота парогазовой смеси Q_{ϕ}^{cm}

$$Q_{\phi}^{cm} = V_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} \cdot t'' + V(H_2O) \cdot C(H_2O) \cdot t'',$$

где $C_{\Gamma}, C(H_2O)$ – средние теплоемкости метана и водяного пара при температуре t'' , кДж / (м³ · К).

$$Q_{\phi}^{cm} = 100 \cdot 1,965 \cdot 380 + 250 \cdot 1,555 \cdot 380 = 223000 \text{ кДж}.$$

Расход теплоты:

- теплота эндотермической реакции Q_p :

$$1 \text{ кмоль } CH_4 - 206200 \text{ кДж}$$

$$100 / 22,4 \quad - x$$

$$x = 920536 \text{ кДж}$$

- теплота конвертированного газа Q_{ϕ}^{κ} :

$$\begin{aligned} \text{с } CO: \quad Q_{CO} &= V_{CO} \cdot C_{CO} \cdot t^{\kappa} = \\ &= 100 \cdot 31,20 / 22,4 \cdot 800 = 111429 \text{ кДж}; \end{aligned}$$

$$\text{с } H_2: \quad Q_{H_2} = \frac{300}{22,4} \cdot 29,6 \cdot 800 = 317143 \text{ кДж};$$

$$\text{с } H_2O: \quad Q_{H_2O} = \frac{150}{22,4} \cdot 37,5 \cdot 800 = 200893 \text{ кДж}.$$

$$Q_{\phi}^{\kappa} = 629465 \text{ кДж};$$

- теплопотери:

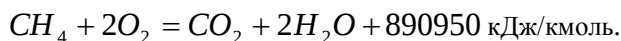
$$Q_{пот} = 223000 \cdot 0,04 = 9820 \text{ кДж};$$

$$Q_{расх} = Q_p + Q_{\phi}^{\kappa} + Q_{пот} = 1559821 \text{ кДж};$$

$$\Delta Q \quad Q_{расх} - Q_{\phi}^{cm} \quad 1559821 - 223000 = 1336821 \text{ кДж}.$$

Таким образом, дефицит теплоты составил 1336821 кДж, то есть необходим дополнительный подвод теплоты в зону реакции.

Предположим, что подвод теплоты осуществляется путем сжигания части метана природного газа (98% CH_4 и 2% N_2) по реакции



Для покрытия образовавшегося дефицита теплоты необходимо сжечь $\frac{1336821}{890950} = 1,5$ кмоль метана или $\frac{1,5}{0,98} = 1,53$ кмоль ($34,3 \text{ м}^3$) природного газа.

Результаты расчетов представим в виде таблицы (табл.6).

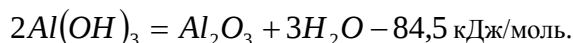
Таблица 6

Тепловой баланс реактора для получения водорода каталитической конверсией метана

Приход	МДж	%	Расход	МДж	%
1. Физическая теплота парогазовой смеси $Q_{\phi}^{см}$	223,0	14,3	1.Теплота эндотермической реакции Q_p	920,5	59,0
			2.Теплота конвертированного газа $Q_{\phi}^к$	629,5	40,4
2. Дополнительный подвод теплоты	1336,8	85,7	3. Теплотери	9,8	0,6
Итого	1559,8	100	Итого	1559,8	100

Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать расход природного газа, содержащего 95 об.% CH_4 , для производства 1 т глинозема (Al_2O_3) по реакции:

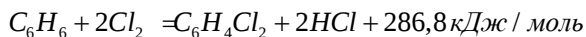
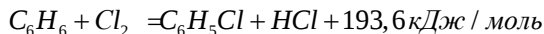


Потери теплоты в окружающую среду – 4% от общего расхода. Температура в зоне реакции 1200°C . Температура поступающих реагентов 25°C . (Теплотворная способность газа 33950 кДж/м^3 . Теплоемкости (кДж/(кг·град)): $Al_2O_3 - 1,327$ (1200°C); $Al(OH)_3 - 0,897$ (25°C); $H_2O - 2,12$ (1200°C)).

2. Рассчитать тепловой эффект реакции получения хлороводорода: $2NaCl + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + 2HCl - q$ и расход топлива (без учета теплоты сырья) на 1 т HCl , если в качестве топлива используют коксо-

вый газ, состава (об.%): H_2 – 56; CH_4 – 25; C_2H_4 – 2; CO – 7; CO_2 – 3; O_2 – 1; N_2 – 6.

3. Какое количество теплоты выделится при хлорировании 1 т бензола, если конечная смесь содержит 38% хлорбензола, 2% дихлорбензола, 60% бензола? Хлорирование идет по реакции:



4. В сатуратор, содержащий 130 кг 76% раствора серной кислоты, подается 34 кг газообразного аммиака. Определить, какое количество теплоты может быть использовано для испарения реакционной воды, если начальная температура кислоты и аммиака 25°C, потери тепла – 9% от общего прихода теплоты.

Теплоемкости при 25°C (кДж/кмоль · град): H_2SO_4 – 137570; NH_3 – 35650; $(NH_4)_2SO_4$ – 187070.

5. Определить состав продуктов горения и тепловой эффект при сжигании 100 м³ газа, содержащего (об.%): CH_4 – 93,0; C_2H_6 – 4,5; C_3H_8 – 1,9; CO_2 – 0,1; N_2 – 0,5. Расход воздуха считать равным теоретическому.

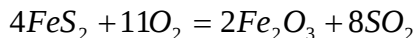
6. Определить тепловой эффект нейтрализации: $H_2SO_4 + 2NH_3 = (NH_4)_2SO_4 + q$. Для процесса взята 75%-ная кислота. Какую массу воды может испарить выделившаяся теплота?

7. Рассчитать количество теплоты, выделившейся при смешении 10 кг моногидрата (98,5% H_2SO_4) с 5 кг 20% раствора H_2SO_4 .

8. В 40% азотную кислоту массой 10 кг при 13°C пропускают газообразный аммиак до полного прекращения реакции. Рассчитать концентрацию и температуру раствора после окончания реакции, если теплоемкость твердого NH_4NO_3 1,68 кДж/(кг · град). Потери в окружающую среду 20%.

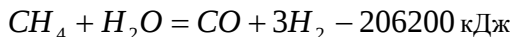
9. В 65% азотную кислоту массой 20 кг пропускают газообразный аммиак (образуется нитрат аммония). Достаточно ли будет теплоты реакции, чтобы испарить всю имеющуюся в реакторе воду, если принять, что вся теплота реакции расходуется на испарение воды.

10. Определить количество теплоты, выделяющееся при обжиге 1 т FeS_2 , содержащего 38% серы, если степень выгорания из колчедана 0,96. Процесс горения колчедана описывается суммарным уравнением:



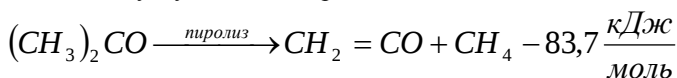
11. Составить тепловой баланс реактора получения водорода конверсией метана с водяным паром. Отношение $CH_4:H_2O = 1:2$. Температура поступающих в реактор веществ $105^\circ C$; температура в зоне реакции $900^\circ C$.

Теплопотери – 6 % от прихода теплоты. Процесс идет по реакции:



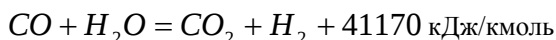
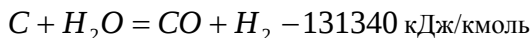
Расчет вести на 1000 м^3 водорода.

12. Составить тепловой баланс (на 1 ч работы) стадии пиролиза при производстве уксусного ангидрида из ацетона:



Расчет вести на 1 т уксусного ангидрида. Температура пиролиза $800^\circ C$. Степень превращения ацетона в кетон за один цикл 0,25. Теплота испарения ацетона $553,5 \text{ кДж/кг}$. Теплоемкость ($\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$): ацетона $2,09$ ($20^\circ C$), реакционной смеси – $2,26$ ($800^\circ C$).

13. Составить тепловой баланс генератора водяного газа при газификации 1 т кокса, содержащего (масс.%): $C - 95$; золы – 3; $H_2O - 2$, и подаче 1600 кг водяного пара на кокс. Образовавшиеся 2400 кг водяного газа содержат (масс.%): $CO - 89,9$; $CO_2 - 1,94$; $H_2 - 8,16$. Температура водяного газа на выходе из генератора $1000^\circ C$, температура подаваемого кокса $25^\circ C$, водяного пара $100^\circ C$. Процесс газификации протекает по реакциям:



Принять, что теплоемкость золы равна теплоемкости кокса.

14. Составить тепловой баланс печи сжигания колчедана ($KC - 200$) по следующим данным материального баланса:

Приход	кг	Расход	кг
Колчедан	8084	Огарок	6100
Влага колчедана	250	SO_2	6740
Воздух сухой	22900	O_2	572
Влага воздуха	164	N_2	17400
ИТОГО	31398	H_2O	414
		ИТОГО	31226

Температура поступающих реагентов $20^\circ C$, в кипящем слое $800^\circ C$, теплопотери составляют 4% от прихода.

15. Составить тепловой баланс контактного аппарата для окисления SO_2 в SO_3 производительностью $20000 \text{ м}^3 / \text{ч}$. Газовая смесь содержит (об.%): $SO_2 - 10$; $O_2 - 12$; $N_2 - 78$. Степень окисления 0,85. Температура входящего газа 450°C , выходящего 550°C . Средняя теплоемкость газовой смеси $2,052 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{град})$ для указанных температур. Теплопотери – 5% от прихода теплоты.

4. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ АММОФОСА

Аммофос получают нейтрализацией аммиаком экстракционной или термической фосфорной кислоты. Образовавшуюся пульпу, твердая фаза которой состоит из $NH_4H_2PO_4$, $(NH_4)_2HPO_4$ и продуктов нейтрализации примесей фосфорной кислоты, упаривают, гранулируют и сушат в барабанном грануляторе-сушилке.

Задание:

Составить материальный баланс сатуратора для нейтрализации кислоты в производстве аммофоса (на 1000 кг фосфорной кислоты). Состав экстракционной фосфорной кислоты: 35% P_2O_5 ; 2,9% SO_3 ; 0,15% MgO ; 1,8% CaO ; 1,2% Al_2O_3 ; 0,3% Fe_2O_3 ; 1,86% F. Состав жидкого аммиака: 97% NH_3 ; 3% H_2O . В процессе насыщения кислоты аммиаком испаряется 70 кг воды на 1000 кг кислоты. Содержание аммиака в нейтрализованной пульпе составляет 27% от общего количества P_2O_5 . Рассчитать тепловой баланс сатурации в производстве аммофоса на 1000 кг фосфорной кислоты. Температуры: поступающей кислоты – 60°C , аммиака – 27°C при давлении 152 кПа (1,5 атм), отходящей пульпы 102°C .

Материальный баланс

Приход

В приходные статьи баланса включаются экстракционная фосфорная кислота и аммиак.

$$\begin{aligned} m(H_3PO_4) &= m(\text{кислоты}) * \omega(P_2O_5) * M(H_3PO_4) / M(P_2O_5) = \\ &= 1000 * 0,35 * 2 * 98 / 142 = 483,1 \text{ кг} \end{aligned}$$

$$m(H_2O) = m(\text{кислоты}) - m(H_3PO_4) = 1000 - 483,1 = 516,9 \text{ кг},$$

где $M(H_3PO_4)$ и $M(P_2O_5)$ – молекулярные массы H_3PO_4 и P_2O_5 .

Количество расходуемого аммиака равно 27% от общего количества P_2O_5 , т.е.

$$m_0(\text{NH}_3) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{P}_2\text{O}_5) * \omega_1(\text{NH}_3) = \\ = 1000 * 0,35 * 0,27 = 94,5 \text{ кг.}$$

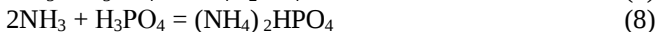
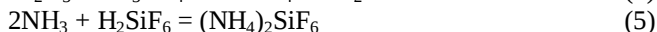
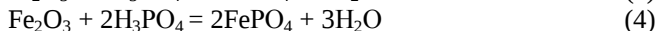
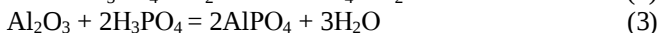
С аммиаком поступает воды:

$$m_1 = m_0(\text{NH}_3) * \omega(\text{H}_2\text{O}) / \omega(\text{NH}_3) = (67,5 * 3) / 97 = 2,9 \text{ кг,}$$

где $\omega(\text{H}_2\text{O})$, $\omega(\text{NH}_3)$ – состав жидкого аммиака: 97% NH_3 , 3% H_2O .

Расход

В результате обработки фосфорной кислоты аммиаком образуется пульпа и испаряется некоторое количество воды. Состав образующейся массы определяется взаимодействием кислоты с содержащимися в ней примесями и аммиаком. В основу расчета количеств получаемых солей берем следующие стехиометрические соотношения:



При нейтрализации раствора фосфорной кислоты аммиаком в от-
делении сатурации получают следующие соли, кг:

- гидрофосфат магния:

$$m(\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{MgO}) * M(\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) / M(\text{MgO}) = \\ = 1000 * 0,0015 * 174 / 40 = 6,5 \text{ кг,}$$

в том числе кристаллизационной воды

$$m_1(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{MgO}) * 3 * M(\text{H}_2\text{O}) / M(\text{MgO}) = \\ = 1000 * 0,0015 * 3 * 18 / 40 = 2,0 \text{ кг,}$$

в том числе P_2O_5

$$m_1(\text{P}_2\text{O}_5) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{MgO}) * M(\text{P}_2\text{O}_5) / 2M(\text{MgO}) = \\ = 1000 * 0,0015 * 142 / (40 * 2) = 2,7 \text{ кг;}$$

- гидрофосфат кальция:

$$m(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{CaO}) * M(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) / M(\text{CaO}) = \\ = 1000 * 0,018 * 172 / 56 = 55,3 \text{ кг,}$$

в том числе кристаллизационной воды

$$m_2(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{CaO}) * 2 * M(\text{H}_2\text{O}) / M(\text{CaO}) = \\ = 1000 * 0,018 * 2 * 18 / 56 = 11,6 \text{ кг,}$$

в том числе P_2O_5

$$m_2(\text{P}_2\text{O}_5) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{CaO}) * M(\text{P}_2\text{O}_5) / 2M(\text{CaO}) = \\ = 1000 * 0,018 * 142 / (56 * 2) = 22,8 \text{ кг;}$$

- фосфат алюминия:

$$m(\text{AlPO}_4) = m(\text{кислоты}) * \omega(\text{Al}_2\text{O}_3) * 2M(\text{AlPO}_4) / M(\text{Al}_2\text{O}_3) = \\ = 1000 * 0,012 * 2 * 122 / 102 = 28,7 \text{ кг,}$$

в том числе P_2O_5

$$m_3(P_2O_5) = m(\text{кислоты}) \cdot \omega(Al_2O_3) \cdot M(P_2O_5) / M(Al_2O_3) = \\ = 1000 \cdot 0,012 \cdot 142 / 102 = 483,1 \text{ кг};$$

- фосфат железа:

$$m(FePO_4) = m(\text{кислоты}) \cdot \omega(Fe_2O_3) \cdot 2M(FePO_4) / M(Fe_2O_3) = \\ = 1000 \cdot 0,003 \cdot 2 \cdot 207 / 160 = 7,8 \text{ кг},$$

в том числе P_2O_5

$$m_4(P_2O_5) = m(\text{кислоты}) \cdot \omega(Fe_2O_3) \cdot M(P_2O_5) / M(Fe_2O_3) = \\ = 1000 \cdot 0,003 \cdot 142 / 160 = 2,9 \text{ кг};$$

- кремнефторид аммония:

$$m(NH_4)_2SiF_6 = \frac{m_{\text{кислоты}} \cdot \omega(F) \cdot M(NH_4)_2SiF_6}{6 \cdot M(F)} = \\ = \frac{1000 \cdot 0,0186 \cdot 178}{6 \cdot 19} = 29,0 \text{ кг},$$

в том числе NH_3

$$m(NH_3) = \frac{m_{\text{кислоты}} \cdot \omega(F) \cdot 2M(NH_3)}{6 \cdot M(F)} = \frac{1000 \cdot 0,0186 \cdot 2 \cdot 17}{6 \cdot 19} = 5,5 \text{ кг};$$

- сульфат аммония:

$$m((NH_4)_2SO_4) = m(\text{кислоты}) \cdot \omega(SO_3) \cdot M((NH_4)_2SO_4) / M(SO_3) = \\ = 1000 \cdot 0,029 \cdot 132 / 80 = 47,9 \text{ кг},$$

в том числе NH_3

$$m(NH_3) = m(\text{кислоты}) \cdot \omega(SO_3) \cdot 2M(NH_3) / M(SO_3) = \\ = 1000 \cdot 0,029 \cdot 2 \cdot 17 / 80 = 12,3 \text{ кг}.$$

Количество P_2O_5 , связанной по реакциям (1) – (4):

$$m_i(P_2O_5) = m_1(P_2O_5) + m_2(P_2O_5) + m_3(P_2O_5) + m_4(P_2O_5) = \\ = 2,7 + 22,8 + 16,7 + 2,7 = 44,9 \text{ кг}.$$

Остальное количество P_2O_5 связывается с аммиаком, образуя фосфаты аммония. Количество P_2O_5 , нейтрализуемое аммиаком:

$$m_n(P_2O_5) = m(\text{фосфорной кислоты}) \cdot \omega(P_2O_5) - m_i(P_2O_5) = \\ = 1000 \cdot 0,35 - 44,9 = 305,1 \text{ кг}.$$

Содержание аммиака в нейтрализованной пульпе составляет 27% от общего количества P_2O_5 . Израсходовано аммиака на образование кремнефторида и сульфата аммония:

$$5,5 + 12,3 = 15,8 \text{ кг}.$$

Следовательно, на образование фосфатов аммония пошло аммиака:

$$m_{\phi}(NH_3) = m(\text{фосфорной кислоты}) \cdot \omega(P_2O_5) \cdot \omega(NH_3) - m(NH_3) = \\ = 1000 \cdot 0,35 \cdot 0,27 - 15,8 = 78,7 \text{ кг}.$$

Количество аммиака, необходимое для связывания оставшейся P_2O_5 (305,1кг) в моноаммонийфосфат:

$$m_{\text{ост}}(\text{NH}_3) = 2 * M(\text{NH}_3) * m_{\text{н}}(\text{P}_2\text{O}_5) / M(\text{P}_2\text{O}_5) = 2 * 17 * 305,1 / 142 = 73,1 \text{ кг.}$$

При этом остается избыточного аммиака

$$m_{\text{изб}}(\text{NH}_3) = m_{\text{ф}}(\text{NH}_3) - m_{\text{ост}}(\text{NH}_3) = 78,7 - 73,1 = 5,6 \text{ кг,}$$

который идет на образование диаммонийфосфата;

его количество:

$$m((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4) = m_{\text{изб}}(\text{NH}_3) * M((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4) / (2 * M(\text{NH}_3)) = \\ = 5,6 * 132 / (2 * 17) = 21,7 \text{ кг.}$$

Это количество требует моноаммонийфосфата

$$m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) = m((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4) * M(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) / M((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4) = \\ = 21,7 * 115 / 132 = 18,9 \text{ кг.}$$

Так как из 305,1 кг P_2O_5 могло образоваться моноаммонийфосфата

$$m_{\text{в}}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) = M(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) * m_{\text{ост}}(\text{NH}_3) / M(\text{NH}_3) = \\ = 115 * 73,1 / 17 = 494,5 \text{ кг,}$$

то после образования диаммонийфосфата останется моноаммонийфосфата:

$$m_{\text{ост}}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) = m_{\text{в}}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) - m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) = \\ = 494,5 - 18,9 = 475,6 \text{ кг.}$$

Выход сухих солей (с учетом кристаллизационной воды) составляет:

$$m(\text{соли}) = m(\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) + m(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + m(\text{AlPO}_4) + m(\text{FePO}_4) + \\ + m((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4) + m_{\text{ост}}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) + m((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4) + m(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 = \\ = 6,5 + 55,3 + 28,7 + 7,8 + 47,9 + 475,6 + 21,7 + 29 = 672,5 \text{ кг,}$$

в том числе воды кристаллизационной:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = m_1(\text{H}_2\text{O}) + m_2(\text{H}_2\text{O}) = 2,0 + 11,6 = 13,6 \text{ кг.}$$

Выход сухих солей без кристаллизационной воды:

$$m(\text{соли без воды}) = m(\text{соли}) - m(\text{H}_2\text{O}) = 672,5 - 13,6 = 658,9 \text{ кг.}$$

Состав сухих солей представим в виде таблицы (табл. 7).

Таблица 7

Состав сухих солей с учетом кристаллизационной воды

Соли	Масса, кг	Содержание, %
$\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	6,5	1,0
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	55,3	8,2
AlPO_4	28,7	4,3
FePO_4	7,8	1,2
$(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$	29,0	4,3
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	47,9	7,1
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	21,7	3,2
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	475,6	70,7
Всего	672,5	100

В систему поступает материалов (фосфорной кислоты, аммиака и воды с ним):

$$m(\text{материала}) = m(\text{фосфорной кислоты}) + m(\text{NH}_3) + m_1 = 1000 + 94,5 + 2,9 = 1097,4 \text{ кг.}$$

В процессе сатурации из системы испаряется 70 кг воды на 1000 кг кислоты. Количество пульпы после испарения воды равно

$$m(\text{пульпы}) = m(\text{материала}) - m(\text{вода в пульпе}) = 1097,4 - 70 = 1027,4 \text{ кг.}$$

В конечной пульпе содержится свободной воды:

$$m(\text{свободной воды}) = m(\text{пульпы}) - m(\text{соли}) = 1027,4 - 672,5 = 354,9 \text{ кг.}$$

Всего воды в пульпе:

$$m_k(\text{воды}) = m(\text{свободной воды}) + m(\text{H}_2\text{O}) = 354,9 + 13,6 = 368,5 \text{ кг.}$$

Процентное содержание общей влаги в пульпе:

$$\omega(\text{вода в пульпе}) = m_k(\text{воды}) * 100 / m(\text{пульпы}) = (368,5 * 100) / 1027,4 = 35,9\%.$$

Составляем материальный баланс сатурации в производстве аммофоса (на 1000 кг фосфорной кислоты) (табл. 8):

Таблица 8

Материальный баланс сатурации в производстве аммофоса

Приход	кг	%	Расход	кг	%
35%-ная по P_2O_5 экстракционная кислота в пересчете на моногидрат ($100\%\text{H}_3\text{PO}_4$)	483.1	44.02	Солевая масса пульпы. в том числе: $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	672.5	61.4
Вода с фосфорной кислотой	516.9	47.10	AlPO_4 FePO_4 $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	6,5 55.3 28.7 7.8 29.0 47.9 21.7 475.6	
Аммиак	94.5	8.61	Вода в пульпе (свободная)	354.9	32.2
Вода с аммиаком	2.9	0.27	Водяной пар	70.0	6.4
Итого	1097.4	100	Итого	1097.4	100

Тепловой баланс

Приход теплоты

Выделение теплоты за счет реакций:

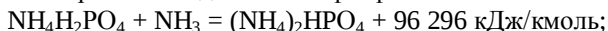
- образования моноаммонийфосфата



$$Q_1 = m_{\text{ост}}(\text{NH}_3) * \Delta H_1 / M(\text{NH}_3) = 73,1 * 75362 / 17 = 324056,6 \text{ кДж};$$

$m_{\text{ост}}(\text{NH}_3)$ – масса (в кг) вступившего в реакцию аммиака;

- образования диаммонийфосфата из моноаммонийфосфата



$$Q_2 = m_{\text{изб}}(\text{NH}_3) * \Delta H_2 / M(\text{NH}_3) = 5,6 * 96296 / 17 = 31721,0 \text{ кДж},$$

где $m_{\text{изб}}(\text{NH}_3)$ – масса (в кг) аммиака, реагирующего с моноаммонийфосфатом;

- образования сульфата аммония



$$Q_3 = m(\text{NH}_3) * \Delta H_3 / (2 * M(\text{NH}_3)) = 12,3 * 193\,849 / (2 * 17) = 70127,7 \text{ кДж};$$

$m(\text{NH}_3)$ – масса (в кг) аммиака, связываемого в сульфат аммония.

Всего за счет химических реакций:

$$Q_{\text{х.р}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 324056,6 + 31721,0 + 70127,7 = 425905,3 \text{ кДж}.$$

(Тепловые эффекты других реакций в расчет не включены из-за их малости).

Теплота, вносимая кислотой и аммиаком:

$$Q_{\text{к}} = m(\text{фосфорной кислоты}) * c_{\text{кислоты}} * t_{\text{кислоты}} + \Delta H * m_0(\text{NH}_3) = \\ = 1000 * 2,868 * 60 + (-117,2 * 94,5) = 161004,6 \text{ кДж},$$

где $m(\text{фосфорной кислоты})$ – масса фосфорной кислоты, кг;

$c_{\text{кислоты}}$ – средняя удельная теплоемкость кислоты, кДж/(кг * К);

$t_{\text{кислоты}}$ – температура кислоты, °С;

ΔH – энтальпия аммиака при -27°С и 152 кПа (1,5 атм), кДж/кг;

$m_0(\text{NH}_3)$ – масса аммиака, кг.

Всего поступает теплоты:

$$Q_{\text{приход}} = Q_{\text{х.р}} + Q_{\text{к}} = 425905,3 + 161004,6 = 586909,9 \text{ кДж}.$$

Расход теплоты

Нагревание пульпы до 102°С.

$$Q_{\text{пульпы}} = m(\text{материала}) * c_{\text{пульпы}} * t_{\text{пульпы}} = 1097,4 * 2,721 * 102 = \\ = 304574,6 \text{ кДж},$$

где $m(\text{материала})$ – количество пульпы, кг;

$c_{\text{пульпы}}$ – средняя удельная теплоемкость пульпы, кДж/(кг*К);

$t_{\text{пульпы}}$ – температура пульпы, °С.

Теплопотери в окружающую среду принимаем равными 3% от общего количества подводимой теплоты:

$$Q_{\text{потерь}} = Q_{\text{приход}} * 0,03 = 586909,9 * 0,03 = 17607,3 \text{ кДж.}$$

Всего расходуется теплоты:

$$Q_{\text{расх.}} = Q_{\text{потерь}} + Q_{\text{пульпы}} = 17607,3 + 304574,6 = 322181,9 \text{ кДж.}$$

Избыток теплоты расходуется на испарение воды:

$$Q_{\text{испарение}} = Q_{\text{приход}} - Q_{\text{расх.}} = 586909,9 - 322181,9 = 264728,0 \text{ кДж.}$$

Количество испаряющейся воды составит:

$$m_{\text{воды}} = Q_{\text{испарение}} / q = 264728,0 / 2253 = 117,5 \text{ кг,}$$

где q – теплота испарения воды, кДж/кг.

Общий расход теплоты:

$$\begin{aligned} Q_{\text{расход}} &= Q_{\text{пульпы}} + Q_{\text{потерь}} + Q_{\text{испарение}} = \\ &= 304574,6 + 17607,3 + 264728,0 = 586909,9 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Результаты расчетов представляем в виде таблицы (табл.9).

Таблица 9

Тепловой баланс сатурации фосфорной кислоты аммиаком
(на 1000 кг фосфорной кислоты)

Приход	кДж	%	Расход	кДж	%
Теплота реакции образования: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$			На нагревание пульпы	304574,6	51,89
	324056,6	55,21	На испарение воды	26472,80	45,10
	31721,0	5,40			
	70172,7	11,96			
Теплота, вносимая кислотой и аммиаком	160959,6	27,43	Теплопотери	17607,3	3,00
Итого	586909,9	100	Итого	586909,9	100

Задания для самостоятельного расчета

Исходные данные	Варианты		
	1	2	3
Состав экстракционной фосфорной кислоты, %			
P_2O_5	30	32	28
SO_3	2,0	1,8	2,3
MgO	0,15	0,1	0,2
CaO	0,1	0,2	0,3
Al_2O_3	0,3	0,4	0,4
Fe_2O_3	0,4	0,3	0,5
F	1,7	1,9	2,0
Состав жидкого аммиака, %			
NH_3	99	97	98
H_2O	1	3	2
Испаряется воды, кг/1000 кг кислоты	76	78	74
Содержимое аммиака в нейтрализованной пульпе, % от общего количества P_2O_5	27	30	29
Температура, °C:			
поступающей кислоты	65	64	62
аммиака	-30	-26	-28
отходящей пульпы	100	102	95

Библиографический список

1. Кузнецова И.М. Общая химическая технология: материальный баланс химико-технологического процесса. М.: Логос, 2007. 263 с.
2. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. Равделя А.А., Пономаревой А.М. СПб.: Иван Федоров, 2003. 238 с.
3. Артеменко А.И., Тикунова И.В., Малеванный В.А. Справочное руководство по химии. М.: Высш. шк., 2003. 367 с.
4. Расчеты химико-технологических процессов / под ред. И.П. Мухленова. Л.: Химия, 1982. 248 с.
5. Расчеты по технологии неорганических веществ / под ред. М.Е. Позина. Л.: Химия, 1977. 496 с.
6. Крылова С.А., Костина З.И., Понурко И.В. Производство аммиака: метод. указ. к курс. работе. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 23 с.
7. Крылова С.А., Костина З.И., Волков А.И. Производство метанола: метод. указ. к курс. работе. Ч.1. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 19 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Стандартная энтальпия образования некоторых веществ ΔH_f^0 (кДж/моль)

Вещество	Состояние	ΔH_f^0	Вещество	Состояние	ΔH_f^0
Al_2O_3	кр.	-1676	H_2O	газ	-241,8
$\text{Al}(\text{OH})_3$	кр.	-1294	C_6H_6	ж	-54,5
CO_2	газ	-393,5	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	ж	10,79
CO	газ	-110,5	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	газ	51,84
FeS_2	кр.	-163	C_2H_4	газ	-84,5
Fe_2O_3	кр.	-822	C_3H_8	газ	-103,6
H_2O	кр.	-242,0	CH_4	газ	-74,8
HNO_3	ж	-174,1	Na_2SO_4	кр.	-1389,5
H_2SO_4	ж	-814,2	NaOH	кр.	-425,9
HCl	газ	-92,2	NaCl	кр.	-411,4
H_2O	ж	-285,2	SO_2	газ	-269,9
NH_4NO_3	кр.	-365,4	SO_3	газ	-395,8
NH_3	газ	-46,2	SO_3	ж	-4,27,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Удельная теплоемкость жидких веществ

Вещество	Химическая формула	Удельная теплоемкость, кДж/(кг*К)	Температурные границы, °С
Аммиак (жидкий)	NH_3	4,41	-40
		4,60	0
		5,10	60
Ацетон	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	2,12+0,0032t	-30 – +56
Бензол	C_6H_6	1,58	0
		1,63	5
		1,70	20
		1,98	90
Вода	H_2O	4,190	0
		4,187	4
		4,188	100
Кислота серная (конц)	H_2SO_4	1.42+0.00159t	10–45
Спирт метиловый	CH_3OH	2,374	0
		2,580	40
Спирт этиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	1,980	-50
		2,240	0
		2,430	25
		3,450	100

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Удельная теплоемкость твердых веществ

Вещество	C_p° (298 К) Дж/(моль*К)	Средняя удельная теплоемкость, кДж/(кг*К)	Температурные границы, °С
Al_2O_3	79,0	$0.872 + 3.68 \cdot 10^{-4} \cdot t$ (приближенно)	0–1000
$Al(OH)_3$	93,1	-	-
Na_2SO_4	128,0	-	-
NH_4NO_3	139,3	-	-
$(NH_4)_2SO_4$	187	-	-
FeS_2	62,2	-	-
Fe_2O_3	103,8	$0,611 + 5,34 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,242 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0–700
С графит	8,54	$0,796 + 9,5 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,21 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ 1,80 – 1,95	0–1300 600–1200
NaOH	59,5	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

**Температурная зависимость средней мольной теплоемкости газов
от 0 до t (°C) при постоянном объеме**

Наименование газа	Средняя мольная теплоемкость кДж/(кмоль*град)
Одноатомные газы (He, Ar, пары металлов и т. п.)	20,82
Двухатомные (N ₂ , O ₂ , H ₂ , CO, NO)	20,6+0,00193 t
CO ₂ , SO ₂	38,6+0,00248 t
H ₂ O, H ₂ S	17,2+0,0090 t
Все четырехатомные газы (NH ₃ и др.)	41,9+0,00193 t
Все пятиатомные газы (CH ₄ и др.)	50,3+0,00193 t

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Средняя молярная теплоемкость газов от 0 до $t^{\circ}\text{C}$ при нормальном давлении

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Значение средней молярной теплоёмкости C , кДж/(кг*град)							
	H_2	O_2	N_2	CO	CO_2	$\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2\text{S}$	CH_4	NH_3
0	28,8	29,3	28,4	28,42	37,7	32,5	33,4	34,7
100	29,0	29,6	28,7	28,9	39,2	33,2	36,6	36,2
200	29,1	30,1	29,0	29,2	440,6	33,8	39,8	37,8
300	29,15	30,5	29,4	29,6	41,9	34,5	42,0	39,4
400	29,2	30,9	29,6	29,9	43,2	35,1	45,5	40,8
500	29,3	31,3	30,0	30,2	44,4	35,6	48,3	42,3
600	29,4	31,8	30,3	30,5	45,5	36,0	50,9	43,7
700	29,5	32,0	30,6	30,8	46,5	36,6	53,5	45,1
800	29,6	32,3	30,8	31,2	47,5	37,5	55,8	46,4
900	29,7	32,7	31,1	31,5	48,5	38,0	58,1	47,6
1000	29,8	33,0	31,4	31,7	49,3	38,6	60,2	48,8
1100	29,9	33,4	31,6	31,9	50,1	39,1	62,4	-
1200	30,0	33,8	31,8	32,2	50,9	39,6	64,4	-
1300	30,2	34,0	32,0	32,4	51,4	40,2	66,1	-
1400	30,4	34,1	32,2	32,6	52,0	40,7	67,8	-
1500	30,6	34,3	32,4	32,9	52,6	41,2	69,2	-
1600	30,8	34,5	32,7	33,1	53,1	41,8	-	-
1700	31,0	34,7	32,9	33,3	53,5	42,3	-	-
1800	31,2	34,9	33,1	33,4	53,9	42,8	-	-
1900	31,4	35,1	33,2	33,6	54,2	43,2	-	-
2000	31,6	35,3	33,4	33,8	54,5	43,6	-	-
2100	31,8	35,4	33,6	33,9	54,8	44,1	-	-
2200	31,9	35,5	33,8	34,0	55,1	44,4	-	-
2300	32,1	35,7	33,9	34,2	55,3	44,9	-	-
2400	32,3	35,9	34,0	34,3	55,5	45,3	-	-
2500	32,5	36,0	34,1	34,4	55,8	-	-	-
3000	33,2	36,8	34,6	34,9	56,7	-	-	-

Температура, °C	Значение средней молярной теплоёмкости С, кДж/(кг*град)								
	NO	C ₂ H ₄	SO ₂	C ₂ H ₂	Воздух	Форм- альдегид	Метиловый спирт	Этиловый спирт	Уксусная кислота
0	28,5	39,4	41,2	46,2	28,6	35,2	49,0	74,6	54,0
100	29,0	42,1	42,4	47,8	29,0	37,4	53,7	80,5	57,8
200	29,5	48,6	43,5	49,6	29,3	39,6	57,0	86,6	61,6
300	29,9	53,3	44,7	51,3	29,7	41,1	62,8	92,2	64,7
400	30,3	57,9	45,8	53,0	30,0	43,8	65,8	97,2	66,2
500	30,6	62,5	46,6	54,4	30,3	45,9	70,0	101,4	68,3
600	31,0	67,0	47,5	56,0	30,6	47,8	74,2	105,2	70,7
700	31,3	71,7	48,5	57,4	30,9	49,5	-	108,2	-
800	31,6	76,3	49,3	58,7	31,2	51,1	-	110,2	-
900	31,9	82,0	50,0	60,0	31,4	52,8	-	112,0	-
1000	32,2	84,0	50,6	61,2	31,7	54,0	-	112,3	-
1100	32,5	90,1	50,9	62,3	31,9	55,4	-	112,6	-
1200	32,7	94,7	51,3	63,4	32,2	57,0	-	112,9	-
1300	-	-	51,7	64,3	32,4	-	-	-	-
1400	-	-	52,0	65,2	32,6	-	-	-	-
1500	-	-	52,3	66,0	32,9	-	-	-	-
1600	-	-	52,6	-	33,1	-	-	-	-
1700	-	-	52,9	-	33,2	-	-	-	-
1800	-	-	53,1	-	33,4	-	-	-	-
1900	-	-	53,3	-	33,5	-	-	-	-
2000	-	-	53,5	-	33,7	-	-	-	-
2100	-	-	53,7	-	33,8	-	-	-	-
2200	-	-	53,9	-	33,9	-	-	-	-
2300	-	-	54,1	-	34,0	-	-	-	-
2400	-	-	54,2	-	34,2	-	-	-	-
2500	-	-	54,3	-	34,3	-	-	-	-
3000	-	-	54,7	-	34,7	-	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Энтальпия газов при различных температурах и нормальном давлении (по отношению к 0°С)

Температу- ра, °С	Значение энтальпии I, кДж/кмоль									
	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O, H ₂ S	CH ₄	NH ₃	SO ₂	C ₂ H ₄
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	2900	2983	2870	2880	3920	3320	3660	3620	4240	4300
200	5820	6010	5800	5840	8120	6760	7940	7560	8700	9720
300	8750	9160	8800	8820	12560	10330	12800	11800	13380	15500
400	11670	12360	11820	11930	17250	14020	18200	16340	19100	25140
500	14650	15640	14980	15100	22200	18850	24180	21170	23680	31200
600	17620	19000	18150	18300	27300	21740	30540	26200	28600	45300
700	20630	22400	21350	21590	32600	25800	37400	31580	33900	50100
800	23700	25860	24820	24900	38000	29960	44600	37100	39400	61000
900	27670	29400	28000	28200	43700	34200	52300	-	45400	72800
1000	29800	32900	31300	31700	49200	38500	60100	-	50500	85500

Продолжение прил. 6

Температура, °C	Значение энтальпии I, кДж/кмоль)								
	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O, H ₂ S	CH ₄	SO ₂	C ₂ H ₄
1100	33000	36600	34700	35100	55100	43000	68500	56400	99400
1200	36200	40200	37900	38600	61000	47500	77000	62100	113600
1300	39300	43400	41600	42000	66800	52200	86000	67900	129000
1400	42600	47606	45100	45600	72700	56800	94800	73800	145000
1500	45800	51000	43600	49200	78600	61700	103800	79500	162000
1600	49200	54700	52200	52600	84600	66700	113200	85400	-
1700	52600	58400	55700	56400	90800	71700	122800	91100	-
1800	55900	59600	59600	59600	96500	76700	-	96500	-
1900	59400	63100	63100	63100	102000	82000	-	102000	-
2000	63100	66500	66500	66500	108000	87000	-	108000	-

Окончание прил. 6

Температура, °C	Значение энтальпии I, кДж/кмоль)							
	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O, H ₂ S	CH ₄	SO ₂
2500	81900	84000	84000	84000	142000	124800	-	112200
3000	101500	101600	101600	101600	176000	162200	-	142000
3500	120200	120200	120200	120200	221000	208000	-	176500
4000	139300	141000	141000	141000	261000	260000	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Теплота сгорания органических соединений при 18°C
и нормальном давлении

Конечные продукты: CO₂ (газ), H₂O (жидк.), SO₂ (газ), N₂ (газ)

г – газ, ж – жидкость, тв. – твердое вещество

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания <i>кДж/кмоль</i>
Углерод	Графит	C	395 000
-	Кокс	C	406 000
Оксид углерода	г	CO	285 500
Водород	-	H ₂	286 000
Сероводород	-	H ₂ S	580 000
<i>Углеводороды</i>			
Метан	г	CH ₄	894 000
Этан	-	C ₂ H ₆	1 562 000
Пропан	-	C ₃ H ₈	2 223 000
Бутан	-	C ₄ H ₁₀	2 884 000
<i>изо</i> -Бутан	-	C ₄ H ₁₀	2 879 000
Пентан	-	C ₅ H ₁₂	3 542 000
<i>изо</i> -Пентан	-	C ₅ H ₁₂	3 516 000
	ж	C ₅ H ₁₂	3 540 000
Гексан	-	C ₆ H ₁₄	4 150 000
Гептан	-	C ₇ H ₁₆	4 810 000
Октан	-	C ₈ H ₁₈	5 476 000
Этилен	г	CH ₂ =CH ₂	1 390 000
Пропилен	-	C ₂ H ₄ =CH ₂	2 056 000
<i>изо</i> -Бутилен	-	C ₃ H ₆ =CH ₂	3 710 000
Амилен	ж	C ₄ H ₈ =CH ₂	3 364 000
Гексилен	-	C ₅ H ₁₀ =CH ₂	3 996 000
Ацетилен	г	CH≡CH	1 308 000
Аллилен	-	CH ₃ -C≡CH	1 946 000
Триметилен (циклопропан)	-		2 080 000

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Давление насыщенного водяного пара при различных температурах

Температура, °C	Па	Температура, °C	Па	Температура, °C	Па
-60	1,333	6	935	30	4250
-50	5,332	8	1065	31	4460
-40	16,00	10	1225	32	4720
-30	40,00	12	1400	33	5000
-20	120	14	1600	34	5270
-10	254	15	1710	36	5900
-9	274	16	1816	38	6670
-8	307	17	1940	40	7330
-7	334	18	2070	42	8150
-6	360	19	2100	44	9060
-5	400	20	2340	46	$10 \cdot 10^3$
-4	440	21	2430	48	$11,1 \cdot 10^3$
-3	480	22	2640	50	$12,3 \cdot 10^3$
-2	520	23	2830	60	$19,9 \cdot 10^3$
-1	560	24	2990	70	$31,4 \cdot 10^3$
0	615	25	3180	80	$47,2 \cdot 10^3$
2	706	26	3380	100	$101,3 \cdot 10^3$

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Свойства серной кислоты

Содержание, % масс.		Плотность (при 20 ⁰ С), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 ⁰ С), кДж/(кг*К)	Температура, ⁰ С	
H ₂ SO ₄	SO ₃ общ			кристалли- зации	кипения
1	0,816	10049	4,14	- 0,2	100,2
2	1,633	10116	4,10	- 0,5	100,4
3	2,45	10183	4,06	- 0,8	100,6
4	3,265	10250	4,02	- 1,2	100,8
5	4,08	10347	3,98	- 1,75	101,0
6	4,90	10385	3,94	- 2,3	101,2
7	5,71	10453	3,90	- 3,0	101,4
8	6,53	10522	3,86	- 3,7	101,6
9	7,35	10591	3,83	- 4,6	101,8
10	8,16	10661	3,79	- 5,5	102,0
11	8,98	10731	3,75	- 6,5	102,2
12	9,80	10802	3,71	- 7,6	102,4
13	10,61	10874	3,67	- 8,7	102,7
14	11,43	10947	3,64	- 9,9	102,9
15	12,25	11020	3,60	- 11,25	103,1
16	13,06	11094	3,57	- 12,6	103,4
17	13,88	11168	3,53	- 14,1	103,6
18	14,69	11243	3,49	- 15,7	103,8
19	15,51	11318	3,46	- 17,3	104,1
20	16,33	11394	3,43	- 19,0	104,4
21	17,14	11471	3,39	- 20,8	104,6
22	17,96	11548	3,36	- 22,7	104,9
23	18,78	11626	3,33	- 24,6	105,2
24	19,59	11704	3,30	- 26,7	105,5
25	20,41	11783	3,26	- 28,8	105,9
26	21,22	11862	3,23-	- 31,1	106,3
27	22,04	11942	3,20	- 33,4	106,6
28	22,86	12023	3,17	- 35,85	107,0
29	23,67	12104	3,14	- 38,4	107,4
30	24,49	12185	3,10	- 41,2	107,9
31	25,31	12267	3,07	- 44,1	108,3
32	26,12	12349	3,04	- 47,2	108,8
33	26,94	12432	3,01	- 50,6	109,0
34	27,75	12515	2,98	- 54,3	109,0

Содержание, % масс.		Плотность (при 20 ⁰ C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 ⁰ C), кДж/(кг*К)	Температура, °C	
H ₂ SO ₄	SO ₃ общ			кристалли- зации	кипения
35	28,57	12599	2,95	- 58,5	110,5
36	29,39	12684	2,92	- 63,3	111,1
37	30,20	12769	2,89	- 68,5	111,7
38	31,02	12855	2,86	- 74,5	112,4
39	31,84	12941	2,83	- 69,6	113,1
40	32,65	13028	2,80	- 65,2	113,9
41	33,47	13116	2,78	- 61,0	114,7
42	34,28	13205	2,75	- 57,1	115,6
43	35,10	13294	2,73	- 53,4	116,5
44	35,92	13384	2,70	- 50,0	117,4
45	36,73	13476	2,67	- 46,8	118,4
46	37,55	13569	2,64	- 43,8	119,5
47	38,37	13663	2,61	- 41,0	120,6
48	39,18	13758	2,59	- 38,5	121,8
49	40,00	13854	2,56	- 36,2	123,1
50	40,82	13951	2,53	- 34,2	124,4
51	41,63	14049	2,51	- 32,3	125,8
52	42,45	14148	2,48	- 30,9	127,2
53	43,26	14248	4,45	- 29,6	128,7
54	44,08	14350	2,43	- 28,3	130,4
55	44,90	14453	2,40	- 27,1	132,0
56	45,71	14557	2,38	- 25,9	133,8
57	46,53	14662	2,35	- 24,8	135,7
58	47,35	14768	2,33	- 24,5	137,6
59	48,16	14875	2,31	- 24,85	139,6
60	48,98	14983	2,28	- 25,8	141,8
61	49,79	15091	2,26	- 27,15	144,0
62	50,61	15200	2,23	- 28,85	146,4
63	51,43	15310	2,21	- 30,8	148,8
64	52,24	15421	2,18	- 33,0	151,4
65	53,06	15533	2,16	- 35,3	154,1
66	53,88	15646	2,14	- 37,75	156,8
67	54,69	15760	2,12	- 40,3	159,7
68	55,51	15874	2,09	--	162,8

Содержание, % масс.		Плотность (при 20 ⁰ C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 ⁰ C), кДж/(кг*К)	Температура, ⁰ C	
H ₂ SO ₄	SO ₃ общ			кристалли- зации	кипения
69	56,53	15989	2,07	- 44,0	165,9
70	57,14	16105	2,05	- 42,0	169,2
71	57,96	16221	2,03	- 40,6	172,6
72	58,78	16338	2,00	- 39,8	176,2
73	59,79	16456	1,98	- 39,6	179,9
74	60,41	16574	1,96	- 40,0	183,8
75	61,22	16692	1,94	- 51,0	187,8
76	62,04	16810	1,92	- 28,1	191,2
77	62,86	16927	1,89	- 19,4	196,2
78	63,67	17043	1,87	- 13,6	200,7
79	64,49	17158	1,85	- 8,2	205,4
80	65,3	17272	1,83	- 3,0	210,2
81	66,12	17383	1,81	1,5	215,2
82	66,94	17491	1,79	4,8	220,4
83	67,75	17594	1,77	7,0	225,7
84	68,57	17693	1,74	8,0	231,3
85	69,39	17786	1,72	7,9	237,1
86	70,20	17872	1,70	6,6	243,0
87	71,02	17951	1,68	4,1	249,2
88	71,84	18022	1,66	0,5	255,5
89	72,65	18087	1,64	- 4,2	262,1
90	73,47	18144	1,62	- 10,2	268,9
91	74,28	18195	1,60	- 17,3	275,9
92	75,10	18240	1,58	- 25,6	283,2
93	75,92	18279	1,56	- 35,0	290,6
94	76,73	18312	1,54	- 30,8	298,4
95	77,55	18337	1,52	- 21,8	306,3
96	78,36	18355	1,50	- 13,6	314,5
97	79,18	18363	1,48	- 6,3	323,0
98	80,00	18365	1,45	0,1	332,4
99	80,81	18342	1,43	5,7	318,0
100	81,63	18305	1,41	10,45	296,2

Свойства олеума

Содержание, % масс.			Плотность (при 20 ⁰ C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 ⁰ C), кДж/(кг*К)	Температура, ⁰ C	
SO ₃ своб	SO ₃ общ	H ₂ SO ₄			кристал- лизации	кипения
0	81,63	100	18305	1,4148	10,45	296,2
1	81,81	100,25	18335	1,4150	9,5	287,3
2	82,00	100,45	18366	1,4152	8,5	278,7
3	82,18	100,68	18397	1,4155	7,4	270,3
4	82,36	100,90	18429	1,4157	6,25	262,6
5	82,52	101,12	18461	1,4159	4,95	255,1
6	82,73	101,35	18493	1,4161	3,6	247,8
7	82,92	101,58	18525	1,4163	2,15	240,8
8	83,10	101,80	18558	1,4165	0,7	234,0
9	83,29	102,03	18591	1,4168	- 0,9	227,3
10	83,47	102,25	18624	1,4170	- 2,5	220,9
11	83,65	102,48	18658	1,4172	- 4,15	214,7
12	83,83	102,70	18691	1,4174	- 5,9	208,6
13	84,01	102,92	18725	1,4178	- 7,65	202,8
14	84,20	103,15	18759	1,4182	- 9,45	197,1
15	84,39	103,38	18793	1,4186	- 11,3	191,6
16	84,57	103,60	18827	1,4191	- 13,15	186,3
17	84,75	103,82	18864	1,4196	- 15,05	181,1
18	84,94	104,05	18899	1,4201	- 16,9	176,1
19	85,12	104,28	18933	1,4206	- 14,35	171,3
20	85,30	104,50	18968	1,4211	- 11,0	166,6
21	85,48	104,72	19002	1,4222	- 7,75	162,1
22	85,67	104,95	19037	1,4233	- 4,6	157,7
23	85,86	105,18	19071	1,4244	- 1,5	153,5
24	86,04	105,40	19105	1,4255	1,5	149,4
25	86,22	105,62	19139	1,4266	4,35	145,5
26	86,40	105,85	19173	1,4285	7,15	141,7
27	86,59	106,08	19206	1,4304	9,8	138,0
28	86,77	106,30	19240	1,4323	12,35	134,4
29	86,95	106,52	19273	1,4342	14,8	131,0
30	87,14	106,75	19307	1,4362	17,1	127,7
31	87,33	106,98	19338	1,4391	19,35	124,5
32	87,51	107,20	19370	1,4321	21,4	121,5
33	87,69	107,42	19403	1,4357	23,4	118,5

Содержание, % масс.			Плотность (при 20 ⁰ C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 ⁰ C), кДж/(кг*К)	Температура, ⁰ C	
SO ₃ своб	SO ₃ общ	H ₂ SO ₄			кристал- лизации	кипения
34	87,87	107,65	19434	1,4492	25,25	115,6
35	88,06	107,88	19464	1,4534	26,9	112,9
36	88,24	108,10	19494	1,4576	28,55	110,2
37	88,42	108,32	19524	1,4626	29,9	107,7
38	88,61	108,55	19553	1,4676	31,2	105,2
39	88,80	108,78	19581	1,4726	32,3	102,9
40	88,98	109,00	19611	1,4776	33,3	100,6
41	89,16	109,22	19637	1,4858	34,1	98,4
42	89,34	109,45	19665	1,4940	34,8	96,3
43	89,63	109,68	19691	1,5026	35,3	94,4
44	89,71	109,90	19717	1,5112	35,65	92,4
45	89,90	110,12	19742	1,5199	35,85	90,5
46	90,09	110,35	19766	1,5296	35,45	88,7
47	90,27	110,58	19789	1,5404	34,8	87,0
48	90,45	110,80	19812	1,5513	33,85	85,3
49	90,63	111,02	19834	1,5634	32,75	83,7
50	90,82	111,25	19855	1,5756	31,5	82,2
51	91,01	111,48	19875	1,5906	30,1	80,7
52	91,19	111,70	19894	1,6056	28,4	79,3
53	91,37	111,92	19912	1,6205	26,6	78,0
54	91,55	112,15	19930	1,6355	24,55	76,7
55	91,74	112,38	19936	1,6505	22,5	75,4
56	91,92	112,60	19961	1,6697	20,05	74,2
57	92,10	112,82	19975	1,6889	17,25	73,0
58	92,28	113,05	19980	1,7080	14,15	71,9
59	92,47	113,28	19999	1,7272	10,35	70,8
60	92,65	113,50	20012	1,7464	7,1	69,8
61	92,83	113,72	20020	1,7698	3,75	68,2
62	93,02	113,95	20030	1,7933	1,2	67,2
63	93,21	114,18	20029	1,8167	0,35	66,9
64	93,39	114,40	20029	1,8402	- 0,7	66,0
65	93,57	114,62	20028	1,8636	- 0,35	65,2
66	93,75	114,85	20028	1,8899	1,45	64,4
67	93,94	115,08	20027	1,9162	2,3	63,6

Содержание, % масс.			Плотность (при 20 ⁰ С), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 ⁰ С), кДж/(кг*К)	Температура, ⁰ С	
SO ₃ своб	SO ₃ общ	H ₂ SO ₄			кристал- лизации	кипения
68	94,12	115,30	20027	1,9424	3,7	62,8
69	94,30	115,52	20026	1,9687	4,9	62,0
70	94,49	115,75	20025	1,9950	6,1	61,3
71	94,67	115,98	20024	2,0272	7,0	60,5
72	94,85	116,20	20023	2,0594	8,2	59,9
73	95,03	116,42	20022	2,0916	9,5	59,3
74	95,22	116,65	20019	2,1238	10,8	58,6
75	95,41	116,88	20013	2,1560	12,0	58,0
76	95,60	117,10	20004	2,1870	13,2	57,4
77	95,78	117,33	19992	2,2180	14,3	56,8
78	95,96	117,55	19979	2,2490	15,3	56,2
79	96,14	117,78	19964	2,2800	16,15	55,6
80	96,32	118,00	19947	2,3110	16,9	55,0
81	96,51	118,22	19930	2,3410	17,5	54,5
82	96,69	118,45	19909	2,3710	18,1	53,9
83	96,88	118,68	19888	2,4010	18,5	53,4
84	97,06	118,90	19864	2,4310	18,8	52,8
85	97,24	119,12	19836	2,4610	19,06	52,3
86	97,43	119,35	19808	2,4878	19,25	51,8
87	97,61	119,58	19778	2,5146	19,35	51,3
88	97,80	119,80	19745	2,5414	19,4	50,7
89	97,98	120,02	19712	2,5682	19,35	50,2
90	98,16	120,25	19678	2,5950	19,25	49,7
91	98,35	120,48	19638	2,6126	19,15	49,2
92	98,53	120,70	19599	2,6302	19,00	18,7
93	98,72	120,92	19557	2,6478	18,8	48,2
94	98,90	121,15	19512	2,6654	18,6	47,7
95	99,08	121,38	19467	2,6830	18,35	47,2
96	99,27	121,60	19419	2,6856	18,1	46,7
97	99,45	121,82	19369	2,6882	17,8	46,2
98	99,64	122,05	19315	2,6908	17,5	45,7
99	99,82	122,28	19260	2,6934	17,15	45,2
100	100,0	122,50	19203	2,6960	16,8	44,7

Теплоёмкость водных растворов азотной кислоты

HNO ₃ , % масс.	Температура, °C			
	2	20	40	60
1	4,157	4,157	4,123	4,144
2	4,094	4,102	4,073	4,102
4	3,989	3,977	3,956	4,019
6	3,880	3,893	3,889	4,935
10	3,700	3,725	3,730	3,767
15	3,517	3,516	3,562	3,600
20	3,345	3,349	3,412	3,474
25	3,211	3,265	3,290	3,349
30	3,093	3,181	3,198	3,265
35	2,977	3,098	3,114	3,223
40	2,922	3,014	3,039	3,139
45	2,855	2,930	2,968	3,056
50	2,792	2,763	2,826	2,888
55	2,717	2,721	2,738	2,847
60	2,637	2,679	2,685	2,805
65	2,541	2,295	2,633	2,679
70	2,440	2,470	2,524	2,553
75	2,336	2,386	2,403	2,428
80	2,244	2,260	2,294	2,299
85	2,156	2,177	2,181	2,219
90	2,051	2,051	2,064	2,093
95	1,909	1,926	1,930	1,926
100	1,748	1,758	1,768	1,800