

**Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»**

**Р. А. Андреева
И. А. Ельшина**

ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

**Сборник задач
для студентов специальности 1-36 07 01
«Машины и аппараты химических производств
и предприятий строительных материалов»**

**Новополоцк
ПГУ
2015**

УДК 66.0(075.8)
ББК 35.11
А65

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией
инженерно-технологического факультета
в качестве сборника задач
(протокол № 8 от 23.12.2014)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

канд. техн. наук, нач. методико-аналитического сектора
центральной лаборатории ОАО «Нафтан» завода «Полимир»
С. А. ПОДГОЛ;

канд. техн. наук, зам. гл. технолога (по инновационному развитию)
ОАО «Нафтан» завода «Полимир»
А. И. ВЕГЕРА;

канд. техн. наук, доц. каф. химической техники и охраны труда
Полоцкого государственного университета
В. Б. ХАЛИЛ

Андреева, Р. А.

А65 Общая химическая технология : сб. задач для студентов специальности 1-36 07 01 «Машины и аппараты хим. пр-в и предприятий строит. материалов» / Р. А. Андреева, И. А. Ельшина. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – 204 с.
ISBN 978-985-531-514-9.

Изложены теоретические основы технологических расчетов, примеры их выполнения и перечень условий задач по данной теме для самостоятельного решения. В приложении приведены необходимые справочные данные.

Предназначен для студентов инженерных и химико-технологических специальностей.

УДК 66.0(075.8)
ББК 35.11я73

ISBN 978-985-531-514-9

© Андреева Р. А., Ельшина И. А., 2015
© УО «ПГУ», 2015

Введение

Выбор, оптимизация, проектирование нового и реконструкция действующего оборудования, контроль за стабильностью функционирования технологического процесса (технологический регламент производства), поиск технических решений для снижения расходных коэффициентов по сырью и энергоёмкости и, соответственно, себестоимости производимой продукции осуществляются на основании технологических расчетов. А основу их составляют материальные и энергетические (тепловые) балансы, которые, в свою очередь, базируются на двух основополагающих законах – законе сохранения массы и законе сохранения энергии.

Данное учебное пособие составлено в соответствии с принятой типовой и рабочей программами по курсу «Общая химическая технология» для специальности 1-36 07 01 «Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов».

Каждый раздел включает краткую теоретическую часть, типовые задачи, примеры (разбор) их решений и условия задач для самостоятельных занятий. В разделе 5 «Расчеты производственных процессов и задачи, решаемые на их основе» приводятся упрощенные технологические схемы анализируемых производств и их описание. В отдельных задачах для визуализации технологического процесса приводятся схемы материальных и тепловых потоков. Исходные данные и расчеты реальных современных производственных процессов в этом разделе приведены и выполнены авторами.

В задачнике использованы материалы, изложенные в учебных пособиях следующих авторов: С.Д. Бескова, В.С. Бескова, К.Ф. Павлова, М.Е. Позина, И.П. Мухлёнова, О.С. Аранской.

Глава 1
**ПОНЯТИЯ И РАСЧЕТ
 ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.
 МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС
 НЕОБРАТИМЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Химико-технологические процессы (ХТП) – это взаимосвязанные химические, физические процессы, результатом которых из одних исходных веществ (сырья) образуются новые конечные вещества (продукты). ХТП реализуются в производстве как в единичных аппаратах, так и в ряде различных аппаратов, связанных между собой в технологических процессах. В последнем случае принято говорить о функционировании химико-технологической системы (ХТС).

На рис. 1.1 в упрощенном виде приведена схема ХТС, в которой из сырья A и B образуется целевой продукт R , но сырье не полностью превращается, поэтому в состав продуктового потока одновременно с целевым продуктом R входят остатки исходного сырья (A' , B').

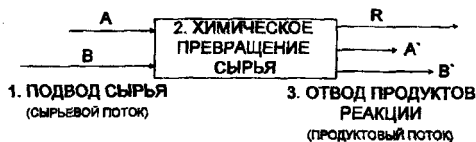
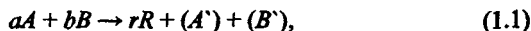


Рис. 1.1. Схема ХТС:

A, B – сырье для производства; A', B' – остаток непревращенного сырья;
 R – новый (целевой) продукт

Химическое превращение, которое идет в специальных аппаратах – химических реакторах, можно представить в общем виде как химическую реакцию:



где a, b, r – стехиометрические коэффициенты.

Если обозначить сырьевые компоненты как n_A^O, n_A^K – количество сырья в исходной (сырьевой) и конечной (продуктовой) смеси, то степень превращения сырья A (конверсию) в химическом процессе можно выразить как

$$\chi_A = \frac{n_A^O - n_A^K}{n_A^O} = \frac{|\Delta n_A|}{n_A^O}, \quad (1.2)$$

Δn_A – изменение количества сырья A в химическом превращении.

Конверсия может быть величиной, выраженной в долях от единицы или ($\times 100$) в %. Ее значение может варьировать ($0 \leq X \leq 1$) в зависимости от ряда причин – степени чистоты сырья, используемого в технологическом процессе, технологических режимов ведения процесса, характера химических реакций (последовательности, обратимости и пр.). Например, если при химическом взаимодействии объем реакционной смеси не меняется, тогда степень превращения сырья может быть выражена как

$$\chi_A = \frac{C_A^O - C_A^K}{C_A^O} = \frac{|\Delta C_A|}{C_A^O}, \quad (1.3)$$

где C_A^O, C_A^K – начальная и конечная концентрация сырья в реакционной смеси.

Или для обратимых химических реакций



предельным состоянием является состояние химического равновесия, при котором достигается равновесная степень превращения, обозначаемое как X_e . Например, по сырью А $\chi_{A,e} = \frac{|\Delta n_{A,e}|}{n_{A,O}}$ или при сохранении общего объе-

ма постоянным, $\chi_{A,e} = \frac{|\Delta C_{A,e}|}{C_{A,O}}$, где $n_{A,e}$ и $C_{A,e}$ – равновесное (удельное) количество (концентрация) сырья.

Если в превращении участвуют два-три соединения, то можно рассчитать степень превращения (конверсию) по любому компоненту сырьевой смеси с учетом стехиометрии. Например, в уравнении (1.1) можно выразить конверсию как по сырью А, так и В:

$$X_B = X_A \cdot \frac{n_{A,O} \cdot b}{n_{B,O} \cdot a}, \quad X_A = X_B \cdot \frac{n_{B,O} \cdot a}{n_{A,O} \cdot b},$$

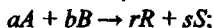
где a, b – стехиометрические коэффициенты.

Обобщая, можно дать определение для понятия конверсии сырья в технологическом процессе: это отношение массы одного из исходных компонентов сырьевой смеси, прореагировавшего по всем возможным направлениям химических реакций, к массе того же компонента, прошедшего через реакционный аппарат.

Поскольку исходное сырье содержит, как правило, ряд соединений (например, пустую породу, не участвующую в химических реакциях), а также соединения, которые при определенных условиях могут взаимодей-

ствовать независимо друг от друга, кроме целевого продукта могут образовываться и побочные продукты.

Сама химическая реакция может развиваться последовательно, а также параллельно. Во всех таких случаях используют понятие «полезная конверсия». Ее еще называют селективностью, или избирательностью, и обозначают как ϕ .



где R – например, целевой продукт, а S, Q – побочные продукты.

$$\phi = \frac{\Delta l_A, \text{ целевой продукт}}{\Delta l_A, \text{ на все продукты}}$$

Селективность – это отношение массы исходного сырья, израсходованного на целевой продукт, к массе того же исходного сырья, израсходованного на все продукты (основные и побочные).

Один из основных критериев совершенства ХТП является высокий выход целевого продукта.

В зависимости от задач расчета технологического процесса можно говорить об отдельных вариантах оценки выхода целевого продукта.

Например, если необходимо рассчитать предельно высокий (теоретический) выход, то расчет ведут по уравнению химической реакции с допущением, что исходное сырье полностью вступает в химическую реакцию и превращается в продукт. Следовательно, можно говорить о теоретическом (стехиометрическом) выходе ($P_{\text{стех.}}$), который составляет 100% или равен единице. Однако в производственных условиях достичь стехиометрического выхода не представляется возможным.

В производстве используются понятия «равновесный выход» и «практический выход» целевого продукта.

Равновесный выход рассчитывается для обратимых химических реакций и теоретически может быть рассчитан на основании констант равновесия, изобарного потенциала равновесных диаграмм состояния системы. Кроме того, может рассчитываться по экспериментальным данным. Во всяком случае, равновесный выход тесно связан и обусловлен такими факторами, как концентрация компонентов реакционной среды (C), температура, давление (T, P), при которых достигается равновесное состояние системы. Поэтому равновесный выход продукта (P^*) является функцией вышеперечисленных факторов и может изменяться для одних и тех же соединений в пределах от нуля до 1,0 (100%).

Таким образом, равновесный выход – это максимальный выход целевого продукта, который производится в системе взаимодействующих соединений в состоянии равновесия.

Если выразить выход продукта в виде формулы для расчета, то она примет следующий вид для необратимых химических реакций:

$$P_R = X_A(A \rightarrow R) \text{ или } P_R = X_A \cdot \varphi(A \rightarrow R + S)$$

и для обратимых химических реакций:

$$P_R^* = \frac{X_{A,e}}{X_A} (A \leftrightarrow R) \text{ или } P_R^* = \frac{X_{A,e}}{X_A} \cdot \varphi (A \leftrightarrow R + S),$$

где P_R – выход целевого продукта;

P_R^* – равновесный выход целевого продукта;

$X_{A,e}, X_A$ – конверсия сырья A и конверсия сырья A в условиях равновесия (при определенных условиях);

φ – селективность.

Практический выход целевого продукта – это отношение количества реально образованного продукта при определенных условиях за определенный промежуток времени взаимодействия сырья к теоретическому количеству, рассчитанному по уравнению реакции. Т.е. практический выход является не только функцией температуры, давления и концентрации, но и скорости реакции. Чем выше скорость, тем меньше время для достижения равновесия и тем ближе значение практического выхода к равновесному (предельному для данных условий). При времени достаточном для достижения равновесия значения их совпадают.

Взаимосвязь выхода продукта при различных методах расчета можно представить следующим образом:

$$P_{\text{стех}} \geq P^* \geq P_{\text{практ.}}$$

В производстве осуществляют расчет выхода целевого продукта на сырье, пропущенное через химический реактор, а также сырье, подвергшееся химическому превращению (сырье, проходя через реактор, превращается в целевой продукт, побочные продукты и частично остается неизменным – «проскок» или «транзит». Кроме того, есть еще и механические потери).

Выход по пропущенному сырью (или селективность по сырью) – есть отношение весового количества целевого продукта к его теоретическому, которое могло бы получиться из исходного сырья, прошедшего через реактор.

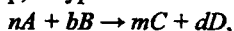
Выход по прореагировавшему сырью есть отношение массы полученного целевого продукта к теоретическому, рассчитанному количеству его, которое могло бы образоваться из прореагировавшего исходного сырья по всем направлениям.

Т.е. выход на прореагировавшее сырье – это доля полезно использованного сырья, вступившего в реакцию, т.е. избирательность, или селективность, по целевому продукту.

К основным показателям технологического процесса помимо названных (конверсия, селективность, выход целевого продукта) относятся расходные коэффициенты. Они характеризуют расход сырья, энергии, вспомогательных материалов, катализатора, металлов и пр. на единицу целевого (товарного) продукта.

Расходные коэффициенты бывают практические и стехиометрические (теоретические).

Стехиометрические расходные коэффициенты рассчитывают по уравнениям химической реакции, лежащим в основе химико-технологического процесса. Например, по уравнению



где A и B – сырье; C – целевой продукт.

Тогда $\gamma_{стех} = \frac{M_A \cdot n}{M_C \cdot m}$ (M_A и M_C – молекулярные массы сырья и продукта; n

и m – стехиометрические коэффициенты).

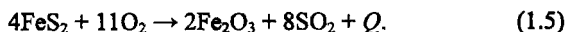
Практические расходные коэффициенты рассчитывают по данным материального баланса или эксперимента как отношение массы затраченного сырья к массе полученного целевого продукта:

$$\gamma_{практ} = \frac{m_c}{m_{ин}}.$$

Примеры решения задач

Теоретический анализ химико-технологического процесса при расчетах технологических задач рассмотрим на примере первой стадии производства серной кислоты – сжигание серного колчедана (FeS_2).

1. Анализ уравнений химических реакций, лежащих в основе химико-технологического процесса. Суммарное уравнение:



Развитие процесса постадийно:

а) диссоциация серного колчедана



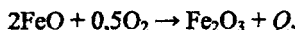
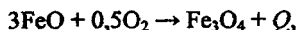
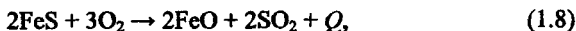
Химическая реакция необратимая, эндотермическая.

б) парообразная (газообразная) сера сгорает



Химическая реакция необратимая, экзотермическая.

в) сернистое железо взаимодействует с кислородом



2. Анализ процесса как технологической стадии производства серной кислоты.

Сырье:

1) железосодержащая руда, включающая составные следующие компоненты – пустая порода; дисульфид железа (FeS_2); влага W ;

2) воздух (принимая, что он состоит из азота – 79% об. и кислорода 21% об.). В реальном воздухе присутствует еще влага (W), углекислый газ (CO_2) и некоторые другие газообразные примеси.

Продукты химической реакции:

1) огарок: Fe_2O_3 (Fe_3O_4); пустая порода, а также FeS_2 (в случае неполного сгорания дисульфида железа);

2) целевой продукт: двуокись серы SO_2 , входящий в состав сернистого газа, % об.: $\text{SO}_2 - 9$; $82 - \text{N}_2$; $9 - \text{O}_2$ (сухой продукт) и влага (W).

Общая характеристика процесса горения руды – типичный гетерогенный процесс, в котором участвует сырье в разных фазовых состояниях: руда – твердое вещество в дробленном состоянии и воздух (источник кислорода) – газ.

Продукты реакции также находятся в разных фазовых состояниях: огарок (побочный продукт реакции, включающий инертное вещество – пустую породу; окислов железа и возможный остаток – дисульфид железа) – твердое вещество и другой продукт реакции – сернистый газ, содержащий целевой продукт технологического процесса – SO_2 , а также не использованный полностью в химической реакции кислород воздуха и его инертный компонент азот, а также влагу (если ее учитывают в составе воздуха).

Процесс горения (серного колчедана) является химически необратимым и экзотермическим процессом, т.е. идет со значительным выделением тепла.

3. Материальный баланс горения колчедана в общем виде.

В виде таблицы этот процесс в общем виде можно представить следующим образом:

Приход в ХТС		Расход из ХТС	
сырья	г, л, % масс.	продуктов реакции	г, л, % масс.
1. Колчедан, в т.ч.:	1. Сернистый газ,	
пустая порода	в т.ч.:
FeS_2	SO_2
влага (H_2O).....	...	кислород
2. Воздух, в т.ч.:	азот
кислород	влага (H_2O).....	...
азот	2. Огарок, в т.ч.:
влага (H_2O).....	...	пустая порода
		Fe_2O_3 (или Fe_3O_4)
		FeS_2 (если нет полного выгорания)
Итого:	...	Итого:	...

В соответствии с законом сохранения и превращения массы вещества

$$\text{масса веществ, вступивших в химическую реакцию} = \\ = \text{массе веществ, образовавшихся в процессе химической реакции.}$$

Таким образом, масса веществ, вступивших в ХТС, равна массе веществ, уходящих из ХТС.

В качестве ХТС можно рассматривать единичный аппарат, несколько аппаратов (основных и вспомогательных), соединенных в технологической системе, цех производства и производство в целом. Баланс входящих в ХТС сырьевых потоков и выходящих из нее продуктовых потоков определяется как материальный баланс системы.

Материальный баланс ХТС может быть представлен в виде общего уравнения, диаграммы (по потокам) либо в виде таблицы материального

баланса любого ХТП (см. УМК по курсу «Общая химическая технология»). На основании материального баланса решаются как теоретические, так и практические задачи химических превращений сырья в целевые продукты. В промышленном производстве чаще всего его используют для расчета производственных потерь и расходных коэффициентов, поскольку эти показатели значительно влияют на себестоимость производимой продукции. Производственные потери входят в расходную часть материального баланса и рассчитываются по разнице массы сырья входящего в ХТС и массы продуктового потока (по дебалансу).

Для периодических процессов расчет ведется в единицах массы, объема, количестве молей входящих и выходящих из ХТС материальных (жидких, твердых, газообразных) потоков за период химического взаимодействия сырья. Для непрерывных процессов оценка матбаланса производится в единицах массы, объема, молей в единицу времени (чаще всего в моль/с, кг/ч, т/сутки и т.д.).

Частным решением может быть расчет материального баланса по отдельным элементам. Например, для материального баланса процесса горения серного колчедана может быть произведен внутренний баланс по сере, железу, кислороду и т.д.

Расчет материального баланса может осуществляться и для чисто физических процессов, т.е. без учета химического превращения исходного сырья (чистого вещества) в новые целевые продукты. Например, материальные балансы теплообменного оборудования, выпарных аппаратов, сушилок, кристаллизаторов, сепараторов, фильтров, центрифуг и пр. На их основе рассчитываются расходы теплоносителей, хладагентов, расходы вторичного пара, механические потери сырья и целевых продуктов, выбросы в окружающую среду от производственного оборудования и прочие технологические, экологические задачи производства.

Материальный баланс физического, химического процесса, аппарата служит основой для расчета теплового баланса, содержание которого изложено в главе 4 данного пособия.

Задача № 1

Руда (железный колчедан), содержит 10% масс. влаги и 60% от абсолютно сухого вещества FeS_2 . Рассчитать абсолютное содержание серы в руде; пустой породы.

Решение:

В 1000 г руды содержится 100 г H_2O и 900 г сухого вещества. Содержание в руде FeS_2 составит

$$900 \times 0,6 = 540 \text{ г,}$$

следовательно, содержание пустой породы

$$900 - 540 = 360 \text{ г.}$$

Содержание серы:

$$M_{\text{FeS}_2} = 56 + 64 = 120.$$

Следовательно, содержание серы в руде – $540 \cdot \frac{64}{120} = 288 \text{ г,}$

железа – $540 - 288 = 252 \text{ г.}$

Абсолютное содержание серы в руде составляет

$$\frac{288}{1000} = 0,28, \text{ или } 28\%,$$

пустой породы – 36%,

FeS_2 – 54% (включая Fe – 25,5% и S – 28,8%),

влаги – 10%.

Задача № 2

Руду серный колчедан (1 кг) сжигают в печи при подаче кислорода. Содержание FeS_2 в рудной породе составляет 67% от абсолютно сухого вещества при влажности руды 10% масс. Руда включает также пустую породу.

Рассчитать абсолютное содержание FeS_2 в руде и абсолютное содержание серы в руде. Рассчитать расход кислорода на полное сжигание и пересчитать его расход на воздух.

Решение:

1. Схематично состав природной (ископаемой) руды можно представить следующим образом (рис. 1.2).

2. Расчёт ведём на 1000 г породы. Следовательно, масса влаги в ней составит 100 г, а доля абсолютно сухого вещества 900 г, в состав которого входит собственно FeS_2 ,

$$900 \times 0,67 = 603 \text{ г.}$$

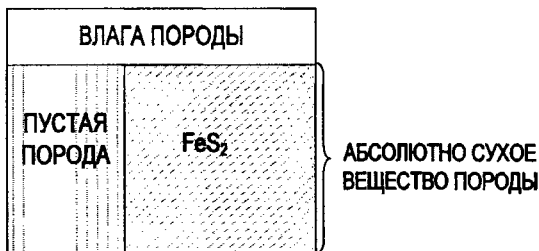


Рис. 1.2. Схема состава природной руды

Пустая порода $900 - 603 = 297$ г,

содержание серы $\frac{64 \cdot 603}{120} \cong 322$ г ($M_{FeS_2} = 120$).

3. Расход кислорода на полное горение колчедана находим по уравнению химической реакции (1.5)

$$O_2 = \frac{603 \cdot 11 \cdot 32}{4 \cdot 120} \cong 442 \text{ г, или } 309 \text{ мл.}$$

4. Следовательно, расход воздуха (н.у.) составит $\frac{309 \cdot 100}{21} = 1471$ нл.

Задача № 3

Сжигается 1 кг руды (железный колчедан), содержащей 5% масс. влаги и 20% масс. серы.

Определить теоретически максимальный выход SO_2 . Определить массу оксида железа в огарке (Fe_2O_3). Определить расход кислорода при полном сгорании серы. Пересчитать его расход на расход воздуха. Определить состав газов горения. Составить таблицу материального баланса процесса горения.

Решение:

1. Определяем состав руды железный колчедан:

– масса влаги в 1 кг составит

$$(W) 1000 \cdot 0,05 = 50 \text{ г;}$$

– абсолютно сухое вещество:

$$(АСВ) 1000 - 50 = 950 \text{ г;}$$

– масса серы составляет:

$$(S) 1000 \cdot 0,2 = 200 \text{ г.}$$

Поскольку сера в составе руды железный колчедан входит только в FeS_2 , тогда масса железа в сухом веществе руды составит

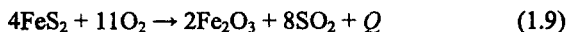
$$(\text{Fe}) \frac{200 \cdot 56}{64} = 175 \text{ г.}$$

Поскольку в сухом веществе руды присутствует FeS_2 в количестве $200 + 175 = 375$ г,

тогда остальная сухая масса руды приходится на пустую породу $950 - 375 = 575$ г.

2. Рассчитаем расход воздуха (кислорода) на горение и состав продуктов горения.

Горение колчедана описывается суммарным стехиометрическим уравнением



Поэтому можно рассчитать массу и объем как расходуемого на окисление кислорода, так и массу образующейся SO_2 .

На 4 моля FeS_2 расходуется 11 молей O_2 , следовательно, расход кислорода на полное сжигание FeS_2 составит

$$m_{x_{\text{O}_2}} = \frac{375 \cdot 11 \cdot 32}{4 \cdot 120} = \frac{132000}{480} = 275 \text{ г,}$$

$$\text{или } V_{\text{O}_2} = \frac{275 \cdot 22,4}{32} = 192,5 \text{ нл,}$$

а масса образующегося оксида серы составит

$$m_{x_{\text{SO}_2}} = \frac{375 \cdot 2 \cdot 64}{120} = 400 \text{ г,}$$

$$\text{или } V_{\text{SO}_2} = \frac{400 \cdot 22,4}{64} = 140 \text{ нл.}$$

Расход воздуха (теоретический) рассчитывается с учетом объемной доли в нем кислорода (21% об.), т.е. в данном случае он составит

$$V_{\text{воздуха}} = \frac{192,5 \cdot 100}{21} = 916,6 \text{ нл,}$$

$$m_{\text{воздуха}} = 916 \cdot 1,29 = 1182 \text{ г,}$$

в составе которого присутствует и азот (79% об.), поэтому его объем в составе воздуха составит

$$V_{\text{N}_2} = 916,6 \cdot 0,79 = 724,1 \text{ нл,}$$

$$m_{\text{N}_2} = 724,1 \cdot \frac{28}{22,4} = 905,1 \text{ г.}$$

3. Рассчитываем и составляем материальный баланс процесса горения железного колчедана (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Материальный баланс процесса горения железного колчедана

Приход	г	мл	% масс.	Расход	г	мл	% масс.
1. Колчедан, в т.ч.:		1000	100,0	1. Газы горения:			100
–влага		50	5	азот	905	724	
–сера		200	20	SO ₂	400	120	
–железо		175	17,5	влага	50	62	
–пустая порода		575	57,5	Σ=1355			
2. Воздух, в т.ч.:	1180	916	100	2. Огарок, в т.ч.:	825		100
–азот	905	724	77	–железаоксид	250		30,3
–кислород	275	192	23	–пустая порода	575		69,7
				Σ=825			
Итого:	2180 г			Итого:	2180 г		

4. Рассчитываем расходные коэффициенты:

$$\gamma_{теор}^{FeS_2} = \frac{56 + 64}{2 \cdot 64} = 0,93; \quad \gamma_{практ}^{колчедан} = \frac{1000}{400} = 2,5.$$

5. Схема технологического процесса сжигания колчедана в механической полочной печи представлена на рис. 1.3.

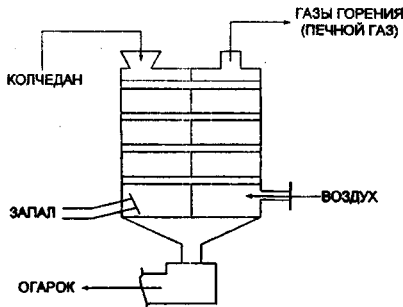


Рис. 1.3. Схема технологического процесса сжигания колчедана в механической полочной печи

6. Очевидно, что для снижения расходных коэффициентов необходимо обогащение руды по основному сырьевому компоненту – FeS₂.

Задача № 5

Определить теоретические расходные коэффициенты железных руд, используемых при выплавке чугуна, содержащего 92% железа, при условии, что в рудах отсутствует пустая порода и примеси.

Молекулярная масса железных руд: шпатовый железняк (FeCO_3) – 115,8; лимонит ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) – 373; гетит ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – 355; красный железняк (Fe_2O_3) – 159,7; магнитный железняк (Fe_3O_4) – 231,5.

Решение:

1. В кмоль FeCO_3 (115,8) содержится кмоль Fe (55,9), следовательно, для производства 1 т чугуна, в котором содержится 920 кг Fe потребуется

$$\frac{920 \cdot 115,8}{55,9} = 1900 \text{ кг (1,9 т) } \text{FeCO}_3,$$

т.е. расходный коэффициент (теоретический) составит

$$\gamma_{\text{теор}} = \frac{1,9 \text{ т FeCO}_3}{1,0 \text{ т чугуна}} = 1,9.$$

2. Для лимонита ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) расходный коэффициент составит

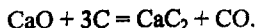
$$\gamma_{\text{теор}} = \frac{920 \cdot 373}{4 \cdot 55,9 \cdot 1,0} = \frac{1,55 \text{ т } (2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})}{1,0 \text{ т чугуна}} = 1,55.$$

Задача № 6

Определить расходные коэффициенты в производстве карбида кальция (технического), содержащего (% масс.): CaC_2 – 78; CaO – 15; C – 3 и прочие примеси – 4. известь содержит 96,5% CaO . Содержание (%) в коксе: зола – 4; летучие – 4; влага – 3.

Решение:

Химическая реакция, лежащая в основе производства карбида кальция, имеет следующий вид:



По условию в 1 т производимого продукта – технического карбида кальция (CaC_2), содержится: 0,78 т CaC_2 ; CaO – 0,15 т; C – 0,03 т и прочие примеси – 0,04 т.

В качестве сырья используются техническая известь (источник CaO) и кокс (источник углерода), при этом по условию известь содержит, собственно, CaO – 96,5%, остальное – примеси; кокс содержит – углерод (C), золу (минеральные компоненты), летучие компоненты и влагу.

1. Рассчитаем расход извести (т):

– по стехиометрическому соотношению

$$0,78 \cdot 56/64 = 0,675;$$

– необходимо на 1 т продукта

$$1,0 \cdot 0,15 = 0,15;$$

- суммарно расход СаО составит $0,675 + 0,15 = 0,825$;
- расход технической извести (с содержанием СаО – 96,5%) составит $0,825/0,965 = 0,85$.

2. Рассчитаем расход углерода (т):

- на образование CaC_2 $0,78 \cdot 3 \cdot 12/64 = 0,44$;
- непрореагировавшего $1 \cdot 0,03 = 0,03$;
- суммарный расход углерода $0,44 + 0,03 = 0,47$.

3. Содержание углерода в коксе составит

$$100 - (4 + 4 + 3) = 89 \%$$

откуда расход кокса –

$$\frac{0,47}{0,89} = 0,53 \text{ т.}$$

При этом процентное содержание компонентов кося, %: С – 89; минеральные соли – 4; летучие – 4 и влага – 3.

4. Определим содержание летучих (газообразных) продуктов:

- образование СО (по стехиометрическому соотношению

$$\frac{0,675 \cdot 28}{56} = 0,3375;$$

- влага + летучие (из кокса) – 0,0371;
- общее содержание $0,3375 + 0,0371 = 0,3746 \approx 0,38$.

Таблица 1.2

Материальный баланс процесса производства карбида кальция

Приход	т	Расход	т
1. Техническая известь, в т.ч.:	0,850	1. Карбид кальция (цел. продукт) (технич.), в т.ч.:	1,0
– СаО	0,825	– CaC_2	0,780
– примеси	0,025	– СаО	0,150
		– С	0,030
		– прочие примеси	0,040
2. Кокс, в т.ч.:	0,530	2. Газообразные продукты, в т.ч.:	0,3746
– С	0,4717	– СО	0,3375
– мин.соли (зола)	0,0212	– летучие соединения	0,0212
– летучие соединения	0,0212	– влага	0,0159
– влага	0,0159		
Итого:	1,38	Итого:	1,38

Проверить расчет можно по дебалансу (табл. материального баланса) статей прихода и расхода. В частности количество газообразных продуктов составляет: $1,38 - 1,0 = 0,38$, что соответствует расчетным данным.

Задача № 7

Свежедобытый торф, имеющий следующий состав, % масс.: влага – 85,2; летучие соединения – 8,8; кокс – 5,2; зола (неорганические соединения) – 0,8; после сушки изменил содержание влаги (стало 10% масс.).

Определить: состав абсолютно сухого торфа; состав торфа после сушки. Сделать материальный баланс процесса сушки на 100 кг свежедобывтого торфа. Принять, что сушка осуществляется воздухом с расходом $20 \text{ м}^3/\text{ч}$, продолжительность сушки составляет 4 ч.

Краткое описание процесса: сушка торфа в производстве используется для повышения теплотворной способности топлива за счет удаления избыточной влаги. При этом не происходит химических превращений в составе торфа, а лишь физический процесс – сушка.

Решение:

1. В 100 кг свежедобывтого торфа содержится:

$$8,8 + 5,2 + 0,8 = 14,8 \text{ кг летучих, кокса и золы,}$$

т.е. абсолютно сухого вещества, и $100 - 14,8 = 85,2$ кг влаги.

2. Рассчитаем состав абсолютно сухого торфа составляет:

$$- \text{летучие} - \frac{8,8}{14,8} \cdot 100 = 59,45\%;$$

$$- \text{кокс} - \frac{5,2}{14,8} \cdot 100 = 35,14\%;$$

$$- \text{зола} - \frac{0,8}{14,8} \cdot 100 = 5,41\%.$$

3. В торфе после сушки влаги осталось 10 кг на 100 кг, а 90 кг – абсолютно сухого вещества, в котором сохранилось соотношение и состав компонентов, а именно:

$$- \text{летучие} \ 90 \cdot 0,5945 = 53,51 \text{ кг, или } 59,45\%;$$

$$- \text{кокс} \ 90 \cdot 0,3514 = 31,63 \text{ кг, или } 35,14\%;$$

$$- \text{зола} \ 90 \cdot 0,0541 = 4,869 \text{ кг, или } 5,41\%.$$

Итого: 90,00 кг, или 90,0%.

Но в 100 кг подсушенного торфа входит помимо 90 кг сухого вещества еще 10 кг влаги.

Схематично процесс сушки торфа представляется следующим образом (рис. 1.4).

4. Общий расход воздуха за время сушки составит

$$20 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 4 \text{ ч} = 80 \text{ м}^3,$$

или с учетом плотности воздуха при н.у. $1,29 \text{ кг/м}^3$ масса израсходованного воздуха на сушку составит

$$80 \text{ м}^3 \cdot 1,29 \text{ кг/м}^3 = 103,2 \text{ кг.}$$

5. Материальный баланс сушки торфа представлен в табл. 1.3.

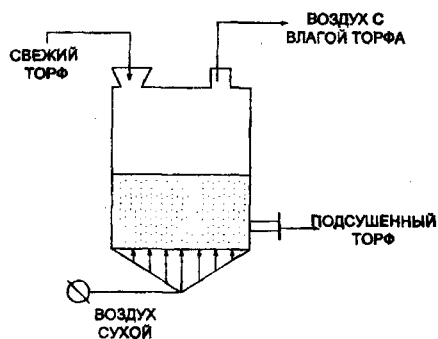


Рис. 1.4. Схема материальных потоков процесса сушки торфа

Таблица 1.3

Материальный баланс сушки 100 кг влажного торфа

Приход	кг	Расход	кг
1. Свежедобытый торф, в т.ч.:	100	1. Подсушенный торф, в т.ч.:	16,44
– влага (85,2%)	85,2	– влага	1,64
– кокс	5,2	– кокс	5,2
– зола	0,8	– зола	0,8
– летучие	8,8	– летучие	8,8
2. Воздух сухой	103,2	2. Воздух с влагой торфа в т.ч.:	186,76
		– сухой воздух	103,2
		– влага	83,56
Итого:	203,2	Итого:	203,2

При расчете исходим из того, что при сушке из исходного влажного торфа удаляется только влага. Т.е. в сухом торфе сохраняется все сухое вещество – 14,85 кг, которое составит 90%, а 10% масс. (по условию) приходится на остаточную массу влаги.

Задача № 8

Влажность 125 т каменного угля при его хранении на складе изменилась с 6,5% масс. до 4,2% масс.

Определить количество влаги, ушедшей из угля за время хранения, и, соответственно, как изменился вес угля. Составить материальный баланс физического процесса естественного ухода влаги из массы угля.

Решение:

1. Рассчитываем количество влаги в исходном угле:

$$\frac{125 \cdot 6,5}{100} = 8,125 \text{ т.}$$

2. Рассчитываем количество сухого вещества в исходном угле:

$$125 - 8,125 = 116,875 \text{ т.}$$

3. По условию содержание сухого вещества составляет:

$$100 - 4,2 = 95,8\%$$

4. Тогда масса угля после хранения составит:

$$\frac{116,875 \cdot 100}{95,8} = 122 \text{ т.}$$

Таблица 1.4

Материальный баланс процесса изменения состава угля при его хранении на складе

Приход	т	Расход	т
1. Каменный уголь, в т.ч.:	125,0	1. Каменный уголь после хранения, в т.ч.:	122,0
– сухое вещество	116,875	– сухое вещество	116,875
– влага	8,125	– влага	5,125
		2. Влага, ушедшая при хранении	3,0
Итого:	125		125

Задача № 9

На кристаллизацию поступает 10 т насыщенного водного раствора хлористого калия при 100 °С. Во время кристаллизации раствор охлаждается до 20 °С. Определить выход кристаллов КСl, если растворимость его при 100 °С составляет 56,7 г, а при 20 °С – 34,0 г на 100 г воды.

Составить материальный баланс процесса кристаллизации.

Краткое описание процесса: процесс кристаллизации, также как и процесс испарения (в предыдущих задачах), является физическим процессом, т.е. не происходит химических превращений с исходным сырьем.

Решение:

1. Рассчитываем концентрацию раствора хлористого калия при 100 °С и 20 °С.

$$C_{100^{\circ}\text{C}} = \frac{56,7}{56,7 + 100} = 36,2\%$$

$$C_{20} = \frac{34}{34+100} = 25,4\%$$

2. Определяем массу KCl в 10 т насыщенного водного раствора
 $10 \cdot 0,362 = 3,62$ (т).

3. Примем за массу выпадающих кристаллов KCl при снижении температуры величину x , тогда масса исходного маточного раствора составит $(10 - x)$, а масса кристаллов KCl в маточном растворе при 20°C составит $(10 - x) \cdot 0,254$. Материальный баланс по массе кристаллов до и после охлаждения рассола будет иметь следующий вид:

$$3,62 = x + (10 - x) \cdot 0,254, \text{ или } 3,62 = x + 2,54 - 0,254x,$$

$$1,08 = 0,746x,$$

$$x = 1,45 \text{ т.}$$

4. Таким образом, выход кристаллов составит 1,45 т.

5. Составляем материальный баланс процесса кристаллизации (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Материальный баланс процесса кристаллизации KCl

Приход	т	Расход	т
1. Насыщенный раствор KCl, в т.ч.:	10,0	1. Кристаллы KCl	1,45
- вода	6,38	2. Маточный раствор, в т.ч.:	
- KCl	3,62	- вода	8,55
		- KCl	6,38
			2,17
Итого:	10,0	Итого:	10,0

Задача № 10

При обогащении 6 т руды, содержащей 2% цинка, получено 350 кг концентрата, содержащего 25% цинка.

Определить выход концентрата, степень извлечения цинка и степень концентрации. Составить материальный баланс процесса.

Краткое описание процесса: обогащение природной руды по определенному соединению является чисто физическим процессом разделения природной смеси за счет разных плотностей ее компонентов.

Решение:

1. Рассчитываем выход цинкосоодержащего концентрата

$$P_{\text{конц}} = \frac{350}{6000} \cdot 100 = 5,83 \%$$

2. Определяем содержание цинка в исходной руде

$$m_{\text{Zn}}^{\text{к}} = 6000 \cdot 0,02 = 120 \text{ (кг Zn)}.$$

3. Определяем содержание цинка в концентрате

$$m_{\text{ц}}^{\text{к}} = 350 \cdot 0,25 = 87,5 \text{ (кг Zn)}$$

Следовательно, степень извлечения цинка (в концентрате) составляет

$$\frac{87,5}{120} \cdot 100 = 72,9 \%$$

4. Степень концентрации цинка при обогащении руды составит

$$\frac{25}{2} = 12,5 \text{ раз.}$$

Таблица 1.6

Материальный баланс процесса обогащения цинкосодержащей руды

Приход	кг	Расход	кг
1. Руда цинкосодержащая, в т.ч.:	6000	1. Концентрат цинкосодержащий, в т.ч.:	350
– цинк	120	– цинк	87,5
– пустая порода	5880	– пустая порода	262,5
		2. Обедненная руда, в т.ч.:	5650
		– цинк	32,5
		– пустая порода	5617,5
Итого:	6000	Итого:	6000

5. Рассчитываем количество обедненной породы (по дебалансу), выходящей из процесса:

$$6000 - 350 = 5650 \text{ (кг)}$$

6. Рассчитываем массу в обедненной породе цинка (по дебалансу):

$$120 - 87,5 = 32,5 \text{ (кг)}$$

7. Рассчитываем массу пустой породы в обедненной руде (по дебалансу):

$$5650 - 32,5 = 5617,5 \text{ (кг)}$$

8. Рассчитываем концентрацию остаточного цинка в обедненной руде:

$$\left(\frac{32,5}{5650} \right) \cdot 100 = 0,575 \%$$

Схема материальных потоков процесса обогащения руды по цинку представлена на рис. 1.5

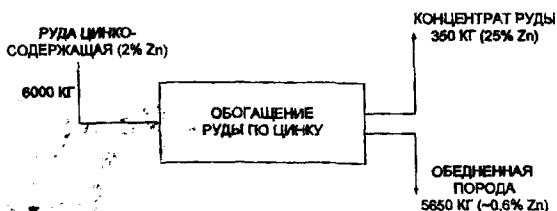


Рис. 1.5. Схема материальных потоков в процессе обогащения руды по цинку

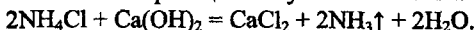
Задача № 11

Какой объем аммиака (н.у.) можно получить из 214 г хлорида аммония, если выход аммиака в массовых долях от теоретически возможного составляет 95%.

Составить материальный баланс процесса. Определить расходные коэффициенты.

Решение:

Уравнение химической реакции получения аммиака:



1. Рассчитаем по уравнению реакции теоретически возможный выход аммиака из 214 г NH_4Cl :

$$P_{\text{теор}}^{\text{NH}_3} = \frac{214 \cdot 34}{107} = 68 \text{ г.}$$

2. Рассчитаем массу аммиака, полученного фактически:

$$P_{\text{факт}}^{\text{NH}_3} = 68 \cdot 0,95 = 64,6 \text{ г.}$$

3. Пересчитаем массу аммиака на объем при н.у.:

$$V_{\text{факт}}^{\text{NH}_3} = \frac{64,6 \cdot 22,4}{17} = 85 \text{ нл.}$$

4. Определим теоретический расход $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

$$m_{\text{теор}}^{\text{Ca}(\text{OH})_2} = \frac{219 \cdot 74}{107} = 148 \text{ г.}$$

5. Определим практический расход $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

$$m_{\text{факт}}^{\text{Ca}(\text{OH})_2} = \frac{214 \cdot 0,95 \cdot 74}{107} = 140,6 \text{ г.}$$

6. Рассчитаем массу не прореагировавшего $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

$$148 - 140,6 = 7,4 \text{ г.}$$

7. Определяем массу образовавшегося CaCl_2 :

$$m_{\text{CaCl}_2} = \frac{140,6 \cdot 111}{74} = 210,9 \text{ г.}$$

8. Рассчитаем расход хлорида аммония фактический:

$$214 \cdot 0,95 = 203,3 \text{ г,}$$

следовательно, транзит его составит

$$m_{\text{NH}_4\text{Cl}} = 214 - 203,3 = 10,7 \text{ г.}$$

9. Рассчитаем массу реакционной воды:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{140,6 \cdot 36}{74} = 68,4 \text{ г.}$$

Схематично представить материальные потоки данного процесса можно следующим образом (рис. 1.6).

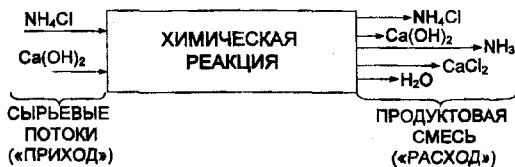


Рис. 1.6. Схема материальных потоков получения аммиака из хлорида аммония

10. Составим материальный баланс процесса (табл. 1.7) получения аммиака.

Таблица 1.7

Материальный баланс получения аммиака из хлорида аммония

Приход	г		л	Расход	г		л (н.у.)
	г	л			г	л (н.у.)	
1. Хлорид аммония	214			1. Хлорид аммония (транзит)	10,7		
2. Гидрооксид кальция	148			2. Гидрооксид кальция (транзит)	7,4		
				3. Хлорид кальция	210,9		
				4. Масса (объем) аммиака	64,6	85	
				5. Реакционная вода	68,4		
Итого:	362			Итого:	362		

11. Рассчитаем теоретические и практические расходные коэффициенты:

$$M_{NH_4Cl} = 14 + 4 + 35,5 = 53,5,$$

$$M_{Ca(OH)_2} = 40 + 34 = 74,$$

$$M_{NH_3} = 14 + 3 = 17.$$

$$\gamma_{NH_4Cl}^T = \frac{53,5}{17} = 3,14,$$

$$\gamma_{NH_4Cl}^{пр} = \frac{214}{64,6} = 3,31,$$

$$\gamma_{Ca(OH)_2}^T = \frac{74}{2 \cdot 17} = 2,18,$$

$$\gamma_{Ca(OH)_2}^{пр} = \frac{148}{64,6} = 2,3.$$

$$\frac{3,14}{3,31} \cong 0,95 (95\%) \text{ и } \frac{2,18}{2,3} \cong 0,95 (95\%).$$

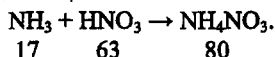
Таким образом, теоретические расходные коэффициенты по сырью составляют от практической величину 0,95, что соответствует исходным данным по выходу целевого продукта (NH_3) от теоретической величины.

Задача № 12

Составить материальный баланс производства аммиачной селитры на основе сырья – азотной кислоты, аммиачной воды (расходные коэффициенты и выход целевого продукта). Определить технологические показатели процесса.

Исходные данные: производительность установки 1000 кг/ч, состав селитры (аммиачная селитра 98% масс., вода 2% масс.), состав азотной кислоты (азотная кислота 60% масс., вода 40% масс.), состав аммиачной воды (аммиак 25% масс.), конверсия аммиака 100%, конверсия азотной кислоты 100%.

Краткое описание процесса: азотная кислота и аммиачная вода (аммиак) поступают в химический реактор – нейтрализатор, где при 110°C протекает реакция нейтрализации:



Далее водный раствор аммиачной селитры подают в вакуум-выпарной аппарат для удаления воды, а плав селитры после выпарки – на грануляцию.

Решение:

1. Составим схему материальных потоков (рис. 1.7). Исходя из заданного количества продукта (1000 кг/ч 98%-ной селитры) и стехиометрии реакции рассчитаем материальный баланс.



Рис. 1.7. Схема материальных потоков нейтрализатора

2. Определим количество аммиачной селитры в товарном продукте:

$$0,98 \cdot 1000 = 980 \text{ кг/ч}, \quad \frac{980}{80} = 12,25 \text{ кмоль/ч},$$

а также количество воды:

$$1000 - 980 = 20 \text{ кг/ч}.$$

3. Рассчитаем расход азотной кислоты (100%-ной) на получение 12,25 кмоль/ч селитры. По стехиометрии ее расходуется столько же (кмоль/ч), сколько образовалось селитры:

$$12,25 \text{ кмоль/ч, или } 12,25 \cdot 63 = 771,75 \text{ кг/ч.}$$

Поскольку в условии задачи задана полная (100%) конверсия кислоты, это и будет ее поданное количество. Если же конверсия меньше 100%, нужно вычислить непрореагировавшее и поданное количество реагента.

В процессе участвует разбавленная кислота – 60%-ная:

$$\frac{771,75}{0,6} = 1286,25 \text{ кг/ч,}$$

в т.ч. воды:

$$1286,25 - 771,75 = 514,5 \text{ кг/ч.}$$

4. Аналогично рассчитываем расход аммиака (100%-ного) на получение 12,25 кмоль/ч селитры. Он составит 12,25 кмоль/ч, или

$$12,25 \cdot 17 = 208,25 \text{ кг/ч.}$$

В пересчете на 25% аммиачную воду это составит

$$\frac{208,25}{0,25} = 833 \text{ кг/ч,}$$

в т.ч. воды

$$833 - 208,25 = 624,75 \text{ кг/ч.}$$

5. Найдем общее количество воды в нейтрализаторе, поступившее с реагентами:

$$514,5 + 624,75 = 1139,25 \text{ кг/ч.}$$

6. Определим количество водяного пара, образовавшегося при упаривании раствора селитры (20 кг/ч остается в товарном продукте):

$$1139,25 - 20 = 1119,25 \text{ кг/ч.}$$

7. Рассчитаем материальный баланс процесса в нейтрализаторе (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Материальный баланс нейтрализатора

Приход	кг/ч	Расход	кг/ч
60% азотная кислота, в т.ч.:	1286,25	98% аммиачная селитра, в т.ч.:	1000
– азотная кислота	771,75	– аммиачная селитра	980
– вода	514,5	– вода	20
25% аммиачная вода, в т.ч.:	833	Водяной пар	1119,25
– аммиак	208,25		
– вода	624,75		
Итого:	2119,25	Итого:	2119,25

8. Рассчитаем технологические показатели процесса производства:

– теоретические расходные коэффициенты:

▪ по кислоте

$$\gamma_{HNO_3}^T = \frac{M_{HNO_3}}{M_{NH_4NO_3}} = \frac{63}{80} = 0,78 \text{ кг/кг};$$

▪ по аммиаку

$$\gamma_{NH_3}^T = \frac{M_{NH_3}}{M_{NH_4NO_3}} = \frac{17}{80} = 0,21 \text{ кг/кг};$$

– фактические расходные коэффициенты:

▪ по кислоте

$$\gamma_{HNO_3}^\Phi = \frac{M_{HNO_3}}{M_{NH_4NO_3}} = \frac{1286,25}{1000} = 1,28 \text{ кг/кг};$$

▪ по аммиаку

$$\gamma_{NH_3}^\Phi = \frac{M_{NH_3}}{M_{NH_4NO_3}} = \frac{833}{1000} = 0,83 \text{ кг/кг}.$$

9. Определим выход селитры на поданную кислоту. В процессе нейтрализации проходила только одна химическая реакция, конверсия сырья при этом равнялась 1 (т.е. произошло полное превращение), потери отсутствовали, значит, фактический выход равен теоретическому:

$$\beta = \frac{Q_\Phi}{Q_T} \cdot 100 = \frac{980}{980} \cdot 100 = 100\%.$$

Задача № 13

На упаривание поступает 9200 кг 56%-ного раствора аммиачной селитры NH_4NO_3 . После упаривания получается 5350 кг раствора с концентрацией 69% NH_4NO_3 . Составить материальный баланс процесса упаривания. Определить расход образующегося пара вторичного и рассчитать производственные потери. Выпарка 56% раствора аммиачной селитры осуществляется в выпарном аппарате, из которого выходит уже упаренный 96% раствор селитры, а также пар вторичный.

Краткое описание: в выпарной аппарат поступает 9200 кг 56% раствора аммиачной селитры. Расходная часть процесса упаривания будет состоять из: а) выпаренного раствора аммиачной селитры в количестве 5350 кг; б) вторичного пара (пара, выделяющегося из раствора); в) производственных потерь, которые подсчитываются по разности между массой поступающего в аппарат раствора и количеством выпаренного раствора и вторичного пара.

Подсчитать количество пара, удаляющегося из раствора аммиачной селитры в выпарном аппарате (в кг). Рассчитать производственные потери.

Решение:

1. Рассчитаем количество растворителя (воды), поступающего на выпаривание с 56%-ным раствором селитры:

$$9200 \cdot (1 - 0,56) = 4048 \text{ кг.}$$

2. Рассчитаем количество растворителя (воды), уходящего из выпарного аппарата с выпаренным раствором селитры:

$$5350 \cdot (1 - 0,96) = 214 \text{ кг.}$$

3. Определяем количество растворителя (воды), удаляющегося из раствора в виде вторичного пара, и количество выпаренного раствора и вторичного пара:

$$4048 - 214 = 3834 \text{ кг,}$$

$$5350 + 3834 = 9184 \text{ кг.}$$

4. Рассчитаем производственные потери:

$$9200 - 9184 = 16 \text{ кг.}$$

Результаты подсчетов оформляем в табл. 1.9 материального баланса.

Таблица 1.9

Материальный баланс процесса упаривания

Приход	кг	Расход	кг
1. Раствор неупаренный аммиачной селитры (концентрация 56%)	9200	1. Раствор выпаренный (концентрация 96%)	5350
		2. Пар вторичный	3834
		3. Производственные потери	16
Итого:	9200	Итого:	9200

Задача № 14

Сколько можно получить (теоретически) бихромата натрия $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ из 1 кг хромистого железняка, содержащего 70% $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$? Молярная масса $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} - 223,8$; $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - 262$.

Решение:

Процесс получения $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ из хромистого железняка схематически можно выразить уравнениями:



Отсюда следует, что 1 кмоль (223,8 кг) $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ дает в результате реакции 1 кмоль (262 кг) бихромата натрия $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Если в руде содержится 70% хромистого железняка, то для получения тех же 262 кг $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ потребуется руды $223,8 \cdot 0,70 = 320$ кг. Следовательно, из 1 кг хромистого железняка, содержащего 70% $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$, можно теоретически

получить $\frac{262}{320} = 0,82$ кг $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

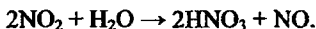
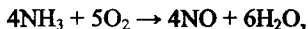
Задача № 15

Сколько потребуется аммиака для получения 1 т азотной кислоты, если производственные потери азота составляют 6%?

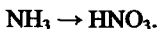
Краткое описание процесса: получение азотной кислоты из аммиака идет в несколько стадий: сначала аммиак окисляется в окись азота, затем в двуокись азота, которая многократным поглощением водой или слабой азотной кислотой превращается в HNO_3 .

Решение:

Схематически процесс синтеза кислоты можно представить следующими химическими реакциями:



Если расчет вести последовательно по всем реакциям, то он будет громоздким. Расчет упростится, если все три реакции заменить одной схемой превращения начального сырья NH_3 в конечный продукт – HNO_3 :

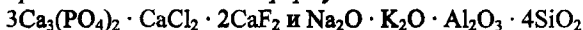


Отсюда следует, что из 1 кмоль (17 кг) NH_3 теоретически получается 1 кмоль (63 кг) HNO_3 . Для получения 1 кг HNO_3 с учетом 6% потерь потребуется NH_3

$$0,94 \cdot \frac{17,0}{63,0} = 0,254 \text{ кг.}$$

Задача № 16

Анализ нефелин-апатитовой руды показал, что она содержит 20,6% P_2O_5 и 8% Al_2O_3 . Подсчитать отдельно содержание в руде апатита и нефелина, если принять их химические формулы соответственно



и если весь P_2O_5 в руде связан в виде апатита, а Al_2O_3 – в виде нефелина.

Решение:

Молекулярные массы: апатита – 1198,0; нефелина – 498,3; окиси алюминия – 101,9; полупятиоксида фосфора – 142,1. Химическая формула апатита показывает, что в состав его молекулы входят 6 атомов фосфора, которые соответствуют трем молекулам P_2O_5 . Следовательно, 20,6% P_2O_5 в составе руды будут соответствовать содержанию апатита в количестве

$$\frac{20,6 \cdot 1198,0}{142,1 \cdot 3} = 57,9 \%.$$

Делая аналогичный подсчет содержания нефелина в руде по количеству в ней Al_2O_3 , получим

$$\frac{8,0 \cdot 498,3}{101,96} = 39,1\%$$

Таким образом, в нефелин-апатитовой руде содержится 57,9% апатита, 39,1% нефелина и 3,0% пустой породы.

Задача № 17

Определить состав генераторного газа, если в генератор поступает паровоздушная смесь в отношении 1:3, т.е. на 1 объем водяного пара 3 объема воздуха.

Справочные данные: прием состав воздуха (по объему): 21% O_2 и 79% N_2 .

Решение:

В 100 м^3 паровоздушной смеси при соотношении в ней водяного пара и воздуха 1:3 содержится, м^3 :

- H_2O (пар) $\frac{100 \cdot 1}{4} = 25$;
- O_2 $0,21 \cdot \frac{100 \cdot 3}{4} = 15,75$;
- N_2 $0,79 \cdot \frac{100 \cdot 3}{4} = 59,25$.

При газификации протекают химические реакции (теоретически)



Таким образом, из одного объема H_2O получается один объем H_2 и один объем CO , а из одного объема O_2 образуется два объема CO . Следовательно, на каждые 100 м^3 паровоздушной смеси при содержании в ней $25 \text{ м}^3 H_2O$ и $15,75 \text{ м}^3 O_2$ получается $25 \text{ м}^3 H_2$, $25 \text{ м}^3 CO$ (за счет H_2O) и $15,75 \cdot 2 = 31,5 \text{ м}^3 CO$ (за счет O_2);

останутся непрореагировавшими $59,25 \text{ м}^3$ азота. Всего из 100 м^3 паровоздушной смеси образуется

$$(25 + 25 + 31,5 + 59,25) = 140,75 \text{ м}^3 \text{ газа,}$$

теоретический состав его (в % об.):

- H_2 $\frac{100 \cdot 25}{140,75} = 17,8$;
- CO $\frac{100 \cdot (25 + 31,5)}{140,75} = 40,1$;
- N_2 $\frac{100 \cdot 59,25}{140,75} = 42,1$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Сжигается 5 кг руды железный колчедан, содержащий 1% влаги и 40% от сухой руды FeS_2 . Сгорают 80% серы от ее исходного количества. При этом используется для горения воздух в 10 раз больше против стехиометрии.

Определить состав газов сжигания руды; выход SO_2 ; состав огарка; расход сухого воздуха на горение. Определить расход кислорода (теоретический и практический) на горение руды. Составить материальный баланс процесса и отдельно матбаланс по сере.

Ответ:

- 1) CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O – 568, 7020, 29343, 0,25 (л);
- 2) выход: SO_2 – 1621,5 г;
- 3) пустая порода – 2850, Fe_2O_3 – 1013, FeS_2 – 380 (г);
- 4) расход воздуха – 37142 л;
- 5) теоретический расход кислорода – 780 л.

2. Железная руда при сушке на воздухе потеряла 5% веса. При анализе воздушной сухой руды найдено в ней 3% влаги, 61,5% Fe и 9% пустой породы.

Подсчитать начальный состав руды (перед сушкой), считая, что все железо в ней находится в виде Fe_2O_3 .

Ответ: 7,9% влаги, 83,6% Fe_2O_3 и 8,6% пустой породы.

3. Рассол, содержащий 21,5% KCl и 16,9% NaCl, подвергают кристаллизации. Состав маточного раствора, выходящего из кристаллизатора: 12,5% KCl и 18,5% NaCl.

Подсчитать: а) количество маточного раствора, получаемого из 1 т первоначального рассола; б) количество выкристаллизовавшегося KCl (в процентах). Составить материальный баланс процесса.

Ответ: а) 913,5 кг; б) 47,0%

4. Сухой конвертированный газ (азотоводородная смесь) состава 28% CO_2 , 3% CO, 51,4% H_2 , 16,8% N_2 , 0,5% ($\text{O}_2 + \text{CH}_4$) и 0,3% H_2S подвергается полной очистке от CO_2 , CO и H_2S .

Подсчитать: а) состав газа после очистки; б) сколько можно получить элементарной серы из 1000 м³ сухого газа, если очистку его от H_2S вести с утилизацией серы. Составить материальный баланс процесса очистки.

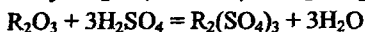
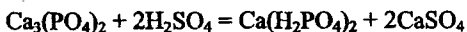
Ответ: а) 74,8% H_2 , 24,5% N_2 и 0,7% ($\text{O}_2 + \text{CH}_4$); б) 2,8 кг серы.

5. Рассол в количестве 9500 кг с концентрацией 20% упаривают до концентрации 65%.

Составить материальный баланс процесса упаривания с учетом производственных потерь 0,2%.

Ответ: приход-рассол неупаренный 9500 кг; расход-рассол упаренный до концентрации 65% 2917 кг; выпарено растворителя 6564 кг, потери 19 кг.

6. Суперфосфат получается разложением фосфоритов серной кислотой. При этом протекают следующие реакции с основными составными частями фосфорита:



Подсчитать расход серной кислоты для этого процесса, если суперфосфат имеет в своем составе 25,5% P_2O_5 , 4,1% CO_2 и 5,9% R_2O_3 .

Ответ: 0,591 кг моногидрата серной кислоты на 1 кг фосфорита.

7. Суперфосфат $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ получают разложением фосфорита $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ с серной кислотой. Действуя на суперфосфат аммиаком, получают аммонизированный суперфосфат $\text{CaHPO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Смешение суперфосфата с сульфатом аммония дает аммиачный суперфосфат $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Подсчитать: а) сколько теоретически можно получить аммиачного или аммонизированного суперфосфата из 1 т 60%-ного фосфорита; б) сколько для этого требуется 25%-ной аммиачной воды и сульфата аммония. Потери не учитываются.

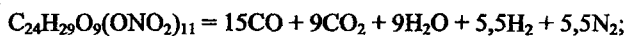
Ответ: а) 582 кг аммиачного суперфосфата или 486 кг аммонизированного суперфосфата; б) 157 кг аммиачной воды и 212 кг сульфата аммония.

8. Производительность аммиачного завода 34000 кг NH_3 в сутки. Какой минимальной емкости должны быть газгольдеры для H_2 и N_2 , чтобы азота и водорода было не менее двухчасового запаса?

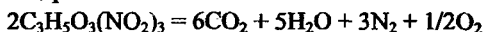
Ответ: 1867 м³ N_2 и 5600 м³ H_2 .

9. Подсчитать объем газа и пара (приведенных к нормальным условиям), которые получаются при взрыве 1 кг следующих взрывчатых веществ:

а) пироксиллина

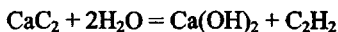


б) нитроглицерина



Ответ: а) газа ~ 682 л, водяного пара ~ 175 л; б) газа ~ 469 л, водяного пара ~ 247 л.

10. Сколько требуется карбида кальция для получения 100 л сухого ацетилена (при н.у.), если коэффициент использования CaC_2 равен 0,91. Реакция протекает по уравнению



Составить материальный баланс синтеза ацетилена.

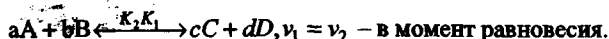
Ответ: 0,311 кг.

11. Известняк, кроме карбида кальция, содержит карбонат магния и нерастворимый остаток. После обработки известняка 12%-ной (по массе) серной кислотой остаток от реакции подвергается анализу. Анализ показал, что в остатке содержится (по массе): 8,56% CaSO_4 , 5,23% MgSO_4 , 1,05% H_2SO_4 , 0,12% CO_2 , 0,53% нерастворимого остатка и 84,51% H_2O . Подсчитать: а) состав взятого известняка; б) избыток взятой для реакции серной кислоты; в) состав выделяющихся при реакции газов.

Ответ: а) 60,1% CaCO_3 , 34,9% MgCO_3 и 5,0% остатка; б) 10,5%; в) 95,8% H_2O и 4,2% CO_2 .

Глава 2
ПОНЯТИЕ РАВНОВЕСИЯ В ХТП.
ЗНАЧЕНИЕ K_p .
МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ДЛЯ ОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ

В химической промышленности значительное количество процессов являются обратимыми. Исходя из закона действующих масс отношение произведения концентраций исходных веществ к произведению концентраций продуктов реакции есть величина постоянная. В условиях, когда



Или $K_1 \cdot [A]^a \cdot [B]^b = K_2 \cdot [C]^c \cdot [D]^d$. Отсюда

$$\frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b} = \frac{K_1}{K_2} = K, \quad (2.1)$$

где K – константа равновесия данной химической реакции, значение которой зависит только от температуры, а для газов – и от давления.

Уравнение позволяет рассчитывать максимальный выход продуктов реакции, т.е. выход их в момент равновесия, процент превращения исходных веществ (сырья) в целевые и конечные продукты реакции.

Отношение фактического (практического) ($P_{\text{практ.}}$) количества продукта реакции к теоретическому ($P_{\text{теор.}}$), выраженное в процентах, называется выходом продукта или процентом превращения:

$$P = \frac{P_{\text{практ.}}}{P_{\text{теор.}}} \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

Зная величину K , можно вычислить количества веществ в равновесных состояниях данной реакции, а отсюда – и максимальные выходы продуктов реакции (для данных условий).

В зависимости от того, в каких единицах выражена концентрация веществ, участвующих в данной реакции, используются и три способа выражения константы равновесия:

– K_c , если концентрация выражена в г-моль/л или кг-моль/м³[А], а

$$K_c = \frac{[A]^a \cdot [B]^b}{[C]^c \cdot [D]^d}; \quad (2.3)$$

– K_p , когда концентрация взаимодействующих веществ выражена парциальных давлениях (P_A, P_B и т.д.), а

$$K_p = \frac{[P_A^a] \cdot [P_B^b]}{[P_C^c] \cdot [P_D^d]}; \quad (2.4)$$

– K_n , когда концентрация реагирующих веществ выражена в молярных, а с газами – в объемных процентах

$$K_n = \frac{[n_A^a] \cdot [n_B^b]}{[n_C^c] \cdot [n_D^d]}. \quad (2.5)$$

Наибольшее практическое значение имеет константа равновесия K_p в расчетах газовых систем.

Если химическая реакция идет без изменения объема, константа равновесия обозначается как K (без индексов). Значения констант берутся из справочников. При этом необходимо точно применять соответствующую единицу измерения (K_c, K_p или K_n).

Если в химической реакции одновременно участвуют (образуются) твердые вещества, то их концентрация в уравнение константы не входит.

Между K_c, K_p и K_n существует следующее соотношение

$$K_c = \frac{K_p}{(RT)^{\sum n_1 - \sum n_2}} = \frac{K_n}{V^{\sum n_1 - \sum n_2}} = \frac{K_p}{(P \cdot V)^{\sum n_1 - \sum n_2}}, \quad (2.6)$$

где R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура, при которой протекает реакция;

P – общее давление;

V – объем;

$\sum n_1$ – сумма молей исходного сырья (прямой реакции);

$\sum n_2$ – сумма молей продуктовой смеси (обратной реакции).

Или

$$K_p = K_c (RT)^{\sum n_1 - \sum n_2} = K_n \left(\frac{RT}{V}\right)^{\sum n_1 - \sum n_2} = K_n \cdot P^{\sum n_1 - \sum n_2},$$

$$K_c = K_p (RT)^{\sum n_1 - \sum n_2} = K_n \cdot V^{\sum n_1 - \sum n_2},$$

$$K_n = K_p \cdot P^{\sum n_1 - \sum n_2} = K_c \left(\frac{RT}{P}\right)^{\sum n_1 - \sum n_2} = K_c \cdot V^{\sum n_1 - \sum n_2}.$$

Если реакция идет без изменения объема, т.е. общее число моль прямой реакции равно числу моль обратной реакции, то $K_c = K_p = K_n$ (численное значение константы равновесия в любом случае будет одно и то же).

Зависимость константы равновесия от температуры определяется по уравнению Вант-Гоффа:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{H_p}{RT^2} \quad (p - \text{const}), \quad (2.7)$$

где H_p – тепловой эффект реакции, равный разности энтальпии (H) с обратным знаком ($q_p = -\Delta H$), температурная зависимость которого определяется из уравнения Кирхгофа.

Или

$$\frac{d \ln K_c}{dT} = \frac{\Delta U}{RT} \quad (V - \text{const}). \quad (2.7')$$

Для идеальной газовой смеси K_p не зависит от давления, для реальных – зависит.

При технологических расчетах константу равновесия часто определяют с помощью энергии Гиббса при постоянном давлении (G) или при постоянном объеме (F) с помощью уравнения Гельмгольца.

При стандартных условиях уравнения изотермы реакций, в момент равновесия связывающие константу равновесия с изменением энергии Гиббса, имеют вид:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_p, \quad (2.8)$$

$$\Delta F^0 = -RT \ln K_c. \quad (2.9)$$

Данные уравнения применимы для любой температуры: ΔG^0 и ΔF^0 определяют как разность энергий Гиббса образования конечных продуктов и исходных веществ.

Если тепловой эффект (ΔH) не зависит от температуры, то уравнение (2.7) принимает вид:

$$\frac{\ln K_p(T_2)}{K_p(T_1)} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta H^0}{RT^2} \cdot dT = \frac{\Delta H^0}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (2.10)$$

Почти для всех наиболее распространенных в производстве химических реакций константы равновесия определены экспериментальным путем и для практических расчетов их берут из справочника.

Примеры решения задач

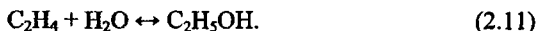
Задача № 1

В процессе прямой гидратации этилена на фосфорном катализаторе (производство этанола) при 300°C и давлении 8 МПа 10% (об.) этилен превращается в этанол.

Определить условную константу равновесия (пренебрегая побочными реакциями); состав газа. Составить материальный баланс процесса.

Решение:

1. Уравнение химической реакции гидратации этилена



По уравнению химической реакции из 1 моля исходного газа (по 0,5 моля C_2H_4 и H_2O) к моменту равновесия прореагировало по $0,1 \times 0,5 = 0,05$ молей каждого реагента и образовалось, соответственно, 0,05 молей $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Следовательно, в газе содержится:

$$\text{C}_2\text{H}_4 - 0,5 - 0,05 = 0,45 \text{ молей},$$

$$\text{H}_2\text{O} - 0,5 - 0,05 = 0,45 \text{ молей},$$

$$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - 0,05 \text{ молей}.$$

Всего в газе к моменту равновесия содержится:

$$0,45 + 0,45 + 0,05 = 0,95 \text{ молей газа},$$

состава, % об.:

$$\frac{0,45}{0,95} \cdot 100 = 47,5 \text{ (C}_2\text{H}_4\text{)};$$

водяной пар – 47,4;

$$\text{этанол} - \frac{0,05}{0,95} \cdot 100 = 5,26.$$

2. Рассчитываем константу равновесия:

$$K_p = \frac{P_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}{P_{\text{C}_2\text{H}_4} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,052 \cdot 8}{(0,474 \cdot 8) \cdot (0,474 \cdot 8)} = 0,0289.$$

Расчет константы равновесия можно провести по другому (см. УМК «ОХТ», с. 49).

В соответствии с уравнением (2.11)

$$K_p = \frac{4x_p}{(1-x_p)^2 \cdot P},$$

где x_p – равновесный выход целевого продукта ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), равный 0,0526, а P – общее давление в системе, равное 8 МПа.

Тогда равновесное содержание этилена и водяного пара будет $(1 - x_p)/2$, а

$$K_p = \frac{4 \cdot 0.0526}{(1 - 0.0526)^2 \cdot 8} = 2.9 \cdot 10^{-2} \text{ МПа.}$$

3. Составляем материальный баланс процесса гидратации этилена (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Материальный баланс гидратации этилена.

Приход	кмоль	кг	Расход	кмоль	кг
Этилен	0,5	14	Этанол	0,052	2,3
В.пар	0,5	9	Этилен	0,45	12,6
			В пар	0,45	8,1
Итого:	1,0	23		0,95	23

4. Рассчитаем основные технологические показатели процесса.

Конверсия сырья:

$$x_{C_2H_4} = \frac{14 - 12,6}{14} = 0,1 \text{ (10\% масс.),}$$

$$x_{H_2O} = \frac{9 - 8,1}{9} = 0,1 \text{ (10\% мас.),}$$

$$P = x_p = 0,052 \text{ кмоль} = 2,3 \text{ кг.}$$

Расчетные расходные коэффициенты:

$$C_2H_4 - \gamma = \frac{14}{2,3} = 6,58;$$

$$\text{водяной пар} - \gamma = \frac{9}{2,3} = 3,91.$$

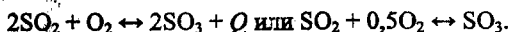
Задача № 2

При окислении оксида серы (IV) в оксид серы (VI) во второй стадии производства серной кислоты контактным способом в аппарат поступает сырьевой (сернистый) газ состава (% об.): SO₂ – 11; O₂ – 10; N₂ – 79. Процесс окисления осуществляется при 570 °С и 1200 кПа. Степень окисления – 70%.

Рассчитать состав окисленного газа и значение константы равновесия. Составить материальный баланс процесса.

Решение:

1. Уравнение химической реакции окисления SO₂:



В состоянии равновесия ($x_{SO_2} = 0,7$) состав газовой смеси на выходе из аппарата будет следующим (на 1 моль SO₃) – табл. 2.2.

Таблица 2.2

Состав газовой смеси на выходе из аппарата (контактный газ)

Молей компонентов газов в 1 моль смеси	Доля молей в 1 моле газа	Парциальное давление отд. компонентов газовой смеси, кПа
SO ₃	$1 \cdot 0,11 - 0,7 = 0,0770$ $\frac{0,077}{0,9615} = 0,0797$	$1200 \cdot 0,0797 = 9,6$
SO ₂	$(1 \cdot 0,11) - (0,11 \cdot 0,7) = 0,0330$ $\frac{0,033}{0,9615} = 0,0342$	$1200 \cdot 0,0342 = 4,1$
O ₂	$1 \cdot 0,1 - \frac{0,11 \cdot 0,7}{2} = 0,0615$ $\frac{0,0615}{0,9615} = 0,0638$	$1200 \cdot 0,0638 = 7,6$
N ₂	$1 \cdot 0,79 = 0,79$ $\frac{0,79}{0,9615} = 0,8223$	$1200 \cdot 0,8223 = 98,7$
Итого:	0,9615	120

2. Рассчитаем константу равновесия:

$$K_p = \frac{P_{SO_3}^2}{P_{SO_2}^2 \cdot P_{O_2}} = \frac{9,6^2}{4,1^2 \cdot 7,6} = 0,72.$$

Состав окисленного газа, % об.: SO₃ – 7,9; SO₂ – 3,42; O₂ – 6,38 и N₂ – 82,23, выходящего из аппарата контактного окисления SO₂ в SO₃.

3. Материальный баланс процесса.

Таблица 2.3

Материальный баланс процесса окисления SO₂ в состоянии равновесия

Приход	молей	л	г	Расход	молей	л	г
1. Сырьевой газ, в т.ч.:				1. Контактный газ, в т.ч.:			
SO ₂	0,11	2,464	7,039	SO ₂	0,033	0,739	2,112
O ₂	0,10	2,240	3,199	O ₂	0,0615	1,378	1,968
N ₂	0,79	17,696	22,120	N ₂	0,790	17,692	22,115
				SO ₃	0,077	1,720	6,14
Итого:	1,0	22,4	32,358	Итого:	0,9615	21,529	32,34

4. Расчет практических расходных коэффициентов и конверсии SO₂:

$$\gamma_{SO_2} = \frac{7,039}{6,14} = 1,15,$$

$$x_{SO_2} = \frac{7,039 - 2,112}{7,039} = 70\%.$$

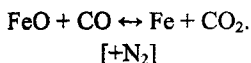
Задача № 3

Газовую смесь (по объему): 20% CO и 80% N₂ пропускают при 1000 °С и 1 атм над закисью железа, которая при этом восстанавливается до металлического железа.

Определить состав равновесной газовой смеси, если реакция превращения FeO в Fe осуществляется при $K_c = 0,403$. Определить количество восстановленного железа на 1000 л газа при н.у. Рассчитать материальный баланс процесса восстановления железа.

Решение:

1. Уравнение химической реакции:



Расчет произведем на 1 моль поступающей смеси (20% об. CO и 80% об. N₂). Степень окисления CO в CO₂ примем как x .

2. Состав газовой смеси представим как:

До равновесия, моль		В состоянии равновесия, моль	
CO	0,2	CO ₂	0,2x
N ₂	0,8	CO	0,2 - 0,2x или (1 - x)0,2
		N ₂	0,8

3. Рассчитаем конверсию CO в CO₂:

$$K_c = \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}]}$$

$$0,403 = \frac{0,2x}{0,2(1-x)}; x = \frac{0,0806}{0,2806} = 0,2872$$

4. Рассчитаем количество восстановленного железа.

При 1000 °C при взаимодействии CO и FeO образовалось:

$$\text{CO}_2 = 0,2 \cdot 0,2872 = 0,05744 \text{ моль}$$

и железа, соответственно, 0,0574 моль, или 0,0574 · 56 = 3,22 г.

Объем 1 моля газа при 1000 °C равен:

$$V = \frac{22,4 \cdot 1273}{273} = 104,5 \text{ л,}$$

следовательно, на 1000 л (н.у.) CO + N₂, образуется железа:

$$3,22 \cdot \frac{1000}{104,5} = 30,8 \text{ г.}$$

5. Рассчитаем состав отходящего газа:

$$\text{CO}_2 = 0,2 \cdot 0,2872 = 0,0574 \text{ моль, или } 5,74\%$$

$$\text{CO} = 0,2 - 0,0574 = 0,1426 \text{ моль, или } 14,26\%$$

$$\text{N}_2 = 0,8 = 0,8 \text{ моль, или } 80\%$$

$$\text{Итого:} \quad \quad \quad 1 \text{ моль} \quad \quad 100\%$$

6. Составим материальный баланс процесса восстановления железа (н.у.) (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Материальный баланс процесса восстановления железа

Приход	молей	л	г	Расход	молей	л	г
Закись железа				1. Восстановленное железо (Fe)			
1. (FeO), в т.ч.: 4,14							
Fe	0,057		3,22				
O	0,028		0,92		0,057		3,22
2. Газ восстановитель, в т.ч.:				2. Отходящий газ, в т.ч.:			
		22,4	28			22,4	28,92
CO	0,2	4,48	5,6	CO ₂	0,0574	1,2857	2,525
N ₂	0,8	17,92	22,4	CO	0,1426	3,1924	3,992
				N ₂	0,8	17,92	22,4
Итого:	1,0	22,4	32,14	Итого:	1,0	22,4	32,14

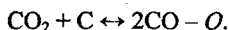
Задача № 4

При 1000 °С и общем давлении 30 атм в равновесной смеси при взаимодействии углекислого газа с углеродом содержится 17% CO₂.

Определить, сколько CO₂ будет содержать равновесная смесь при давлении 20 атм.

Решение:

1. Уравнение химической реакции:



Если в условии равновесия в газовой фазе содержится 17% CO₂, то 83% приходится на CO.

2. Рассчитаем константу равновесия:

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}} = \frac{(30 \cdot 0,83)^2}{30 \cdot 0,17} = \frac{620}{5,1} = 121,5.$$

Рассчитаем концентрацию CO₂ в равновесной смеси при давлении 20 атм.

3. Обозначим парциальное давление CO₂ в равновесной смеси через x , то при давлении 20 атм имеем:

$$K_p = 121,5 = \frac{(20-x)^2}{x}.$$

Откуда

$$121,5x = 400 - 40x + x^2,$$

$$161,5x = x^2 + 400.$$

Откуда

$$x = P_{\text{CO}_2} = 2,5 \text{ атм,}$$

что составит

$$\frac{2,55}{20} \cdot 100 = 12,75\% \text{ CO}_2.$$

$(K_p = \frac{x_p}{1-x_p})$, т.е. изменение давления не влияет на значение K_p

Задача № 5

Водяной пар находится в равновесии с раскаленным железом при 1025 °С и 900 °С, давление газа над железом 1 атм. Анализ газа показал, что в первом случае в нем содержится 43,8% H₂O и 56,2% H₂, во втором — 40,8% H₂O и 59,2% H₂.

Определить теплоту реакции железа с водяным паром.

Решение:

1. Уравнение химической реакции:



2. Если принять значение q постоянным, т.е. независимым от температуры, то можно использовать следующую формулу:

$$\lg \frac{K}{K_1} = \frac{Q(T-T_1)}{4,573T \cdot T_1}, \quad (2.12)$$

где K_1 — константа равновесия реакции при известной температуре T_1 ;
 K — то же, но при другой температуре T .

Из этого уравнения можно выразить Q :

$$Q = 4,573 \left(\frac{T \cdot T_1}{T - T_1} \right) \cdot \lg \frac{K}{K_1}. \quad (2.13)$$

Примем K — 1025 °С, а K_1 — при 900 °С, тогда

$$K = \frac{0,438}{0,562}, \quad K_1 = \frac{0,408}{0,592}.$$

3. $T_1 = 900 + 273 = 1173$ °К, а $T = 1025 + 273 = 1298$ °К.

4. Рассчитываем тепловой эффект реакции по уравнению (2.13):

$$Q = 4,573 \frac{1173 \cdot 1298}{1298 - 1173} \lg \left(\frac{0,438}{0,562} \cdot \frac{0,592}{0,408} \right) = 2980 \text{ Дж/моль.}$$

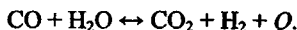
Задача № 6

Смешанный газ, идущий на конверсию имеет следующий состав, % об.: CO — 36,0; H₂ — 35,5; CO₂ — 5,5; N₂ — 23.

Сколько объемов водяного пара нужно взять на 1 объем этого газа, чтобы в сухом конвертированном газе содержание CO было не выше 2%, если конверсия протекает при 550°C и если принять, что в конверторе реакция достигает равновесного состояния? Принять константу равновесия при этой температуре равной 0,281.

Решение:

1. Уравнение химической реакции конверсии CO :

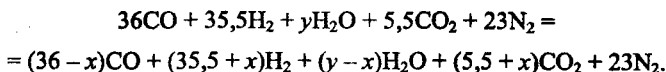


2. Константа равновесия

$$K = \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}} = \frac{[\text{CO}] \cdot [\text{H}_2\text{O}]^*}{[\text{CO}_2] \cdot [\text{H}_2]} = 0,0281.$$

* Т.к. эта химическая реакция идет без изменения объема, то безразлично в каких единицах (моль – процент; % об. или парциальных давлениях) проводить расчет.

3. Рассчитаем состав влажного и сухого смешанного газа. Обозначим количество водяных паров, вводимых на 100 моль сухого газа, через y моль, а количество прореагировавшей CO – через x моль. Тогда остаток CO после реакции составит $(36 - x)$ г-моль. А по уравнению образуется x моль H_2 и x моль CO_2 ; водяных паров прореагирует также x моль. Или в виде химического равенства:



Состав газа:

до конверсии, моль	после конверсии, моль
$\text{CO} - 36$	$36 - x$
$\text{H}_2 - 35,5$	$35,5 + x$
$\text{H}_2\text{O} - y$	$y - x$
$\text{CO}_2 - 5,5$	$5,5 + x$
$\text{N}_2 - 23$	23

Итого:

1. влажного газа $(100 + y)$, моль	$100 + y$, моль
2. сухого 100, моль	$100 + x$, моль

Количество CO в конвертированном газе должно составить 2% по отношению к сухому газу, т.е.

$$\frac{36 - x}{100 + x} = 0,02, \text{ откуда } x = 33,33 \text{ моль.}$$

4. Рассчитаем по уравнению константы равновесия количество молей воды - у:

$$K = \frac{[\text{CO}] \cdot [\text{H}_2\text{O}]}{[\text{CO}_2] \cdot [\text{H}_2]} = 0,281, \text{ или } \frac{(36-x) \cdot (y-x)}{(5,5+x) \cdot (35,5+x)} = 0,281.$$

Подставив в уравнение значение $x = 33,33$, получаем:

$$\frac{2,67(y-33,33)}{38,83 \cdot 68,83} = 0,281, \text{ откуда } y = 3,1 \text{ г-моль.}$$

Следовательно, из данных условий равновесие в конвертере обеспечивается, если на 1 объем сухого смешанного газа будет взято 3,1 объема водяных паров.

Степень конверсии CO составит:

$$x_w = \frac{33,33 \cdot 100}{36} = 92,5\%.$$

5. Рассчитаем материальный баланс процесса конверсии CO (расчет делается на 100 молей сухого газа, поступающего в конвертер) (табл. 2.5).

Если на 1 объем сухого газа необходимо 3,1 объема водяных паров, то на 100 молей газа для данных условий равновесия – 310 молей водяных паров.

Таблица 2.5

Материальный баланс процесса конверсии CO

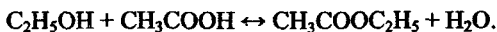
Приход	молей	л	г	Расход	молей	л	г
1. Газ до конверсии, в т.ч.:				1. Газ после конверсии водяным паром, в т.ч.:			
CO	36	806,4	1008	CO	2,67	59,808	74,76
H ₂	35,5	795,2	70,77	H ₂	68,83	1541,79	137,219
CO ₂	5,5	123,2	241,47	CO ₂	38,83	869,79	1704,788
N ₂	23,0	515,2	644	N ₂	23,00	515,2	644
Итого:	100	2240	1964,24	Итого:	133,33	2986,58	2560,767
2. Водяной пар				2. Водяной пар			
	310	6944	5579,9		276,7	6198,08	4980,157
Итого:	410	9184	7544,14	Итого:	410	9184	7541

6. Рассчитаем конверсию CO:

$$x_{CO} = \frac{1008 - 74,76}{1008} = 92,5\%.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. По окончании реакции между 1 моль/л этилового спирта и 1 моль/л уксусной кислоты получено 0,667 моль/л уксусно-этилового эфира. Подсчитать константу равновесия реакции



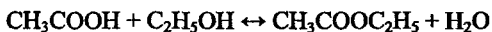
Составить материальный баланс процесса.

Ответ: 4,0.

2. При 1000 °С константа диссоциации $K_{дис}$ йода ($\text{I}_2 \leftrightarrow 2\text{I}$) равна 0,1650. Если 1 моль йода поместить в сосуд емкостью 100 мл и нагреть до 1000 °С, то сколько при этом останется йода недиссоциированным?

Ответ: 0,937 моль.

3. Константа равновесия K_c реакции между уксусной кислотой (CH_3COOH) и этиловым спиртом ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)



при 25 °С равна 4,0.

Сколько получится уксусно-этилового эфира в равновесной смеси, если взять исходных продуктов: а) по 1,0 молю кислоты и спирта; б) 2,0 моля кислоты и 1,0 моль спирта, разбавленных в 1 моле воды?

Ответ: а) 0,667 молей; б) 0,774 моля.

4. Стехиометрическая смесь ($3\text{H}_2 + \text{N}_2$), заключенная в сосуд емкостью 1 л при 400 °С, образует 0,0385 моль NH_3 .

Вычислить константу равновесия K_c и K_p реакции $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \leftrightarrow 2\text{NH}_3$.

Ответ: $K_c = 5,95 \cdot 10^{-5}$; $K_p = 1,95 \cdot 10^{-8}$.

5. Подсчитать: а) степень превращения азота в аммиак при 427 °С и давлении 300 атм; б) состав равновесной смеси газов, если в колонну синтеза поступает стехиометрическая смесь и константа равновесия K_c реакции синтеза при данных условиях равна 0,0136 на 1 моль NH_3 .

Ответ: а) 0,6; б) 14,2% N_2 ; 42,9% H_2 ; 42,9% NH_3 .

6. Приняв константу равновесия реакции окисления сернистого газа в серный ангидрид при температуре 727 °С, равной 0,00345 на 2 моля SO_3 , вычислить: а) K_p для нее; б) состав равновесного газа.

Ответ: а) 0,283; б) 42,5% SO_2 ; 21,2% O_2 ; 36,3% SO_3 .

7. Константа равновесия K_p при сгорании CO на CO_2 при температуре 1850°C равна $5,88 \cdot 10^{-5}$ на 1 моль O_2 .

Подсчитать равновесный состав газов, полученных при диссоциации CO_2 при указанной температуре. Составить материальный баланс процесса.

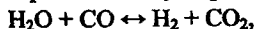
Ответ: 4,5% CO ; 2,3% O_2 и 93,2% CO_2 .

8. Насколько будет диссоциирован углекислый газ ($2\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$) при температуре 2000°C и $P = 1$ атм, если константа равновесия при этой $K_p = 2,77 \cdot 10^{-6}$.

Ответ: на 1,7%.

9. Сколько образуется водорода из 5 г H_2O при 1985°C и 1 атм, если константа равновесия реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + Q$ при этих условиях равна $6,936 \cdot 10^{-7}$? Составить материальный баланс процесса.

10. Каков будет состав равновесной смеси в результате реакции взаимодействия водяного пара с окисью углерода



если константа диссоциации водяного пара ($2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 - Q$) при данных условиях равна 10^{-17} , а константа диссоциации $\text{CO}_2 - 1,17 \cdot 10^{-21}$?

Ответ: 32,2% CO_2 ; 32,2% H_2 ; 17,8% CO ; 17,8% H_2O .

Глава 3

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Физическое состояние газа определяется тремя параметрами: давлением, объемом и температурой. Взаимосвязь этих параметров выражается законами Бойля, Гей-Люссака, Менделеева – Клайперона и Дальтона.

3.1. Закон Бойля (1662 г.)

При постоянной температуре объем (V) данного количества газа обратно пропорционален давлению (P):

$$PV = \text{const}, \quad (3.1)$$

или, что то же,

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2,$$

где V_1, V_2 – объемы данного количества газа при давлении P_1 и P_2 .

3.2. Закон Гей-Люссака (1802 г.)

Закон выражает зависимость между объемом и температурой идеального газа при постоянном давлении, а также между температурой и давлением этого газа при постоянном объеме.

Если давление газа остается постоянным, то при повышении температуры на 1°C его объем увеличивается приблизительно на $1/273$ (0,00367) части того объема (V_0), который то же количество газа занимает при 0°C :

$$V = V_0 + \frac{V_0 \cdot t}{273} = V_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right) = V_0(1 + 0,00367t), \quad (3.2)$$

откуда

$$V = V_0 \left(\frac{273+t}{273} \right) = V_0 \frac{T}{273}. \quad (3.2, a)$$

Из уравнения (3.2) очевидно, что

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{при } P = \text{const}). \quad (3.3)$$

При постоянном объеме закон Гей-Люссака выражается как

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{при } V = \text{const}). \quad (3.4)$$

Или $V_1 \cdot T_2 = V_2 \cdot T_1$ и $P_1 \cdot T_2 = P_2 \cdot T_1$, или в общем виде:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1 \cdot P_2}{T_2 \cdot P_1}. \quad (3.5)$$

Из (3.5) можно получить формулу приведения газа к нормальным условиям (н.у.), которую используют в технологических расчетах.

Примем V_1 – объем газа при нормальных условиях (0°C или 273°K ; 760 мм рт.ст. – барометрическое давление), т.е.:

V_1 – объем при н.у. (0°C , 760 мм рт.ст.);

P_1 – 760 мм рт.ст. ($1,013 \cdot 10^5$ Па);

T_1 – 273°K ;

V_2 – объем газа при рабочих условиях;

P_2 – рабочее давление, мм рт.ст. ($1,013 \cdot 10^5$ Па);

T_2 – рабочая температура, К ($273 + t$).

Тогда

$$V_{1(\text{н.у.})} = V_{2(\text{р.у.})} \frac{T_1 \cdot P_2}{T_2 \cdot P_1} = V_2 \frac{273 \cdot P_{\text{раб.д.}}}{(273 + t) \cdot 760},$$

или

$$V_{(\text{н.у.})} = V_{(\text{р.у.})} \frac{273 \cdot P_{\text{раб.д.}}}{(273 + t) \cdot 760}. \quad (3.6)$$

Для влажных газов учитывают давление водяного пара (b):

$$V_{\text{н.у.}} = V_{\text{р.у.}} \frac{273}{(273 + t)} \cdot \frac{P_{\text{раб.д.}} - b}{760}. \quad (3.6, a)$$

Или из (3.5) можно получить формулу приведения газа к рабочим условиям, а именно,

$$V_{\text{р.у.}} = V_{\text{н.у.}} \frac{T_2 \cdot P_1}{T_1 \cdot P_2} = V_{\text{н.у.}} \frac{(273 + t) \cdot 760}{273 \cdot P_{\text{раб.д.}}}. \quad (3.7)$$

Математическое обобщение законов Бойля и Гей-Люссака приводит к уравнению, связывающему объем газа с его температурой и давлением (уравнение Менделеева – Клапейрона) и характеризующему полное состояние газа:

$$P \cdot V = R \cdot T \quad (\text{для 1 моля газа}), \quad (3.8)$$

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{для } n \text{ молей газов}). \quad (3.8, a)$$

Если количество газа выразить в граммах, то уравнение (3.8, а) примет вид:

$$P \cdot V = \frac{G \cdot R \cdot T}{M}, \quad (3.9)$$

откуда

$$G = \frac{M \cdot P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{22,4 \cdot \rho_0 \cdot P}{T}, \quad (3.9, a)$$

или

$$M = G \cdot \frac{R \cdot T}{P \cdot V}, \quad (3.9, б)$$

где G – масса газа, г;

M – молекулярная масса газа;

R – универсальная газовая постоянная.

Когда давление газа выражено в н/м² (Па), а молекулярный объем в м³, то значение R будет

$$R = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,0224 \text{ м}^3}{1 \text{ моль} \cdot 273 \text{ град}} = 8,3144 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$$

(или Вт·с/моль·град).

3.3. Закон Дальтона. Газовые смеси

В химико-технологических процессах практически часто имеет место превращения смесей газов и паров (парогазовые смеси, газовые смеси, газо-жидкостные и пр.). При их обчетах руководствуются законом Дальтона, в соответствии с которым общее давление смеси (P) равно сумме парциальных давлений ($p_1 + p_2 + \dots + p_i = P$) отдельных составных компонентов смеси. С учетом этого, а также закона Бойля

$$P_1 = V_1 \cdot P, \quad (3.10)$$

где P_1 – парциальное давление отдельного компонента смеси;

V_1 – парциальный объем этого компонента в единице объема газовой смеси;

P – общее давление газовой смеси.

Как следствие, в расчетах используется прием расчета всех физических констант смеси: молекулярный вес, удельный вес, удельный объем, теплоемкость через правило аддитивности (т.е. правило смешения). Т.е. если известен объемный (мольный) состав смеси газов, а $K_1, K_2, K_3 \dots$ – константы составных компонентов газовой смеси, а $V_1, V_2, V_3 \dots$ – моляр-

ные (или объемные) доли этих частей в смеси, то общая любая константа K этой смеси будет рассчитываться как

$$K = V_1 \cdot K_1 + V_2 \cdot K_2 + V_3 \cdot K_3 + \dots \quad (3.11)$$

Вышеприведенные законы и правила хорошо применять для расчетов идеальных газов и их смесей (обладают слабыми силами межмолекулярного взаимодействия – это одноатомные газы (гелий, аргон, пары металлов и т.д.), при сравнительно высоких температурах (100 – 200 °С – двухатомные газы (H₂; O₂; N₂ и т.д.)) и при некотором разрежении или достаточно высокой температуре (300 – 400 °С и выше – трехатомные и четырехатомные газы (CO₂; NH₃; CH₄ и т.д.)).

Но чем выше плотность газа, т.е. чем меньше расстояние между его частицами, тем больше такой газ отклоняется от идеального состояния. Силы взаимного притяжения частиц (ван-дер-ваальсовы силы) могут рассматриваться как внутреннее давление газа, и величина их в первом приближении обратно пропорциональна квадрату объема, занимаемого газом.

Реальное состояние газа можно выразить следующим уравнением:

для 1 моля

$$\left. \begin{aligned} \left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) &= R \cdot T \\ P &= \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{1}{V^2} \end{aligned} \right\}, \quad (3.12)$$

для n молей

$$\left[P + a \left(\frac{n}{V} \right)^2 \right] (V - nb) = nRT; \quad P = n \left(\frac{RT}{V - nb} - \frac{na}{V^2} \right), \quad (3.12, a)$$

где a и b – константы, зависящие от природы газа, приводятся в справочной литературе.

В производственных расчетах редко используется вышеприведенное уравнение, а используются энтропийные ($T-S$), ($i-T$), ($i-P$) и тепловые диаграммы, в которых учтены реальные давления и температуры известных технологических процессов.

Необходимо отметить, что при расчетах для одного и того же вещества одновременно пользоваться и теплоемкостями и теплосодержаниями (энтальпия) не следует, т.к. это будет вызывать большую ошибку в расчетах.

Примеры решения задач

Задача № 1

Какой объем при нормальных условиях займут $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ газа, находящегося при температуре 50°C и давлении $0,954 \cdot 10^5 \text{ Па}$?

Решение:

Введем обозначение: (н.у.) $T_0 = 273 \text{ К}$ и $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Из уравнения $\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0}$, объем газа при нормальных условиях (н.у.)

равен

$$V_0 = \frac{P \cdot V \cdot T_0}{T \cdot P_0},$$

или

$$V_0 = V \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0},$$

или

$$V_0 = \frac{0,954 \cdot 10^5 \cdot 273 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 323 \cdot 1} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Задача № 2

Масса $0,327 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ газа при 13°C и давлении (P) $1,040 \cdot 10^5 \text{ Па}$ равна (G) $0,828 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Вычислить молекулярную массу газа (M).

Решение:

Используем уравнение Менделеева – Клайперона (3.9):

$$P \cdot V = \frac{G}{M} \cdot R \cdot T, \text{ откуда } M = \frac{G \cdot R \cdot T}{P \cdot V}.$$

$R = 8,3144 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$.

Тогда

$$M = \frac{0,828 \cdot 10^{-3} \cdot 8,3144 \cdot 10^3 \cdot 286}{1,040 \cdot 10^5 \cdot 0,327 \cdot 10^{-3}} = 57,8$$

Задача № 3

При нормальных условиях газ занимает объем 1 м^3 .

При какой температуре объем газа утроится, если давление газа не меняется?

Решение:

При нагреве газа на 1°C его объем увеличивается на $1/273$ объема при нормальных условиях, следовательно, объем газа утроится при $273 \cdot 3 = 819 \text{ K}$.

Задача № 4

Определить массу газовой смеси, состоящей из 50% об. H_2 и 50% об. CO_2 . Общий объем газовой смеси составляет 10^{-3} м^3 .

Решение:

Масса газовой смеси равна

$$G = V_{см} \cdot \rho_{см},$$

где $V_{см}$ — объем смеси;

$\rho_{см}$ — ее плотность,

следовательно

$$\rho_{см} = 0,5\rho_{\text{H}_2} + 0,5\rho_{\text{CO}_2},$$

или

$$\rho_{см} = 0,5 \frac{2}{22,4} + 0,5 \frac{44}{22,4} = 0,0446 + 0,9821 = 1,0267 \text{ кг/м}^3,$$

$$G = 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 1,0267 \text{ кг/м}^3 = 1,0267 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

(мол. вес H_2 равен 2,0; CO_2 — 44,0).

Задача № 5

Рассчитать плотность воздуха при н.у. (0°C и 760 мм рт.ст. или $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$) и определить массу 1 моля воздуха.

Решение:

Известно, что состав атмосферного воздуха для технологических расчетов принимают как: 79% об. N_2 и 21% об. O_2 . Тогда его плотность при н.у. составит:

$$\rho_{воз.} = 0,79 \cdot \frac{28}{22,4} + 0,21 \cdot \frac{32}{22,4} = 0,9875 + 0,2999 = 1,287 \text{ г/л (кг/м}^3),$$

масса его моля

$$G = \rho \cdot V,$$

или

$$G = 1,287 \cdot 22,4 = 28,8 \approx 29 \text{ (г/моль) (мол. масса } \text{N}_2 - 28,0; \text{O}_2 - 32,0).$$

Задача № 6

Мокрый газгольдер емкостью 2000 м^3 наполнен азотом, давление в газгольдере равно 940 мм рт.ст., температура 22°C .

Привести объем азота к нормальным условиям и вычислить массу азота.

Решение:

Т.к. запорной жидкостью в газгольдере служит вода, то азот насыщен водяными парами. Поэтому подсчет значения объема в нормальных условиях осуществляем по уравнению (3.6, а). Давление водяных паров при 22 °С равно 19,8 мм рт.ст., следовательно,

$$V_0 = \frac{273 \cdot 2000 \cdot (940 - 19,8)}{295 \cdot 760} = 2245 \text{ м}^3.$$

Расчет массы азота можно выполнить несколькими методами:
($\rho_{N_2} = 1,252 \text{ г/л}$ или кг/м^3)

1. $G = V \cdot \rho = 2245 \cdot 1,252 = 2810 \text{ кг.}$

2. Молекулярный объем азота – 22,4, следовательно, 2245 м³ его составляет

$$n = \frac{2245}{22,4} = 100,2 \text{ кмоль,}$$

а

$$G = 100,2 \cdot 28 = 2806 \text{ кг, или}$$

3. По уравнению Менделеева – Клапейрона

$$G = \frac{M \cdot P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{28 \cdot (940 - 19,8) \cdot 2000}{760 \cdot 295 \cdot 0,082^*} = 2806 \text{ кг N}_2.$$

$$*R = 0,0821 \text{ м}^3 \cdot \text{атм/кмоль} \cdot \text{град.}$$

Задача № 7

Определить плотность водяного газа, находящегося под давлением 2,5 атм при температуре 427 °С, если состав его, % об.: Н₂ – 50; СО – 38; N₂ – 6; O₂ – 0,2; СО₂ – 5 и СН₄ – 0,8.

Решение:

1. Найдем приведенную молекулярную массу M водяного газа (молекулярная масса Н₂ – 2,0; СО – 28,0; N₂ – 28,0; СО₂ – 44,0; O₂ – 32,0; СН₄ – 16):

$$M = 2,0 \cdot 0,5 + 28,0 \cdot 0,38 + 28,0 \cdot 0,06 + 32,0 \cdot 0,002 + 44,0 \cdot 0,05 +$$

$$+ 16,0 \cdot 0,008 = 15,71 \text{ г/моль.}$$

2. Плотность газа указанного состава рассчитаем по уравнению (3.9, а):

$$\rho = \frac{12,2^* \cdot M \cdot P}{273 + t} = \frac{12,2 \cdot 15,71 \cdot 2,5}{700} = 0,684 \text{ г/л (кг/м}^3\text{).}$$

$$(* 12,2 = \frac{273}{22,4})$$

Задача № 8

При температуре 27°C относительная влажность воздуха составляет 51,5%. Парциальное давление водяных паров при этой температуре равно 26,5 мм рт.ст.

Определить массу водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха при этой температуре.

Решение:

1. Парциальное давление водяных паров в воздухе при их относительной влажности 51,5% составит

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,515 \cdot 26,5 = 13,65 \text{ мм рт.ст.}$$

2. Их масса в 1 м^3 (1000 л) воздуха, вычисленная по уравнению (3.9, а), составит:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18 \cdot 1000}{0,0821 \cdot 300} \cdot \frac{13,65}{760} = 13,15 \text{ г.}$$

$$*R = 0,0821 \text{ м}^3 \cdot \text{атм/кмоль} \cdot \text{град.}$$

Задача № 9

Какое давление создает 0,05 кг этилена в сосуде объемом 10^{-2} м^3 при -2°C ?

Решение:

Используя уравнение (3.9), получаем:

$$P = \frac{G \cdot R \cdot T}{M \cdot V} = \frac{0,05 \cdot 8,3144 \cdot 10^3 \cdot 271}{28 \cdot 10^{-2}} = 402357 \text{ Па.}$$

Задача № 10

Из $5 \cdot 10^{-3}$ кг хлората калия KClO_3 было получено $0,7 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$ кислорода, измеренного при 20°C и давлении 111900 Па.

Определить массу полученного кислорода и процентное содержание примесей в KClO_3 .

Решение (1 вариант):

1. Используя уравнение (3.9), определим массу кислорода:

$$G = \frac{M \cdot V \cdot P}{R \cdot T} = \frac{32 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 111900}{8,3144 \cdot 10^3 \cdot 293} = 0,00102 \text{ кг} = 1,02 \text{ г}$$

2. Зная молекулярную массу, можно определить массу разложившегося $KClO_3$ с выделением 1,02 г O_2 :

$$M_{KClO_3} = 39 + 35,5 + 48 = 122,5 \text{ г/моль,}$$

$$G_{O_2} = \frac{122,5}{48} \cdot 1,02 = 2,6 \text{ г.}$$

3. Рассчитаем содержание примесей в хлорате калия

$$5 - 2,6 = 2,4 \text{ г}$$

и их массовый процент в $KClO_3$

$$\frac{2,4}{5} \cdot 100 = 48\%.$$

Решение (2 вариант):

1. Определим плотность O_2 при указанных условиях:

$$\rho_{273+20} = \rho_0 \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T_1} = \frac{32 \cdot 273}{22,4 \cdot 293} = 1,46 \text{ г/л (кг/м}^3\text{)}.$$

2. Определим массу газа:

$$G = V \cdot \rho = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,46 = 1,02 \text{ г}$$

Далее – см. вариант 1.

Задача № 11

Сколько $CaCO_3$ необходимо взять, чтобы получить при его прокаливании CO_2 , занимающий объем $25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ при $15^\circ C$ и давлении 104000 Па.

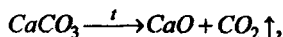
Решение (1 вариант):

1. Определим массу CO_2 по уравнению (3.9):

$$G = \frac{M \cdot V \cdot P}{R \cdot T} = \frac{44 \cdot 104000 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{8,3144 \cdot 10^3 \cdot (273 + 15)} = 0,048 \text{ г,}$$

$$M_{CO_2} = 12 + 32 = 44; M_{CaCO_3} = 40 + 12 + 48 = 100.$$

2. Рассчитаем массу $CaCO_3$, используя химическое уравнение разложения $CaCO_3$:



$$G_{CaCO_3} = \frac{4,8}{44} = 0,109 \text{ г.}$$

Решение (2 вариант):

1. Определим объем выделившейся CO_2 при нормальных условиях по уравнению (3.6):

$$V_{н.у.} = V_{пу} \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{P_{пу}}{760} = \frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot 273}{288} \cdot \frac{104000}{101300} = 24,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

2. Рассчитаем массу CO_2 :

$$G = V \cdot \rho = 24,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{44}{22,4} = 47,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг или } \approx 0,048 \text{ г}$$

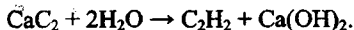
3. Далее – см. вариант 1.

Задача № 12

Вычислить процентное содержание карбида кальция (CaC_2) в техническом карбиде, если известно, что из его образца массой 2,5 г получено 0,72 л ацетилена при 18°C и давлении 753 мм рт.ст.

Решение:

1. Уравнение химической реакции



2. Используя уравнение (3.6), рассчитываем объем выделившегося ацетилена:

$$V_{н.у.} = \frac{0,72 \cdot 273 \cdot 753}{291 \cdot 760} = 0,6693 \text{ л,}$$

или

$$0,6692 : 22,4 = 0,0299 \text{ моля.}$$

3. В соответствии с уравнением химической реакции из 1 моля CaC_2 образуется 1 моль C_2H_2 , следовательно, в образце содержалось 0,0299 моля чистого CaC_2 ,

или

$$0,0299 \cdot 64 = 1,912 \text{ г CaC}_2 \quad (M_{\text{CaC}_2} = 40 + 24 = 64).$$

4. Следовательно, в каждом образце технического карбида кальция (2,5 г) исходно содержалось 1,912 г чистого CaC_2 , а остальное – примеси. Таким образом, в исходном образце его было

$$\frac{1,912}{2,5} = 0,7648 \approx 76,5\%,$$

а примеси, соответственно, составляли

$$100 - 76,5 = 23,5\%.$$

Задача № 13

Рассчитать объемный состав потока, полученного смешением технического аммиака ($1000 \text{ м}^3/\text{ч}$) и воздуха ($2000 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Решение:

1. Составим схему материальных потоков:

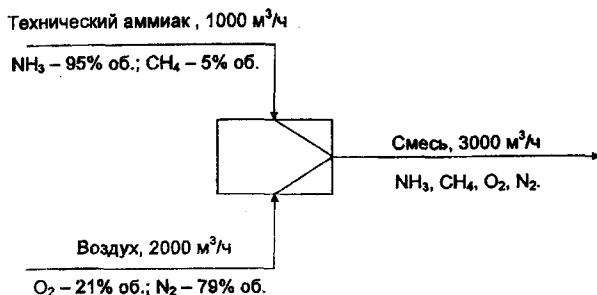


Рис. 3.1. Схема материальных потоков

2. Определим качественный состав выходящего из смесителей потока.

3. Найдем состав смеси сначала в абсолютных единицах ($\text{м}^3/\text{ч}$), затем в относительных (% об.) (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Расчет состава смеси

Расчет объемного состава смеси		
Компонент	$\text{м}^3/\text{ч}$	% об.
NH_3	$1000 \cdot 0,95 = 950$	$\frac{950}{3000} 100 = 31,7$
CH_4	$1000 \cdot 0,05 = 50$	$\frac{50}{3000} 100 = 1,6$
O_2	$2000 \cdot 0,21 = 420$	$\frac{420}{3000} 100 = 14$
N_2	$2000 \cdot 0,79 = 1580$	$\frac{1580}{3000} 100 = 52,7$
Итого:	3000	100

Задача № 14

Приготовить 640 кг смеси газов в мольном соотношении

$$\text{SO}_2 : \text{O}_2 = 1:1.$$

Решение:

1. Вычислим массовый состав смеси, соответствующий заданному мольному соотношению:

1 кмоль SO_2 – 64 кг,

1 кмоль O_2 – 32 кг.

Концентрации компонентов

$$\text{SO}_2 = \frac{64 \cdot 100}{64 + 32} = 66,7\% \text{ масс.}; \text{O}_2 = \frac{32 \cdot 100}{64 + 32} = 33,3\% \text{ масс.}$$

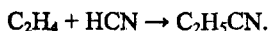
2. Т.к. точно такая концентрация должна соблюдаться и в 640 кг смеси, которую надо приготовить, то компонентов следует взять:

$$\text{SO}_2 = 640 \cdot 0,667 = 426,88 \text{ кг,}$$

$$\text{O}_2 = 640 \cdot 0,333 = 213,12 \text{ кг.}$$

Задача № 15

В химическом реакторе протекает химическая реакция



Сырье (реагенты) – технический цианводород и этан-этиленовую фракцию подают в мольном соотношении

$$\text{C}_2\text{H}_4 : \text{HCN} = 2 : 1$$

(по чистым соединениям). Состав сырьевых потоков следующий: техническая смесь – этан-этиленовая фракция, % масс: этилен – 60; этан – 40; технический цианводород, % мол.: HCN – 90; H_2 – 10.

Рассчитать абсолютный состав исходной смеси реагентов.

$$(M_{\text{C}_2\text{H}_4} - 28; M_{\text{H}_2} - 2; M_{\text{C}_2\text{H}_6} - 30; M_{\text{HCN}} - 27).$$

Решение:

1. Поскольку задано мольное соотношение, удобнее выполнять расчет исходя из 100 кмолей технического HCN. При этом по условию в 100 кмоль – 90 кмоль приходится на чистый HCN и 10 кмолей на H_2 .

Соответственно масса чистого HCN составит

$$90 \cdot 27 = 2430 \text{ кг,}$$

а масса водорода – 20 кг.

Всего масса технического сырья цианводорода составит

$$2430 + 20 = 2450 \text{ кг.}$$

2. По условию подается «чистого» C_2H_4 (этилена) в два раза больше, чем «чистого» HCN, т.е.

$$90 \cdot 2 = 180 \text{ кмоль,}$$

или

$$180 \cdot 28 = 5040 \text{ кг.}$$

3. По условию доля «чистого» этилена в сырьевом потоке – 60 % масс, т.е. технической фракции

$$\frac{5040 \cdot 100}{60} = 8400 \text{ кг,}$$

а в ней этана

$$8400 - 5040 = 3360 \text{ кг.}$$

4. Сырьевая смесь на вход в химический реактор имеет следующий состав:

$$\left. \begin{array}{l} \text{HCN} - 2430 \text{ кг} \\ \text{H}_2 - 20 \text{ кг} \end{array} \right\} 2450 \text{ кг (технический HCN),}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{C}_2\text{H}_4 - 5040 \text{ кг} \\ \text{C}_2\text{H}_6 - 3360 \text{ кг} \end{array} \right\} 8400 \text{ кг.}$$

Итого: 10850 кг.

Расчет состава сырьевой смеси приведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Состав сырьевой смеси

Компонент	Расчет состава смеси			
	% мол.	% масс.	кмоль	кг
HCN	90	–	90	$90 \cdot 27 = 2430$
H ₂	10	–	10	$10 \cdot 2 = 20$
C ₂ H ₄	–	60	$2 \cdot 90 = 180$	$180 \cdot 28 = 5040$
C ₂ H ₆	–	40	$\frac{3360}{30} = 112$	$\frac{5040 \cdot 40}{60} = 3360$
Итого:	100	–	392	10850

Задача № 16

Расчет показал, что на проведение процесса потребуется ввести 42 кмоль кислорода. Поток окислителя получают, смешивая воздух с техническим кислородом. Концентрация кислорода в смеси должна составить 30 % об.

Определить массу, объем и число кмоль смешиваемых потоков.

Решение:

1. Составим схему материальных потоков смесителя (рис. 3.2).

2. По количеству кислорода определим общее количество смеси, составим следующую пропорцию:

42 кмоль O₂ – 30 % об.

Вся смесь – 100 % об.

Отсюда масса всей смеси составит $42/0,3 = 140$ кмоль.

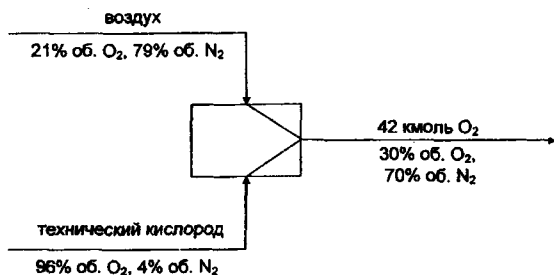


Рис. 3.2. Схема материальных потоков смесителя

3. Введем обозначение: количество поступающего воздуха – x кмоль, технического кислорода – $140 - x$.

В воздухе содержится $0,21x$ кмоль кислорода, а в техническом кислороде – $0,96 \cdot (140 - x)$ кмоль. Всего в смеси должно быть 42 кмоль O_2 . Составим баланс по кислороду:

$$0,21x + 0,96 \cdot (140 - x) = 42,$$

отсюда

$$x = 123,3 \text{ кмоль.}$$

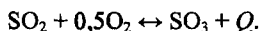
Таблица 3.3

Расчет газов разбавления

Потоки	Расчет разбавления газовых потоков		
	кмоль	м ³	кг
Воздух	123,2	$123,2 \cdot 22,4 = 2759,68$	$O_2 : 123,2 \cdot 0,21 \cdot 32 = 827,904$ $N_2 : 123,2 \cdot 0,79 \cdot 28 = 2725,184$ Всего воздуха: 3553,088
Технический кислород	$140 - 123,2 = 16,8$	$16,8 \cdot 22,4 = 376,32$	$O_2 : 16,8 \cdot 0,96 \cdot 32 = 516,096$ $N_2 : 16,8 \cdot 0,04 \cdot 28 = 18,816$ Всего технического кислорода: 534,912
Итого:			4088

Задача № 17

Рассчитать (в % масс.) состав реакционной смеси для реакции



В качестве сырья используется печной газ (техническое название), который поступает из печей обжига колчедана, и воздух. Состав печного

газа, % мол.: $\text{SO}_2 - 7$; $\text{O}_2 - 11$; $\text{N}_2 - 82$. Состав воздуха. % мол.: $\text{O}_2 - 21$; $\text{N}_2 - 79$. Реагенты загружают в мольном соотношении

$$\text{SO}_2 : \text{O}_2 = 1 : 2.$$

Конверсия диоксида серы $x = 80\%$.

Рассчитать материальный баланс процесса.

Решение:

В данном случае расчеты выполняются при нормальных условиях системы (273°K ; $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

1. Составим схему материальных потоков и определим качественный состав потоков на входе реактора и выходе из него.

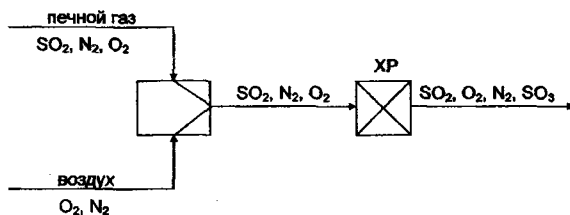


Рис. 3.3. Схема материальных потоков

2. Печной газ, как и воздух, в качестве примеси содержит азот, который в реакции не участвует и переходит в реакционную смесь в неизменном виде. В этой смеси помимо продукта SO_3 имеются непревращенные SO_2 и O_2 , поскольку конверсия диоксида серы неполная, а кислород взят в избытке против стехиометрии. Так как количества печного газа и воздуха неизвестны, задаемся величиной одного из потоков. Выбираем наиболее информативный поток (в нашем случае это печной газ). Расчет удобнее вести исходя из количества печного газа 100 кмоль.

3. Поток воздуха следует подмешать к печному газу в соответствии с заданным соотношением реагентов, которое должно поддерживаться в исходной смеси. Поскольку количество диоксида серы в печном газе составляет

$$100 \cdot 0,07 = 7 \text{ кмоль},$$

то количество O_2 в исходной смеси должно составлять

$$2 \cdot 7 = 14 \text{ кмоль}.$$

Следовательно, к содержащимся в печном газе

$$100 \cdot 0,11 = 11 \text{ кмоль } \text{O}_2$$

дополнительные 3 кмоль O_2 должны придти с воздухом. Тогда воздуху следует подать

$$3/0,21 = 14,3 \text{ кмоль}$$

(по пропорции 3 кмоль O_2 составляют 21% объема воздуха, тогда весь объем воздуха – 100 %). Азот, поступающий в составе воздуха, можно определить по разности

$$14,3 - 3 = 11,3 \text{ кмоль,}$$

либо взять 79% от 14,3,

т.е.

$$14,3 \cdot 0,79 \approx 11,3 \text{ кмоль.}$$

Следовательно, всего азота поступает в реактор и покидает его в неизменном виде

$$100 \cdot 0,82 \text{ (в печном газе)} + 11,3 \text{ (с воздухом)} = 93,3 \text{ кмоль.}$$

4. Реакционная смесь. Количество превращенного SO_2

$$7 \cdot 0,8 = 5,6 \text{ кмоль,}$$

непревращенного –

$$7 - 5,6 = 1,4 \text{ кмоль.}$$

Превращенный кислород в соответствии со стехиометрией составит

$$0,5 \cdot 5,6 = 2,8 \text{ кмоль.}$$

По разнице между поданным и превращенным кислородом определим количество непревращенного O_2 :

$$14 - 2,8 = 11,2 \text{ кмоль.}$$

5. В соответствии с коэффициентами уравнения реакции SO_3 образуется столько же, сколько превратилось SO_2 , т.е. 5,6 кмоль. Результаты сведены в табл. 3.4:

Таблица 3.4

Состав реакционной смеси

Компонент	Исходная смесь, кмоль	Расчет состава реакционной смеси		
		кмоль	кг	% масс.
SO_2	7	$7 - 0,8 \cdot 7 = 1,4$	$1,4 \cdot 64 = 89,6$	$\frac{84,6}{3508,4} \cdot 100 = 2,41$
N_2	$82 + 11,3 = 93,3$	93,3	$93,3 \cdot 28 = 2612,4$	$\frac{2612,4}{3508,4} \cdot 100 = 74,461$
O_2	$11 + 3 = 14$	$14 - 0,5 \cdot 5,6 = 11,2$	$11,2 \cdot 32 = 358,4$	$\frac{358,4}{3508,4} \cdot 100 = 10,251$
SO_3	–	5,6	$5,6 \cdot 80 = 448$	$\frac{448}{3508,4} \cdot 100 = 12,77$
Итого:	14,3	111,5	3508,4	100

6. Составим материальный баланс процесса (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Материальный баланс контактного окисления SO_2

Приход	кмоль	кг	% масс.	Расход	кмоль	кг	% масс.
SO_2	7	448	12,8	SO_2	1,4	89,6	2,41
N_2	93,3	2612,4	74,5	N_2	93,3	2612,4	74,5
O_2	14	448	12,8	O_2	11,2	358,4	10,22
SO_3	—	—	—	SO_3	5,6	448	12,77
Итого:	114,3	3508,4	100	Итого:	111,5	3508,4	100

7. По материалному балансу проверяем степень конверсии SO_2 :

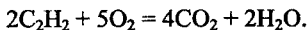
$$x_{\text{SO}_2} = \frac{448 - 89,6}{448} = 0,8 (80\%), \text{ что соответствует заданию.}$$

Задание № 18

Необходимо определить объем оксида углерода, полученного при сжигании 10 л ацетилена (C_2H_2) при н.у. Какой объем кислорода при этом прореагирует? Составить материальный баланс процесса.

Решение:

1. Уравнение химической реакции



2. По уравнению химической реакции объем образующегося CO_2 составит

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{10 \cdot 4}{2} = 20 \text{ л (н.у.)},$$

расход O_2 составит

$$V_{\text{O}_2} = \frac{10 \cdot 5}{2} = 25 \text{ л (н.у.)},$$

или

$$G_{\text{CO}_2} = 20 \cdot \frac{44}{22,4} = 39,28 \text{ г}, \quad G_{\text{O}_2} = 25 \cdot \frac{32}{22,4} = 35,71 \text{ г}$$

$$(M_{\text{CO}_2} = 12 + 32 = 44,$$

$$M_{\text{O}_2} = 32,$$

$$M_{\text{C}_2\text{H}_2} = 12 \cdot 2 + 2 = 26,$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18).$$

3. При этом было сожжено C_2H_2 в количестве

$$G_{\text{C}_2\text{H}_2} = 10 \cdot \frac{26}{22,4} = 11,6 \text{ г.}$$

4. Рассчитаем массу образовавшейся при сжигании C_2H_2 воды:

$$G_{H_2O} = \frac{11,6 \cdot 2 \cdot 18}{2 \cdot 26} = 8,03 \text{ г,}$$

$$V_{\text{паров } H_2O} = \frac{8,03 \cdot 22,4}{18} = 9,99 \text{ л.}$$

4. Составим материальный баланс процесса (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Материальный баланс процесса сжигания ацетилена

Приход	л. (н.у.)	г	Расход	л. (н.у.)	г
C_2H_2	10	11,60	CO_2	20	39,28
O_2	25	35,71	H_2O	9,99	8,03
Итого:	35	47,31	Итого:	29,99	47,31

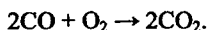
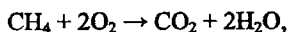
Задача № 19

Природный газ содержит, в среднем, 85% CH_4 , 6% O_2 , 3% CO , 1,5% N_2 и 4,5% CO_2 .

Какой объем воздуха необходим для сгорания 1 м^3 этого газа? Составить материальный баланс процесса.

Решение:

1. Уравнение химической реакции горения CH_4



2. В 1 м^3 природного газа содержится метана $0,85 \text{ м}^3$ и $0,03 \text{ м}^3$ CO — двух горючих газа в составе природного газа.

3. Рассчитаем расход кислорода на сжигание $0,85 \text{ м}^3$ CH_4 :

$$V_{O_2} = \frac{0,85 \cdot 2 \cdot 22,4}{22,4} = 1,70 \text{ м}^3 \text{ (н.у.)}$$

и на сжигание CO

$$V_{CO} = \frac{0,03 \cdot 22,4}{2 \cdot 22,4} = 0,015 \text{ м}^3 \text{ (н.у.)}$$

Таким образом, суммарный расход O_2 на сжигание CH_4 и CO составит

$$1,7 + 0,015 = 1,715 \text{ м}^3 \text{ (н.у.)}$$

4. В состав природного газа входит и 6% O_2 , т.е. в 1 м^3 газа содержится $0,06 \text{ м}^3$, которые будут потрачены на горение, т.е. необходимо восполнить кислород в объеме

$$1,715 - 0,06 = 1,655 \text{ м}^3 \text{ (н.у.)}$$

5. Воздуха необходимо:

$$V_{\text{возд}} = \frac{1,655 \cdot 100}{21} = 7,88 \text{ м}^3 \text{ (н.у.)},$$

или если берется избыток воздуха при сжигании природного газа, например, 1,1 – 1,2, то, в среднем, 9,1 м³ воздуха на 1 м³ природного газа.

6. Составим материальный баланс процесса горения природного газа (на 1 м³) (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Материальный баланс горения природного газа

Приход	м ³ (н.у.)	кг	Расход	м ³ (н.у.)	кг
1. Природный газ, в т.ч.:	1	0,838	1. Дымовые газы, в т.ч.:		
CH ₄	0,85	0,607	CO ₂	0,920	1,804
O ₂	0,06	0,086	N ₂	6,245	7,8062
CO	0,03	0,037	H ₂ O	1,699	1,3657
N ₂	0,015	0,019			
CO ₂	0,045	0,088			
2. Воздух, в т.ч.:	7,88	10,144			
O ₂	1,65	2,357			
N ₂	6,23	7,787			
Итого:	8,88	10,982	Итого:	8,86	10,98

Задачи для самостоятельного решения

1. Сколько граммов воды содержится в 10 л воздуха при относительной его влажности 73,5%, если температура воздуха 27°C и парциальное давление насыщенных водяных паров в воздухе при этой температуре равно 268 мм рт.ст.

Ответ: 0,189 г.

2. Подсчитать плотность и приведенную молекулярную массу азотно-кислородной смеси, если по объему ее состав следующий: а) 50% N_2 и 50% O_2 ; б) 20% N_2 и 80% O_2 ; в) 55% N_2 и 45% O_2 . Определить плотность и молекулярную массу смеси газов, если состав ее по массе 10% N_2 и 90% O_2 , и 90% N_2 и 10% O_2 .

Ответ: $\rho = 1,342$, $M = 30,1$; $\rho = 1,394$, $M = 31,3$; $\rho = 1,334$, $M = 29,7$; $\rho = 1,409$, $M = 29,7$; $\rho = 1,409$, $M = 31,6$; $\rho = 1,272$, $M = 28,4$.

3. Барометрическое давление воздуха 740 мм рт.ст. и температура 30°C . Парциальное давление водяных паров в нем при этой температуре равно 22 мм рт.ст. После охлаждения воздуха до 15°C часть водяных паров сконденсировалась и парциальное давление их понизилось до 12,5 мм рт.ст.

Подсчитать: а) объем воздуха после охлаждения; б) вес сконденсированной воды, если первоначальный объем влажного воздуха (до охлаждения) равен 1000 м^3 .

Ответ: а) 987 м^3 ; б) 9,2 кг.

4. Продукты сгорания имеют в начале дымохода температуру 1200°C , в конце – 250°C .

Определить, во сколько раз их объем в конце дымохода меньше, чем в начале, если давление остается одним и тем же.

Ответ: в 4,8 раза.

5. Из газогенератора поступает $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ водорода при температуре 47°C и давлении 840 мм рт.ст.

Определить, сколько из этого количества водорода теоретически можно получить аммиака.

Ответ: ~ 331 кг.

6. Найти плотность воздуха при 315°C (588°K) и $0,45$ МПа, если плотность его при 0°C и нормальном давлении равна $1,2928$ $\text{кг}/\text{м}^3$.

Ответ: $\rho = 2,67$ $\text{кг}/\text{м}^3$.

7. Какой объем займут 560 г азота при давлении 104 кПа и температуре минус 43°C ?

Ответ: $V = 368$ м^3 .

8. Газовая смесь состава 30% CO , 60% N_2 , 10% H_2 находится под давлением $5,0$ МПа.

Найти парциальное давление каждой составной части смеси.

Ответ: $1,5$; $3,0$ и $0,5$ МПа.

9. Подсчитать плотность (ρ) и приведенную молекулярную массу (M) воздуха, если состав его (по объему): 21% O_2 , 78% N_2 и 1% Ar , плотность кислорода $1,429$, азота $1,251$, аргона $1,781$ $\text{кг}/\text{м}^3$.

Ответ: $\rho = 1,293$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $M = 28,96$.

10. Рассчитать, какое количество вещества карбоната кальция прореагировало с достаточным количеством соляной кислоты, если выделился газообразный оксид углерода (IV) объемом 40 л (н.у.), что составляет $0,893$ объемных долей от теоретического выхода. Составить материальный баланс процесса. Рассчитать материальный баланс процесса.

Ответ: 2 моля.

Глава 4
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ,
ПРИНЦИП СОСТАВЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Аналогично материальному балансу химико-технологической системы (ХТС) и на его основе возможно составление и расчет теплового баланса. В основе этого баланса лежит закон сохранения энергии: в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна. Или приход теплоты в ХТС должен быть равен расходу ее в данной системе. Аналогично материальному балансу он может выражаться в виде формул, диаграмм, таблиц.

Рассчитывается для периодических процессов в абсолютных единицах теплоты (энергии), а для непрерывных – в единицах теплоты, отнесенных к определенному временному интервалу.

В общем виде уравнение теплового баланса может быть представлено как

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}} \quad (4.1)$$

или

$$\sum Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}} = 0. \quad (4.2)$$

Кличество приходящего тепла ($Q_{\text{прих}}$) включает всю теплоту, которая поступает в ХТС с сырьевыми потоками (Q_c) (отдельно рассчитывается для сырья в разных фазовых состояниях), теплота, выделяющаяся при экзотермических химических реакциях ($Q_{\text{хр}}$) и физических превращениях ($Q_{\text{фп}}$), а также теплота, подводимая извне к ХТС (подогрев) ($Q_{\text{подогр}}$).

В $Q_{\text{расх}}$ входит теплота, выводимая из аппарата с продуктовыми потоками (также рассчитывается отдельно для потоков в различном фазовом состоянии) ($Q_{\text{пр}}$), теплота, расходуемая для эндотермических химических и физических превращений ($Q_{\text{хр}}$ и $Q_{\text{ф.пр}}$) и теплота, отводимая из ХТС (охлаждение) $Q_{\text{отвед}}$.

Расчет теплоты, вводимой и выводимой из ХТС с сырьем и продуктами, рассчитывается в общем виде в виде формулы

$$Q_{c, \text{пр}} = G \cdot \bar{c} \cdot t, \quad (4.3)$$

где G – количество сырья (продуктов) (кг, м³, моль);
 t – температура потока;

\bar{c} – средняя теплоемкость сырья (продуктов) при температуре t (входящего, выходящего потока),

или

$$Q = G \cdot i, \quad (4.4)$$

где i – теплосодержание сырья (продуктов) или энтальпия.

Ввиду того, что точность расчета определяется правильностью подсчета величины \bar{c} , остановимся на ней подробнее.

1. Величина \bar{c} должна быть взята или подсчитана в соответствии с величиной G : если G – кг, то \bar{c} – кДж/кг (или ккал/кг); если G взято в м^3 , то \bar{c} – кДж/ м^3 (или ккал/ м^3 , или моль/л (кмоль/ м^3)).

2. Теплоемкость смеси рассчитывается по правилу аддитивности, т.е. с учетом теплоемкости и доли каждого компонента;

3. При тепловых расчетах следует различать теплоемкость вещества при данной температуре, которая называется истинной теплоемкостью (C), и теплоемкость в пределах определенных температур ($t_1 - t_2$) – \bar{c} – средней теплоемкостью.

В расчетах чаще используют среднюю теплоемкость (\bar{c}), которая показывает то количество тепла, которое необходимо для повышения температуры единицы массы и вещества на 1° в определенном температурном интервале (в таблицах справочников указываются эти интервалы температур).

Теплоемкость веществ, отнесенная к весовым единицам измерения их массы, называется удельной теплоемкостью (Дж/г·град; кДж/кг·град; кДж/кг-моль·град). Существуют понятия «удельная», «молекулярная» и «объемная теплоемкость», откуда следует $C = M \cdot c$ и $\bar{C} = M \cdot \bar{c}$; для газов $C = 22,4 \cdot c_{об}$, $\bar{C} = 22,4 \cdot \bar{c}_{об}$ и для жидкостей $\rho \cdot c = C_{об}$, где $C, c, \bar{C}, \bar{c}, C_{об}, c_{об}$ – истинная мольная, истинная удельная, средняя мольная, средняя удельная, объемная и средняя объемная теплоемкости вещества; M – молекулярная масса; ρ – плотность жидкости.

4. Теплоемкость газов зависит от температуры и давления. Эта зависимость (на основании экспериментальных данных) имеет следующий вид:

$$C = a_0 + a_1 T + a_2 T^2, \quad (4.5)$$

где a_0, a_1, a_2 – эмпирические коэффициенты;

T – температура, при которой определяют значение теплоемкости вещества (приводятся в справочниках и специальных тепловых диаграммах).

Для газов следует различать теплоемкости при постоянном давлении (C_p, \bar{C}_p) и постоянном объеме (C_v, \bar{C}_v), которые сильно разнятся. Разность между мольными теплоемкостями C_p и C_v равна газовой постоянной: $C_p - C_v = R$.

5. Теплоемкость жидкостей практически не зависит от давления. Теплоемкость растворов в пределах концентрации 40 – 50% можно определить по правилу смешения с учетом долей воды и соли. Это правило не действует для растворов кислот и щелочей.

6. Вычисление теплоемкости твердых тел осуществляется по формуле

$$C_S = \sum n \cdot C_s, \quad (4.6)$$

где n – доля элемента, входящего в данное соединение;

C_s – соответствующая теплоемкость данного элемента.

Ввиду того, что в аппаратах ХТС чаще всего идут химические и физические превращения веществ, то при этом обязательно происходит или выделение, или поглощение теплоты. В расчетах при этом приходится учитывать следующие виды теплот химических и физических процессов: а) теплоту химической реакции; б) теплоту испарения (парообразования); в) теплоту плавления; г) теплоту растворения.

Теплотой химической реакции (Q_{xp}) называется выделяемая или поглощаемая теплота при данной температуре в процессе химического взаимодействия веществ.

Согласно закону Гесса, стандартная теплота реакции равна разнице сумм теплот образования конечных продуктов и исходных реагентов. Данные по теплотам образования и сгорания всегда берут из таблиц «Стандартных теплот образования веществ» (20⁰С и 1 атм). Газы и растворы предполагаются идеальными.

В практике расчетов производственных процессов широким распространением пользуется метод подсчета теплоты реакции при помощи теплосодержаний: если состояние системы при 20⁰С и $P = 1$ атм принять за нулевое, то разность теплосодержаний между конечными и начальными продуктами реакции при заданной температуре T численно будет равна разности теплот реакций при температуре 20⁰С и заданной температуре T , т.е.

$$\Delta I = \Delta Q_{xp}, \quad (4.7)$$

или

$$Q_{xp}^{20} - Q_T^{xp} = \sum I_K - \sum I_H, \quad (4.8)$$

или

$$Q_T^{xp} = Q_{xp}^{20} - (\sum I_K - \sum I_H),$$

где Q_{xp}^{20} – стандартная теплота реакции;

Q_T^{xp} – теплота реакции при заданной температуре T ;

$\sum I_H$ – теплосодержание исходных веществ (сырья) при температуре T по отношению к стандартному их состоянию, принятому за нулевое;

$\sum I_K$ – теплосодержание конечных продуктов при температуре T по отношению к стандартному их состоянию, принятому за нулевое.

Зависимость теплового эффекта от температуры реакции описывается уравнением Нернста:

$$Q_{xp} = Q_{xp}^0 + \Delta a_0 \cdot T \pm \frac{1}{2} \cdot \Delta a_1 \cdot T^2 + \frac{1}{3} \cdot \Delta a_2 \cdot T^3, \quad (4.9)$$

где $\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta a_2$ – разности коэффициентов уравнения (4.5) известных химических реакций для продуктов реакции и исходного сырья.

Теплота испарения ($r_{исп}$) – величина, показывающая, сколько необходимо тепла для того, чтобы превратить единицу массы жидкости при данной температуре в парообразное состояние. В расчетах используют удельную (Дж/кг; ккал/кг; кал/г и пр.) и молекулярную теплоту парообразования (испарения) (Дж/моль; кДж/кмоль; кал/моль и т.д.).

Чаще всего эти данные берут из справочников. Но если данных нет, можно использовать следующую эмпирическую формулу:

$$r_{исп} = K \cdot r_{исп}'' \frac{T_1}{T_2}, \quad (4.10)$$

где $r_{исп}$ – теплота испарения жидкости при T_1 ;

$r_{исп}''$ – теплота ее испарения при T_2 ;

K – поправочный коэффициент, который зависит от $T_{критич}$.

Теплоты испарения можно находить и по тепловым (энтропийным) диаграммам.

Теплота плавления ($r_{пл}$) называют количество тепла, необходимое для превращения единиц массы (кг, г, моль и т.д.) твердого тела в жидкое состояние. Величины эти эмпирические. Для технологических расчетов используются справочные данные.

Теплота растворения ($Q_{раств}$) – это тот тепловой эффект, который возникает при растворении единицы массы (1 кг-моль, 1 г, 1 моля и т.д.) определенного вещества в таком количестве растворителя, что дальнейшее прибавление последнего практически не дает добавочного теплового эффекта.

Теплоты растворения приводятся в справочной литературе. Для вычисления теплоты растворения 1 моль минеральной кислоты в n молях воды пользуются эмпирическими формулами:

$$\text{HCl} + (n + 1) \cdot \text{H}_2\text{O}; Q_{\text{раств}} = \frac{11980 \cdot n}{n + 1} + 5375;$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 + n\text{H}_2\text{O}; Q_{\text{раств}} = \frac{17860 \cdot n}{n + 1,7983};$$

$$\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}; Q_{\text{раств}} = \frac{8974}{n + 1,737}.$$

Теплота сгорания топлива – это количество тепла, выделяемое при полном сгорании 1 кг топлива (1 м³ газообразного топлива) (справочные данные).

Для подсчета теплоты сгорания твердого и жидкого топлива по его элементарному составу чаще используется формула Д.И. Менделеева:

$$Q_H^P = 4,186 \cdot [81C + 300H - 26(O - S) - 6(9H + W)], \quad (4.11)$$

или

$$Q_H^P = 339,3C + 1256H - 109(O - S) - 25,2(9H + W),$$

где Q_H^P – низшая (рабочая или полезная) теплота сгорания топлива (кДж/кг); в уравнении (4.11) внутри квадратных скобок – ккал/кг;

C, H, O, S, W – процентное содержание элементов в топливе, % масс. Сумма составных частей топлива должна составлять 100%:

$$(C + H + O + S + A + W) = 100.$$

В последнем выражении A – содержание золы, а W – влаги. Условно состав топлива можно представить в виде следующей схемы (рис. 4.1).

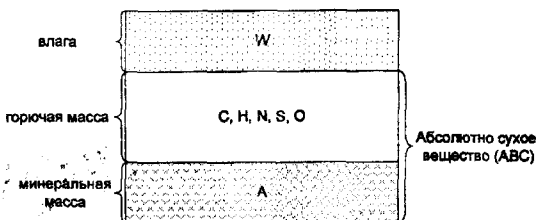


Рис. 4.1. Состав топлива

Горючая, абсолютно сухая и беззольная масса входит в состав любого органического вещества (топлива), но доля ее в общем составе может сильно варьировать в зависимости от доли минеральных (негорючих) компонентов (зола), а также доли влаги (свободной и связанной) (см. рис. 4.1).

При сжигании топлива и любого органического вещества образуется вода, которая входит, как и общая влага топлива, в состав дымовых газов. Поэтому различают понятия «низшая теплота сгорания» (Q_H^P) и «высшая теплота сгорания» (Q_B^P). Низшая теплота предполагает наличие влаги и паров в составе уходящих дымовых газов, высшая – с учетом охлаждения до исходной температуры топлива и конденсации образующихся паров воды. Расчет Q_B^P можно произвести по следующей формуле:

$$Q_B^P = 339,3C + 1256H - 109(O - S) = Q_H^P + 25,2(9H + W). \quad (4.12)$$

При сжигании топлива используется кислород, при этом теоретический расход воздуха может быть рассчитан исходя из элементарного состава топлива по формуле

$$G = \frac{1}{23} \left[\frac{32}{12}C + \frac{16}{2}H + \frac{32}{32}(S - O) \right], \quad (4.13)$$

или

$$G = 0,116C + 0,348H + 0,0435(S - O)$$

(кг на 1 кг горючего топлива).

Практический расход воздуха берется в избытке против теоретического в количестве: для твердого топлива от 1,3 до 1,7; для жидкого – от 1,1 до 1,2; для газообразного – от 1,0 до 1,2.

Теплота, подводимая к (отводимая от) аппарату для поддержания определенной температуры в нем и не участвующая в непосредственном химическом процессе. Например, подогрев аппарата горячими газами, водяным паром, горячей водой. Или, напротив, охлаждение аппарата – аналогично – водой, воздухом, охлаждающими растворами.

Эти теплоты рассчитываются для конкретных случаев и условий и в соответствии с законами теплопередачи, которые рассматриваются в специальной литературе. Однако, как частный случай, можно рассмотреть подвод теплоты в аппарат (Q_n). Например, по потере количества теплоты теплоносителем:

– греющей водой:

$$Q_{II} = G_w \cdot c_w \cdot (t_{нач} - t_{кон}); \quad (4.14)$$

— паром:

$$Q_{II} = G' \cdot r; \quad (4.15)$$

— по формуле теплопередачи через греющую стенку

$$Q_{II} = K \cdot F \cdot (t_G - t_X) \cdot \tau, \quad (4.16)$$

где $G_{св}, \bar{c}_{св}$ — расход и средняя теплоемкость воды;

G' — расход пара;

r — теплота конденсации (фазового перехода);

t_G и t_X — средняя температура греющей воды, пара и нагреваемого (холодного) вещества в аппарате;

τ — время контакта.

По формуле (4.16) и другим можно рассчитать и потери в окружающую среду (если они имеются). В качестве других расчетных уравнений теплопотерь, связанных с теплопроводностью стенок аппарата, можно привести уравнения:

— в случае плоских стенок:

$$Q_{см} = K_1 \cdot \Delta t_{cp} \cdot F \cdot \tau; \quad (4.17, a)$$

— в случае цилиндрических стенок:

$$Q_{см} = K_2 \cdot \Delta t_{cp} \cdot l \cdot \tau, \quad (4.18, a)$$

где Δt — средняя разность температур между внутренней (t_1) и внешней (t_2) стенками аппарата ($\Delta t = t_1 - t_2$) или теплопередающими трубками аппарата;

F — поверхность стенки, м²;

l — длина стенки цилиндра (трубки), м;

K — коэффициенты теплопередачи, которые подсчитываются по уравнениям:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (4.17, б)$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{нар}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} \cdot \lg \frac{d_{нар}}{d_{вн}}}, \quad (4.18, б)$$

где α_1 — коэффициент теплопередачи между газом, паром или жидкостью и внутренней стенкой аппарата (цилиндра, трубки), Вт/м²·град;

α_2 – то же, между газом (жидкостью) и наружной стенкой аппарата (цилиндра, трубки), Вт/м²·град;

$d_{вн}, d_{нар}$ – внутренний и наружный диаметр цилиндра (трубки), м;

δ – толщина теплопередающей стенки аппарата (трубки); в случае цилиндрических стенок

$$\delta = \frac{d_{нар} - d_{вн}}{2};$$

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/м·град, берется из таблиц.

$$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots$$

(для неоднородных стенок, например, изолированных труб и других поверхностей).

Коэффициенты теплопередачи α_1 и α_2 зависят от скорости движения теплоносителя, его физических свойств, профиля поверхности теплообмена и других факторов. Эти коэффициенты берутся из таблиц или подсчитываются по критериальной формуле Нуссельта (Nu):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot Z}{\lambda}, \quad (4.19)$$

где Z – определяющий размер поверхности теплообмена, м. В случае трубок в качестве Z служит их диаметр (d), а в случае плоской поверхности – ее высота (h).

Критерий Нуссельта (Nu) является функцией ряда других критериев, которые представляют собой безразмерные величины, отражающие различные стороны процесса теплообмена. В частности критерий Рейнольдса (Re) отражает характер течения теплоносителя вдоль стенки теплообмена; критерий Прандтля (Pr) – связь теплообмена с физическими параметрами теплоносителя; критерий Грасгофа (Gr) – связь теплообмена с температурным режимом теплоносителя.

Расчеты по данным критериальным уравнениям приводятся в специальной литературе.

Необходимо отметить, что в данном учебном пособии не представляется возможным показать все варианты технологических расчетов, которые возможны на основе материального и теплового балансов. Рассматриваются только те, которые чаще используются для технологического расчета химического производства, а именно:

- определение и анализ теоретических и практических расходных коэффициентов;
- расчет материальных и тепловых потерь;
- расчет основных технологических показателей – конверсии, селективности, выхода продукта;
- определение теплового эффекта и, соответственно, расхода теплоносителя или хладагента;
- определение теплотворной способности горючих соединений, топлив; предельной температуры горения; расхода воздуха (кислорода) на процесс горения; определение расхода и состава дымовых газов и пр.

В плане ресурсо- и энергосбережения представляет интерес расчет расходов и температур отводимых и не учитываемых в производстве технологических потоков с целью глубокой рекуперации материальных и энергетических ресурсов.

Примеры решения задач

Задача №1

Рассчитать количество тепла, которое несет газовая смесь 500 м^3 (н.у.) следующего состава, % об.: $\text{CH}_4 - 60$; $\text{CO}_2 - 30$ и $\text{N}_2 - 10$, при температуре 50°C . Справочные данные: удельная теплоемкость газов \bar{c} , кДж/кг·град - $\text{CH}_4 - 2,26$; $\text{CO}_2 - 0,84$ и $\text{N}_2 - 1,05$.

Решение (1 вариант):

1. Определим объем каждого компонента в газовой смеси:

$$\text{CH}_4 \quad 500 \cdot 0,6 = 300 \text{ м}^3,$$

$$\text{CO}_2 \quad 500 \cdot 0,3 = 150 \text{ м}^3,$$

$$\text{N}_2 \quad 500 \cdot 0,1 = 50 \text{ м}^3.$$

2. Определим массу каждого компонента в 500 м^3 (ввиду того, что справочные данные \bar{c} приведены в кДж/кг·град):

$$G_{\text{CH}_4} = 300 \cdot \frac{16}{22,4} = 214,28 \text{ кг},$$

$$G_{\text{CO}_2} = 150 \cdot \frac{12+32}{22,4} = 294,64 \text{ кг},$$

$$G_{\text{N}_2} = 50 \cdot \frac{28}{22,4} = 62,5 \text{ кг}.$$

3. Определим теплосодержание газовой смеси (по уравнению (4.3)).

$$Q_{z.c.} = 50 \cdot (214,28 \cdot 2,26 + 294,64 \cdot 0,84 + 62,5 \cdot 1,05) =$$

$$= 24213,6 + 12374,9 + 3281,25 = 39869,75 \text{ кДж},$$

или $\approx 39,9 \text{ МДж}$.

Решение (2 вариант):

Справочные данные: молярная теплоемкость газов \bar{c} , кДж/кмоль·град (0°C и $P_{\text{атм}} = 101,3 \text{ кПа}$): $\text{CH}_4 - 35,7$; $\text{CO}_2 - 38,6$; $\text{N}_2 - 29$.

$$Q_{z.c.} = t \cdot \left(\frac{V_{\text{CH}_4}}{22,4} \cdot C_{\text{CH}_4} + \frac{V_{\text{CO}_2}}{22,4} \cdot C_{\text{CO}_2} + \frac{V_{\text{N}_2}}{22,4} \cdot C_{\text{N}_2} \right) =$$

$$= 50 \cdot \left(\frac{300}{22,4} \cdot 35,7 + \frac{150}{22,4} \cdot 38,4 + \frac{50}{22,4} \cdot 29 \right) = 40060 \text{ кДж}$$

$\approx 40 \text{ МДж}$.

Решение (3 вариант):

Справочные данные: теплосодержание (энтальпия, h) газов смеси при $P = 1 \text{ атм}$ и $t = 100^\circ\text{C}$, кДж/кг·моль: $\text{CH}_4 - 3658$; $\text{CO}_2 - 3917$; $\text{N}_2 - 2870$.

Ввиду того, что температура газов смеси составляет 50°C , а энтальпия газов при 0°C равна 0, справочные данные по теплосодержанию газов делим надвое. Эту величину умножаем на количество кг-молей каждого компонента газовой смеси. Расчет ведем по уравнению (4.4):

$$Q_{г.с.} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{22,4} \cdot i_{\text{CH}_4} + \frac{V_{\text{CO}_2}}{22,4} \cdot i_{\text{CO}_2} + \frac{V_{\text{N}_2}}{22,4} \cdot i_{\text{N}_2} =$$

$$= \frac{3658}{2} \cdot \frac{300}{22,4} + \frac{3917}{2} \cdot \frac{150}{22,4} + \frac{2870}{2} \cdot \frac{50}{22,4} = 40,6 \text{ МДж.}$$

Расчеты возможно провести и другими способами, используя любые справочные данные. Главным является использование правила аддитивности и зависимости теплосодержания газов от их термодинамических характеристик.

Задача № 2

Определить теплоемкость ($\bar{c}_{см}$) 30% раствора натрия азотнокислого.

Решение:

1. Средняя удельная теплоемкость натрия азотнокислого при $+18^{\circ}\text{C}$ составляет 1,089 кДж/кг-град.

2. Средняя теплоемкость воды составляет 4,190 кДж/кг-град.

3. Общая теплоемкость смеси составляет (по правилу аддитивности)

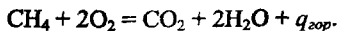
$$\bar{c}_{см} = 0,7 \cdot 4,19 + 0,3 \cdot 1,1 = 2,933 + 0,33 = 3,263 \text{ кДж/кг-град.}$$

Задача № 3

Рассчитать количество тепла, образующегося при полном сгорании $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ (н.у.).

Решение:

1. Уравнение химической реакции горения метана



2. Определяем стандартные теплоты образования участников химической реакции горения метана (справочные данные):

CH_4 – 18600 ккал/кг-моль,

CO_2 – 94250 ккал/кг-моль,

H_2O – 57850 ккал/кг-моль.

3. Используя правило Гесса, рассчитываем тепловой эффект химической реакции:

$$q_{гор} = 2 \cdot 57850 + 94250 - 18600 = 191350 \text{ ккал/кг-моль,}$$

$$\text{или } \frac{191350}{22,4} = 8542 \text{ ккал/м}^3.$$

$$\text{С учетом } M_{\text{CH}_4} = 16, \rho_{\text{CH}_4} = \frac{16}{22,4} = 0,714 \text{ кг/нм}^3,$$

$$q_{\text{гор}} = 11963 \text{ ккал/кг.}$$

Задача № 4

Рассчитать количество теплоты ($Q_{\text{исп}}$), которое необходимо подвести к 150 кг воды, имеющей температуру 20 °С, чтобы испарить эту воду.

Решение:

$$Q_{\text{исп}} = G \cdot \bar{c} \cdot (100 - 20) + G \cdot r,$$

где G – масса воды;

\bar{c} – удельная теплоемкость воды, $\bar{c} = 4,187 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ (15 °С);

r – удельная теплота парообразования воды (80 °С), $r = 2308,7 \text{ кДж/кг}$.

$$Q_{\text{исп}} = 150 \cdot 4,187 \cdot 80 + 150 \cdot 2308,7 = 396549 \text{ кДж.}$$

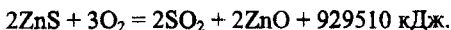
Задача № 5

Определить температуру горения цинковой обманки, содержащей 96% ZnS. Состав обжиговых газов, % об.: SO₂ – 7; O₂ – 11; N₂ – 82. Потери теплоты печью в окружающую среду (без дополнительного охлаждения) 13% от выделяющейся теплоты. При обжиге выгорает 98% ZnS.

Справочные данные: теплоемкость (900 °С), кДж/м³·град: N₂ – 1,382; O₂ – 1,482; SO₂ – 2,215. Молекулярная масса ZnS – 97,4.

Решение:

1. Уравнение химической реакции горения цинковой обманки:



2. Рассчитаем количество теплоты, выделяемое с учетом степени выгорания цинковой обманки:

$$929510 \cdot 0,98 = 910920 \text{ кДж.}$$

3. Рассчитаем объем выделяющегося SO₂ при горении 1 моля ZnS.

Если на 2 моля ZnS образуется 2 моля SO₂, т.е. из 97,4 кг ZnS образуется 22,4 м³ SO₂.

По условию, в сернистом (обжиговом) газе содержится 7% SO₂ и 82% N₂. При обжиге абсолютное количество азота не изменяется, поэтому

7% SO₂ (по условию) соответствует 1 моль SO₂ (22,4 м³), образующегося из 1 моля (97,4 кг ZnS). Или

$$7\% \text{ SO}_2 - 22,4 \text{ м}^3$$

$$82\% \text{ N}_2 - x,$$

т.е. рассчитаем соответственно состав и общий объем обжигового газа:

– азота образуется (на 1 моль сгоревшей ZnS)

$$x_{\text{N}_2} = \frac{82 \cdot 22,4}{7} = 263 \text{ м}^3;$$

– кислорода образуется

$$x_{\text{O}_2} = \frac{11 \cdot 22,4}{7} = 35 \text{ м}^3;$$

– общий объем обжигового газа

$$263 + 35 + 22,4 = 320,4 \text{ м}^3.$$

4. Рассчитаем теплопотери в окружающую среду (на 1 моль ZnS):

$$\frac{910920}{2} \cdot 0,13 = 455460 \cdot 0,13 = 59209,8 \text{ кДж};$$

остаток теплоты:

$$455460 - 59209,8 = 396250,2 \text{ кДж}.$$

5. Рассчитаем температуру горения:

$$t = \frac{Q}{\sum G_i \cdot c_i} = \frac{396250,2}{(363,466 + 51,87 + 49,616)} = 852 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача № 6

Определить количество теплоты, выделяющейся при газификации твердого топлива, если из генератора водяного газа выходит газ состава, % об.: CO – 38; H₂ – 50; CO₂ – 6,2 и N₂ – 5,8.

Расчет вести на 1000 м³ генераторного газа.

Справочные данные: теплоты образования (кДж/моль): CO – 110,58; CO₂ – 393,79; H₂O (пар) – 242,0.

Решение:

1. Уравнение реакции:

В газогенераторе осуществляются три реакции:

1) $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2 - Q$ ($\Delta H > 0$) – реакция стадии парового дутья через твердые топлива;

2) $\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + Q$ – реакция стадии воздушного дутья через твердое топливо;

3) $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 + Q$ – реакция конверсии оксида углерода.

В данном случае принимаем во внимание реакции 1 и 3.

2. Рассчитываем объемное содержание отдельных компонентов водяного газа.

В 1000 м^3 генераторного газа содержится:

$$\text{CO} \quad \frac{38 \cdot 1000}{100} = 380 \text{ м}^3,$$

$$\text{H}_2 \quad \frac{50 \cdot 1000}{100} = 500 \text{ м}^3,$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{6,2 \cdot 1000}{100} = 62 \text{ м}^3,$$

$$\text{N}_2 \quad \frac{5,8 \cdot 1000}{100} = 58 \text{ м}^3.$$

Для осуществления процесса использовано 500 м^3 водяного пара.

3. Расчет количества теплоты:

$$Q = (380 \cdot 10^3 \cdot 110,58 / 22,4) + (62 \cdot 10^3 \cdot 393,79 / 22,4) - \\ - (500 \cdot 10^3 \cdot 242,0 / 22,4) = -2476000 \text{ кДж}.$$

Задача № 7

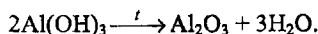
Рассчитать расход природного газа для производства 100 т/сутки глинозема (Al_2O_3). Потери теплоты в окружающую среду составляют 5% от общего расхода теплоты. Температура в зоне реакции составляет 1200°C . Температура сырья ($\text{Al}(\text{OH})_3$), поступающего в печь, 20°C . Составить материальный и тепловой баланс процесса.

Справочные данные:

1. Теплота образования участников химической реакции (кДж/моль): $\text{Al}(\text{OH})_3 - 1243$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1676$; $\text{H}_2\text{O} - 241,84$.
2. Теплоемкость (кДж/кг·град): $\text{Al}(\text{OH})_3 - 0,879$ (20°C); $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,327$ (1200°C); $\text{H}_2\text{O} - 2,12$ (1200°C).
3. Молекулярная масса: $\text{Al}(\text{OH})_3 - 78$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 102$; $\text{H}_2\text{O} - 18$.
4. Теплотворная способность природного газа (принимаем) - 33950 кДж/м^3 .

Решение:

1. Уравнение реакции при производстве глинозема (Al_2O_3)



2. Рассчитаем массу сырья для производства 100 т/сутки глинозема

$$G_{Al(OH)_3} = \frac{100000 \cdot 156}{102} = 152941 \text{ кг/сут.}$$

3. Рассчитаем массу реакционной воды, образующейся при производстве:

$$G_{H_2O} = \frac{152941 \cdot 54}{156} = 52941 \text{ кг/сут.}$$

4. Составим материальный баланс процесса (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Материальный баланс производства глинозема

Приход	кг/сутки	Расход	кг/сутки
1. $Al(OH)_3$	152941	1. Al_2O_3	100000
		2. Реакционная вода	52941
Итого:	152941		152941

5. Составим уравнение теплового баланса процесса:

$$Q_{Al(OH)_3} + Q_{м.г.} = Q_{Al_2O_3} + Q_{H_2O} + Q_{потерь} + Q_{xp}$$

(процесс эндотермический, поэтому Q_{xp} в статье «расход теплоты», а $Q_{м.г.}$

– теплотворная способность топливного газа, умноженная на его расход).

6. Рассчитаем отдельные значения уравнения теплового баланса:

– теплота, уходящая из аппарата с целевым продуктом ($Q_{Al_2O_3}$),

$$Q = G \cdot c \cdot t,$$

или $Q_{Al_2O_3} = 100000 \cdot 1,327 \cdot 1200 = 159240000 \text{ кДж/сут;}$

– теплота, уходящая из аппарата с реакционной водой,

$$Q_{H_2O} = 52920 \cdot 2,12 \cdot 1200 = 134\,628\,480 \text{ кДж/сут;}$$

– теплота, расходуемая на проведение эндотермической химической реакции,

$$Q_{xp} = \left(\frac{100000 \cdot 1000}{102} \cdot 1676 + \frac{52941 \cdot 1000}{3,18} \cdot 241,84 \right) - \frac{152941 \cdot 1000}{2 \cdot 78} \cdot 1243 =$$

$$= 661\,514\,200 \text{ кДж/сут;}$$

– общий расход теплоты составляет

$$Q_{расх} = 661514200 + 159240000 + 134628480 = 955\,382\,680 \text{ кДж/сут;}$$

– потери теплоты от аппарата в окружающую среду

$$Q_{потерь} = 955382680 \cdot 0,05 = 47\,769\,134 \text{ кДж/сут;}$$

– суммарный расход теплоты составляет

$$\sum Q_{расх} = 955382680 + 47769134 = 1\,003\,151\,814 \text{ кДж/сут.}$$

7. Составим тепловой баланс процесса (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Тепловой баланс процесса

Приход	кДж/сутки	Расход	кДж/сутки
1. Теплосодержание сырья (Al(OH) ₃)	2 688 702,6	1. Тепло, расходуемое на проведение химической реакции	661 514 000
		2. Теплосодержание Al ₂ O ₃ – целевого продукта	159 240 000
		3. Теплосодержание реакционной воды	134 628 480
		4. Теплотери в окружающую среду	47 769 134
Итого:	2 688 702,6		1 003 151 814

Разница между приходом и расходом составляет то количество теплоты, которое необходимо ввести в процесс производства глинозема при термическом разложении сырья. Осуществляется подвод теплоты при сжигании топливного газа.

8. Рассчитаем количество теплоты, которое необходимо подвести для реализации процесса термического разложения (по дебалансу):

$$\Delta Q = Q_{\text{расход}} - Q_{\text{приход}}; \Delta Q = 1\,000\,463\,111 \text{ кДж/сут.}$$

9. С учетом теплотворной способности топлива рассчитаем расход его за сутки

$$G_{\text{топливо}} = \frac{1000463111}{33950} = 29468 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Задача № 8

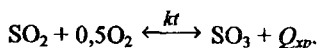
На первый слой контактного аппарата при 450 °С подается 10000 м³/ч исходной газовой смеси, содержащей (% об.): SO₂ – 10; O₂ – 11; N₂ – 79.

Контактное окисление SO₂ в SO₃ – обратимая экзотермическая каталитическая реакция, поэтому контактный газ на выходе из слоя аппарата имел температуру 580 °С.

Определить степень окисления SO₂. Принять теплоемкость газов неизменной и равной 1,38 кДж/м³·град; неизменный объем газов. Тепло химической реакции (Q_{хр}) рассчитываем как Q_{хр} = 101420 – 9,26 · T_{ср}.

Решение:

1. Уравнение химической реакции контактного окисления:



2. Рассчитываем количество теплоты, уносимой из слоя катализатора контактным газом:

$$Q_{к.з.} = G \cdot \bar{c} \cdot \Delta t; Q_{к.з.} = 10000 \cdot 1,38 \cdot (580 - 450) = 1\,794\,000 \text{ кДж/ч.}$$

3. Принимаем $T_{cp} = \frac{450 + 580}{2} = 515^\circ\text{C} + 273 = 788 \text{ К.}$

4. Рассчитываем количество тепла от экзотермической реакции окисления

$$Q_{xp} = 101420 - 9,26 \cdot 788 = 94123 \text{ кДж/кмоль}$$

5. Рассчитаем объем образовавшегося SO_3 :

$$V_{\text{SO}_3} = \frac{1794000 \cdot 22,4}{94123} = 427 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

6. Исходное содержание SO_2 в контактном газе составляло 10% об., т.е. было равно

$$V_{\text{SO}_2} = 10\,000 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 0,1 = 1000 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

7. Степень превращения SO_2 в SO_3 составляет

$$x_{\text{SO}_2} = \frac{427}{1000} = 0,427 \text{ (42,7\%).}$$

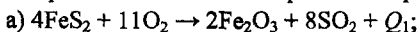
Задача № 9

Обжигают углистый колчедан с содержанием 32% S и 10% C.

Определить тепловой эффект от сжигания 100 кг колчедана. Рассчитать теоретический расход воздуха на обжиг.

Решение:

1. Уравнение химической реакции горения углистого колчедана:



Справочные данные: теплота образования участников реакции горения (кДж/моль): $\text{FeS}_2 - 149$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 817$; $\text{SO}_2 - 289$; $\text{CO}_2 - 410$.

$$M_{\text{FeS}_2} = 56 + 64 = 120.$$

2. Рассчитаем тепловой эффект химических реакций:

$$Q_1 = (2 \cdot 817 + 8 \cdot 289) - 4 \cdot 149 = 3350 \text{ кДж,}$$

$$Q_2 = 410 \text{ кДж.}$$

Из этих термохимических уравнений видно, что при сгорании $4 \cdot 120 = 480$ кг пирита (FeS_2), или что аналогично, при сгорании 256 кг серы выделяется 3350 кДж тепла. А при сгорании 12 кг углерода – 410 кДж тепла.

3. Рассчитаем количество теплоты, которое выделится при сжигании 100 кг пирита (содержит 32 кг S и 10 кг C):

$$Q_S = \frac{3350 \cdot 32}{256} = 418,8 \text{ кДж,}$$

$$Q_C = \frac{410 \cdot 10}{12} = 342 \text{ кДж.}$$

Суммарное количество, выделяющейся теплоты составит

$$\sum Q = 419 + 342 = 761 \text{ кДж/100 кг пирита.}$$

4. Рассчитываем расход кислорода на горение.

По уравнению химической реакции 256 кг S требуют $11 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \text{ O}_2$, а 12 кг C требуют $22,4 \text{ м}^3 \text{ O}_2$.

Соответственно, расход O_2 на выгорание серы в 100 кг пирита (32 кг S и 10 кг C) составляет:

$$G_{\text{O}_2}^S = \frac{11 \cdot 22,4 \cdot 32}{256} = 30,8 \text{ м}^3,$$

$$G_{\text{O}_2}^C = \frac{22,4 \cdot 10}{12} = 18,7 \text{ м}^3.$$

Общий расход кислорода на выгорание 100 кг пирита составит:

$$G_{\text{O}_2} = 30,8 + 18,7 = 49,5 \text{ м}^3.$$

А расход воздуха (21% об. O_2 и 79% об. N_2) составит:

$$G_{\text{возд}} = \frac{49,5 \cdot 100}{21} = 235,7 \text{ нм}^3 (0^\circ\text{C и 760 мм рт.ст.),}$$

или

$$m_{\text{возд}} = 235,7 \cdot 1,293 = 293,3 \text{ кг.}$$

Задача № 10

Рассчитать теплотворность следующих соединений: этилового спирта ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$); графита (C) и метана (CH_4). Сравнить расчетные данные со справочными.

Решение:

1. Рассчитываем молекулярную массу этилового спирта, графита и метана:

$$M_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 12 \cdot 2 + 5 + 17 = 46,$$

$$M_C = 12,$$

$$M_{\text{CH}_4} = 12 + 4 = 16.$$

2. Рассчитываем долю отдельных элементов в составе молекулы C_2H_5OH , %:

$$C - \frac{24}{46} = 52,$$

$$H - \frac{6}{46} = 13,$$

$$O - \frac{16}{46} = 34,78.$$

Округляем значения таким образом, чтобы сумма ставила 100% (O → до 35%).

$$T_{з.т.с.} = 81 \cdot 52 + 300 \cdot 13 - 26 \cdot 35 = 4212 + 3900 - 910 = 7202 \text{ ккал/кг} \\ (7,2 \text{ ккал/г}).$$

Справочные данные: C_2H_5OH (теплотворность 1 г – 7,14 ккал).

Графит (C) (100%):

$$T_{з.т.с.} = 81 \cdot 100 = 8100 \text{ ккал/кг.}$$

Справочные данные: C (теплотворность 1 г – 8,1 ккал).

Метан (CH_4), доля отдельных элементов, %:

$$C - \frac{12}{16} = 75,$$

$$H - \frac{4}{16} = 25,$$

$$T_{CH_4} = 81 \cdot 75 + 300 \cdot 25 = 6075 + 7500 = 13575 \text{ ккал/кг.}$$

Справочные данные: CH_4 (теплотворность 1 г – 13,2 ккал),

$$\text{или } \frac{16}{22,4} \cdot 13575 = 9692,6 \text{ ккал/м}^3,$$

$$\text{или } 9692,6 \cdot 4,19 = 40612 \text{ кДж/м}^3.$$

Задача № 11

Рассчитать теплотворность (калорийность) основных органических соединений – белка, жира и углеводов. Сравнить полученные расчетные данные со справочными.

Решение:

1. Рассчитаем калорийность белка – альбумина. Брутто-формула его сухого беззольного вещества



Молекулярная (молярная) масса

$$12 \cdot 72 + 112 + 14 \cdot 18 + 16 \cdot 22 + 32 = 1612.$$

Доля элементов, %:

$$C - \frac{864}{1612} = 53,35 (53,4),$$

$$H - \frac{112}{1612} = 6,9 (7,0),$$

$$O - \frac{352}{1612} = 21,8 (22),$$

$$N - \frac{252}{1612} = 15,6 ,$$

$$S - \frac{32}{1612} = 1,99 (2,0).$$

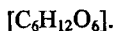
Сумма элементов: $53,4 + 7,0 + 22 + 15,6 + 2 = 100\%$.

2. Расчет теплотворности белка (калорийности)

$$T_{\text{белок}} = 81 \cdot 53,4 + 300 \cdot 7,0 + 26 \cdot 2,0 - 26 \cdot (22 + 15,6) \approx 5508 \text{ ккал/кг.}$$

Справочные данные: 1 г белка $\approx 4,1$ ккал

3. Рассчитаем теплотворность углевода-глюкозы. Ее брутто-формула



Молекулярная (мольная) масса

$$12 \cdot 6 + 12 + 16 \cdot 6 = 72 + 12 + 96 = 180.$$

Доля в ней отдельных элементов, %:

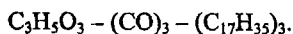
$$C - \frac{72}{180} = 40; \quad H - \frac{12}{180} = 6,6; \quad O - \frac{96}{180} = 53,3. \text{ Округляем сумму эле-}$$

ментов до 100.

$$T_{\text{глюкоза}} = 81 \cdot 40 + 300 \cdot 7 - 26 \cdot (53) = 3962 \text{ ккал/кг.}$$

Справочные данные: 1 г углеводов $\approx 4,1$ ккал, а 1 г сахарозы – 3,95 ккал/г.

4. Рассчитаем теплотворную способность жира (подсолнечное масло)



Его брутто-формула: $[C_{57}H_{104}O_6]$

Молекулярная (мольная) масса

$$12 \cdot 57 + 104 + 16 \cdot 6 = 884.$$

Доля отдельных элементов, %:

$$C - \frac{684}{884} = 77,37,$$

$$H - \frac{104}{884} = 11,76, \quad O - \frac{96}{884} = 10,85.$$

Округляем сумму до 100.

$$T_{\text{жира}} = 81 \cdot 77,37 + 300 \cdot 11,8 - 26 \cdot 10,85 = 9524,87 \text{ ккал/кг (9,5 ккал/г).}$$

Справочные данные: 1 г жира $\approx 9,3$ ккал.

Задача № 12

Определить теплотворную способность сухого беззольного вещества различных видов топлива (табл. 4.3) расчетным путем и сравнить полученные результаты со справочными.

Решение:

1. В расчетах используется элементарный состав топлива (сухого беззольного вещества), а расчет теплотворности осуществляется по формуле Д.И. Менделеева (4.11).

2. В табл. 4.3 приведены данные по теплоте сгорания (над чертой - кДж/кг; под чертой - в ккал/кг).

Задача № 13

Рассчитать расход воздуха на сжигание 1 кг мазута при избытке воздуха 1,36. Воздух для горения содержит в 1 м^3 $0,015 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$. Состав мазута, % масс.: С - 87; H_2 - 10,8; O_2 - 1,0; S - 0,7; N_2 - 0,5. Температура воздуха и мазута, поступающих на сжигание, - 20°C . Определить общие тепловые потери (стенки топки и факел) от прихода теплоты. Определить состав дымовых газов, уходящих из топки с температурой 1600°C . Составить материальный и тепловой балансы.

Решение:

1. Уравнение химической реакции горения мазута



2. Рассчитаем теплотворную способность мазута (по формуле Д.И. Менделеева)

$$Q_H^p = 339,3 \cdot 87 + 1256 \cdot 10,8 - 109 \cdot (1 - 0,7) - 25,2 \cdot (9 \cdot 10,8) = 40601,76 \text{ кДж/кг.}$$

3. Рассчитаем расход кислорода и воздуха на сжигание:

$$\text{по реакции (1): } \frac{32 \cdot 870}{12} = 2320 \text{ г (на C),}$$

$$\text{по реакции (2): } \frac{16 \cdot 108}{2} = 864 \text{ г (на H}_2\text{),}$$

$$\text{по реакции (3): } \frac{7 \cdot 32}{32} = 7 \text{ г (на S),}$$

Всего: 3191 г.

Теплоты сгорания топлив

№ п/п	Вид топлива	Элементарный состав сухого беззольного в-ва (горючей массы), % масс.				Теплота сгорания	
		С	Н	О	S	Расчетная	Справочная
1	Древесина (береза)	49,5	6,10	44,4	-	19587	4500
2	Торф	57,9	5,25	35,1	1,10	22493	10% влаги - 4100 5400 - 5500
3	Бурый уголь	72,6	6,61	19,8	1,49	29737	6000 - 7000
4	Каменный уголь, 1	79,4	5,30	10,3	2,82	32713	7300 - 8000
5	Каменный уголь, 2	86,1	5,02	6,8	0,60	34769	-
6	Полуантрацит	90,4	4,31	2,2	1,50	35935	-
7	Кокс	97,7	0,63	-	0,96	33975	-
8	Нефть	83 - 85	11 - 14	0,5 - 2,0		41884 - 45562	10000
9	Нефть сахалинская	83 - 87	11,85	0,27	0,3	10020 - 10900	
10	Бензин	85,1	14,9	-	-	47497	11363

С учетом содержания в мазуте кислорода 10 г в 1 кг (1% масс.) расход кислорода составит:

$$3,191 - 0,01 = 3,181 \text{ кг/кг мазута, или } \frac{22,4 \cdot 3,181}{32} = 2,22 \text{ м}^3.$$

С учетом $\alpha = 1,36$ расход кислорода $2,22 \cdot 1,36 = 3,02 \text{ м}^3$,
азота $- 3,02 \cdot 3,76 = 11,38 \text{ м}^3$,
всего воздуха $- 14,4 \text{ м}^3$,

или

$$14,4 \cdot 1,2928 = 18,60 \text{ кг.}$$

4. Рассчитаем влагосодержание в 1 кг воздуха:

$$\frac{0,015}{1,2928} \cdot \frac{18}{22,4} = 0,0093 \text{ кг H}_2\text{O}.$$

5. Определим состав продуктов сгорания 1 кг мазута, кмоль (табл. 4.4).

Таблица 4

Состав продуктов сгорания

CO ₂		0,87/12 = 0,0725	10,78 % об.
H ₂ O	- от сжигания H ₂	0,0555, в т.ч.:	8,25
	- влага воздуха	0,108/2 = 0,0540	
SO ₂		18,62 · 0,0015 = 0,00155	0,0297
N ₂		0,007/32 = 0,0002	75,61
	- от мазута	0,508, в т.ч.:	
	- от воздуха	0,005/28 = 0,0002	
O ₂	(избыток)	11,38/22,4 = 0,50803	
		(3,02 - 2,22)/22,4 = 0,0357	5,3
		Σ = 0,6721	

Рассчитаем % об. каждого компонента дымовых газов:

$$\text{CO}_2 - \frac{0,0725}{0,6721} = 10,78,$$

$$\text{H}_2\text{O} - \frac{0,0555}{0,6721} = 8,26,$$

$$\text{SO}_2 - \frac{0,0002}{0,6721} = 0,297,$$

$$\text{N}_2 - \frac{0,5082}{0,6721} = 75,61,$$

$$\text{O}_2 - \frac{0,0357}{0,6721} = 5,3.$$

6. Представим материальный баланс процесса горения мазута в форме табл. 4.5 (на 1 кг).

Таблица 4.5

Материальный баланс процесса горения мазута

Приход	кг	м ³	Расход	кг	м ³	% об.
1. Мазут - 1,0, в т.ч.:			1. Продукты сгорания, в т.ч.:			
C	0,87		CO ₂	3,190	1,624	10,79
H ₂	0,108		H ₂ O	0,999	1,243	8,25
O ₂	0,01		SO ₂	0,0128	0,0044	0,029
S	0,007		N ₂	14,229	11,3832	75,64
N	0,005		O ₂	1,142	0,7994	5,3
2. Воздух - 18,60						
		14,4				
O ₂	4,314	3,02				
N ₂	14,225	11,38				
H ₂ O	0,0093					
Итого:	19,6	14,4		19,6	15,05	100

7. Рассчитаем массы отдельных компонентов в газообразных продуктах сгорания от 1 кг мазута (см. табл. 4.5):

$$m_{CO_2} = 0,0725 \cdot 44 = 3,19 \text{ кг,}$$

$$m_{H_2O} = 0,0555 \cdot 18 = 0,999 \text{ кг,}$$

$$m_{SO_2} = 0,0002 \cdot 64 = 0,0128 \text{ кг,}$$

$$m_{N_2} = 0,5082 \cdot 28 = 14,2296 \text{ кг,}$$

$$m_{O_2} = 0,0357 \cdot 32 = 1,1424 \text{ кг.}$$

$$\sum_{пр.сгор.} = 3,19 + 0,999 + 0,0128 + 14,2296 + 1,1424 = 19,6 \text{ кг.}$$

8. Рассчитаем объем отдельных компонентов в составе продуктов сгорания (н.у.) и плотность газов сгорания:

$$V_i = \frac{m_i}{\rho_i}.$$

$$V_{CO_2} = \frac{3,19 \cdot 22,4}{44} = 1,624 \text{ нм}^3,$$

$$V_{H_2O} = \frac{0,999 \cdot 22,4}{18} = 1,2432 \text{ нм}^3,$$

$$V_{SO_2} = \frac{0,0128 \cdot 22,4}{64} = 0,0044 \text{ нм}^3,$$

$$V_{N_2} = \frac{14,229 \cdot 22,4}{28} = 11,3832 \text{ нм}^3,$$

$$V_{O_2} = \frac{1,142 \cdot 22,4}{32} = 0,7994 \text{ нм}^3.$$

$$\sum_{\text{пр.сгор.}} = 1,624 + 1,2432 + 0,0044 + 11,3832 + 0,7994 = 15,05 \text{ нм}^3.$$

$$\rho_{\text{прод.сгор.}} = \frac{19,6}{15,05} = 1,302 \text{ кг/м}^3 \text{ (г/л) (н.у.)}$$

9. Рассчитаем количество теплоты, входящей в топку:

– с сухим воздухом ($\bar{c}_{\text{возд}} = 28,35 \text{ кДж/кмоль}\cdot\text{град}$; 20°C)

$$Q_{\text{с.возд.}} = \frac{14,4 \cdot 28,35 \cdot 20}{22,4} = 364,5 \text{ кДж};$$

– с влагой воздуха ($\bar{c}_{\text{вл}} = 33,71 \text{ кДж/кмоль}\cdot\text{град}$)

$$Q_{\text{вл.возд.}} = \frac{0,0093 \cdot 33,71 \cdot 20}{18} = 0,35 \text{ кДж};$$

– с сжигаемым мазутом ($\bar{c} = 2,5 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$)

$$Q = G \cdot \bar{c} \cdot t = 1 \cdot 2,5 \cdot 20 = 50 \text{ кДж}.$$

10. Суммарное количество теплоты, приходящей в топку, составит:

$$Q_H^p + Q_{\text{с.возд.}} + Q_{\text{вл.возд.}} + Q_{\text{т.мазута}} = Q_{\text{прих}},$$

$$Q_{\text{прих}} = 40601,76 + 364,5 + 0,35 + 50 = 41\,016,61 \text{ кДж}.$$

11. Рассчитаем количество теплоты, уходящей из топки с продуктами сгорания (см. Табл. 4.5)

Справочные данные: энтальпия (i) составляющих компонентов продуктов сгорания (кДж/кмоль) при температуре 1600°C :

$\text{SO}_2 - 85\,429,9$,

$\text{H}_2\text{O} - 66\,667$,

$\text{CO}_2 - 84\,663$,

$\text{N}_2 - 52\,157$,

$\text{O}_2 - 54\,675$.

Рассчитаем количество теплоты:

$$Q_i = G_i \cdot i_i,$$

$\text{CO}_2 = 84663 \cdot 0,0725 = 6\,138 \text{ кДж}$,

$\text{H}_2\text{O} = 66667 \cdot 0,0555 = 3\,700 \text{ кДж}$,

$\text{SO}_2 = 85430 \cdot 0,0002 = 17 \text{ кДж}$,

$\text{N}_2 = 52157 \cdot 0,5082 = 26\,506 \text{ кДж}$,

$\text{O}_2 = 54675 \cdot 0,0357 = 1\,952 \text{ кДж}$,

$$\sum Q_{\text{пр.сгор.}} = 38\,313 \text{ кДж}.$$

12. Рассчитаем теплопотери с учетом теплового баланса (см. таблицу теплового баланса, табл. 4.6).

Уравнение теплового баланса горения мазута:

$$\sum Q_{\text{прихода}} = \sum Q_{\text{расхода}}$$

$$Q_{\text{мазут}} + Q_{\text{воздух}} + Q_{\text{влажа воз.}} + Q_H^P = Q_{\text{пр.сгор.}} + Q_{\text{теплопотери}}$$

$$\sum Q_{\text{прихода}} = 50 + 364,5 + 0,35 + 40601,76 = 41016,6 \text{ кДж}$$

$$\sum Q_{\text{расхода}} = 38313 \text{ кДж}$$

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{теплопотери}} &= \sum Q_{\text{прихода}} - \sum Q_{\text{расхода}} = 41016,6 - 38313 = \\ &= 2703,6 \text{ кДж,} \end{aligned}$$

что составит

$$Q_{\text{теплот}} = \frac{2703,6 \cdot 100}{41016,6} = 6,5\%$$

Таблица 4.6

Тепловой баланс топки от сжигания мазута (1 кг)

Приход	кДж	Расход	кДж
1.Теплосодержание сухого воздуха ($Q_{с.возд.}$)	364,5	1.Теплосодержание продуктов сгорания мазута ($Q_{\text{пр.сгор.}}$), в т.ч.:	38313
2.Теплосодержание влаги воздуха ($Q_{\text{вл.возд.}}$)	0,35	CO ₂	6138
3.Теплосодержание топочного мазута (20°C) ($Q_{\text{мазут}}$)		H ₂ O	3700
4.Теплотворная способность мазута (Q_H^P)	50	SO ₂	17
	40601,76	N ₂	26506
Итого:	41016,6	O ₂	1952
		2.Теплопотери топки ($Q_{\text{потери}}$)	2703,6
		Итого:	41016,6

Как ранее было сказано, на основе теплового баланса решаются задачи по определению расхода греющих и охлаждающих агентов основного и вспомогательного оборудования ХТС. При этом в аппаратах физические и физико-химические процессы идут с выделением избыточного тепла или с его поглощением. Поэтому в задачу входит расчет тепловой нагрузки и расхода теплоносителя или хладагента.

Задача № 14

Определить тепловую нагрузку и расход охлаждающей воды (G) в холодильнике для метилового спирта. Расход (G) метилового спирта через холодильник 10 000 кг/ч, его начальная температура $T_1 = 60^\circ\text{C}$, конечная $T_2 = 30^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость $c = 2680 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$. Начальная температура охлаждающей воды $t_1 = 25^\circ\text{C}$, удельная теплоемкость $c = 4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$.

Решение:

1. Общее уравнение теплового баланса имеет вид:

$$G_{\text{сп}} \cdot c_{\text{сп}} \cdot \Delta T = g_{\text{вода}} \cdot c_{\text{вода}} \cdot \Delta t,$$

откуда можно найти любую неизвестную величину.

2. Определяем количество теплоты, которое необходимо отвести от спирта (тепловую нагрузку):

$$Q = G \cdot c \cdot (T_1 - T_2),$$

$$Q = \frac{10000 \cdot 2680 \cdot (60 - 30)}{3600} = 223000 \text{ Вт}$$

(1 Вт = 3600 Дж/с).

3. Определяем расход охлаждающей воды (g), приняв ее конечную температуру $t_2 = 32^\circ\text{C}$:

$$g = \frac{Q}{c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{223000}{4190 \cdot (32 - 25)} = 7,6 \text{ кг/с} = 27\,400 \text{ кг/ч} = 27,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

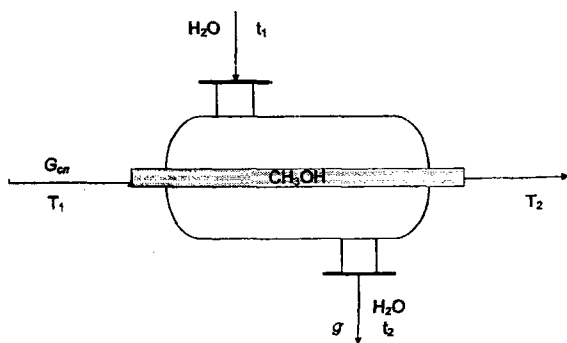


Рис. 4.2. Схема холодильника метанола

Задача № 15

Определить тепловую нагрузку (Q_1) и расход пара (G_2) в подогревателе для 10% NaOH, количество которого (его расход) (G_1) составляет 20 000 кг/ч, начальная температура $t_1 = 85^\circ\text{C}$, а конечная должна стать $t_2 = 120^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость раствора NaOH (c) составляет 3 860 Дж/кг·град. Абсолютное давление греющего пара равно 3 атм. Теплота испарения водяного пара (3 атм) $r = 2170 \cdot 10^3$ Дж/кг.

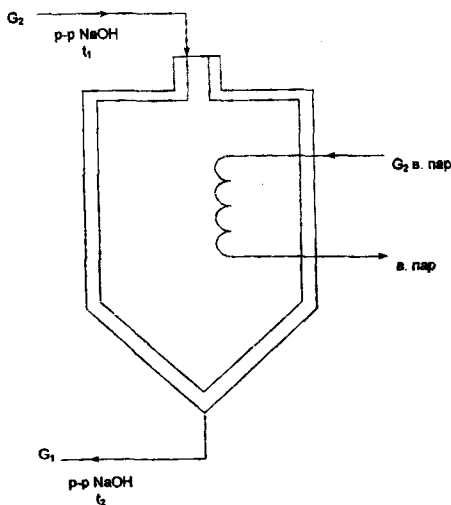


Рис. 4.3. Схема работы подогревателя щелочи

Решение:

1. Уравнение теплового баланса, показывающее, что количество теплоты, отданное водяным паром (Q_2), равно количеству теплоты, воспринятое раствором щелочи (Q_1):

$$Q_1 = G_1 \cdot c \cdot (t_2 - t_1),$$

$$Q_2 = G_2 \cdot r$$

или

$$G_1 \cdot c \cdot (t_2 - t_1) = G_2 \cdot r,$$

откуда расход пара

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{r}.$$

2. Рассчитаем тепловую нагрузку (Q_1):

$$Q_1 = \frac{20000}{3600} \cdot 3860 \cdot (120 - 85) \cong 750000 \text{ Вт},$$

или по количеству теплоты, которое необходимо подвести к щелочи, чтобы на выходе из аппарата ее температура составляла 120°C .

3. Рассчитаем расход греющего пара:

$$G_2 = \frac{750000}{2170 \cdot 10^3} = 0,346 \text{ кг/с} = 1250 \text{ кг/ч}.$$

Задача № 16

Нитрозные газы в количестве $G = 22\ 000$ кг/ч охлаждаются воздухом от температуры $T_1 = 800$ °С. Количество воздуха $g = 19\ 000$ кг/ч, его начальная температура $t_1 = 20$ °С, конечная $t_2 = 350$ °С, удельная теплоемкость $c = 1030$ Дж/кг·град.

Определить тепловую нагрузку и конечную температуру нитрозных газов (T_2). Средняя удельная теплоемкость газов $c_{нз} = 1130$ Дж/кг·град.

Решение:

1. Уравнение теплового баланса воздушного холодильника:

$$Q_{\text{приход}} = Q_{\text{расход}},$$

$$Q_1 = G \cdot c_{нз} \cdot (T_1 - T_2),$$

$$Q_2 = g \cdot c_{\text{возд}} \cdot (t_2 - t_1),$$

откуда

$$T_2 = \frac{g \cdot c_{\text{возд}} \cdot (t_2 - t_1) - G \cdot c_{нз} \cdot T_1}{G \cdot c_{нз}}.$$

2. Рассчитаем тепловую нагрузку (то количество теплоты, которое воспринимает воздух от горячих нитрозных газов):

$$Q_2 = \frac{19000}{3600} \cdot 1030 \cdot (350 - 20) = 1\ 790\ 000 \text{ Вт}.$$

3. Рассчитаем температуру нитрозных газов после охлаждения в холодильнике:

$$T_2 = \frac{1790000 - \left(\frac{22000}{3600} \cdot 1130 \cdot 800 \right)}{22000 \cdot 1130} = 540 \text{ °С}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Сколько выделится тепла при охлаждении 112 м^3 газа состава: 50% об. H_2 ; 16% об. N_2 ; 4% об. CO и 30% об. CO_2 от 400 до 200°C ?

Ответ: $34\,483,7 \text{ кДж}$.

2. Через холодильник проходит 448 м^3 воздуха в час, охлаждаясь в нем от 15° до 17°C . Определить суточный расход воды на охлаждение, если температура ее при входе в холодильник 6°C , при выходе -30°C .

Ответ: $17\,270 \text{ кг}$.

3. Подсчитать теплосодержание 20 м^3 генераторного газа при 1000°C , если состав его, % об.: $\text{H}_2 - 3,8$; $\text{CO}_2 - 33,8$; $\text{N}_2 - 56,5$; $\text{CO} - 4,8$ и $\text{H}_2\text{O} - 1,1$.

Ответ: $28\,911 \text{ кДж}$.

4. Один кг воздуха нагревают при постоянном давлении ($P = 1 \text{ атм}$) от 15° до 150°C .

Определить: а) объем воздуха после нагревания; б) количество подводящей к нему теплоты.

Ответ: а) 1240 л ; б) $136,3 \text{ кДж/кг}$.

5. Сколько требуется затратить тепла для получения 1 м^3 водорода (приведенного к 0°C и 760 мм рт.ст.) из метана крекингом, если реакция протекает при 1227°C ($\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$). Составить материальный и тепловой баланс процесса.

Ответ: $2329,6 \text{ кДж}$.

6. Сколько требуется затратить тепла на 100 м^3 метана (н.у.) при его конверсии с водяным паром до окиси углерода, если процесс идет при 900°C ? Составить материальный и тепловой баланс процесса.

Ответ: $967\,052 \text{ кДж}$.

7. Для образования 1 кг мочевины из жидких CO_2 и NH_3 подсчитать: а) теоретические расходные коэффициенты; б) тепловой эффект образования 1 кг мочевины.

Ответ: а) по $\text{NH}_3 - 0,567 \text{ вес.ч.}$ и по $\text{CO}_2 - 0,733 \text{ вес.ч.}$; б) 3310 кДж .

8. Подсчитать теплотворную способность (Q_p^H) углей следующих составов, % масс.:

а) С – 72; Н₂ – 1,5; О₂ – 1,4; влага – 8; S – 1,1; зола – 16.

б) С – 74; Н₂ – 2,0; О₂ – 1,3; влага – 5; S – 1,0; зола – 16,7.

Ответ: а) 24 721 кДж; б) 25 391 кДж.

9. Сухой коксовый газ имеет состав (по объему): 56% Н₂; 25,5% СН₄; 2,5% тяжелых углеводородов (С_nН_m); 7,0% СО; 2,6% СО₂; 0,7% О₂ и 5,7% N₂.

Подсчитать: а) количество сухого воздуха для полного сгорания этого газа ($\alpha = 1,1$); б) состав продуктов сгорания. Составить материальный и тепловой баланс процесса горения.

Ответ: теоретический расход сухого воздуха составит 425,1 м³, а при его избытке (1,1) 467,6 м³, или 603,6 кг; на 100 м³ сгоревшего газа получается 536 м³ влажных (или 424 м³ сухих) продуктов сгорания следующего состава, %: СО₂ – 9,5; N₂ – 88,4; О₂ – 2,1.

10. Составить тепловой баланс контактного аппарата частичного окисления SO₂, производительность которого 25 000 м³/ч, если состав газовой смеси (в объемных долях) следующий: SO₂ – 0,09; О₂ – 0,11; N₂ – 0,8. Конверсия составляет 88%. Температура входящего газа 733 °К, выходящего – 853 °К. Средняя теплоемкость смеси (принять неизменной) $c = 2,052$ кДж/м³·К. Потери теплоты в окружающую среду – 5% от прихода теплоты. Рассчитать материальный баланс процесса. Рассчитать теплоту, отводимую от аппарата за счет его охлаждения.

Ответ: 1 607 572 кДж.

РАСЧЕТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ИХ ОСНОВЕ

Задачи расчетов производственных процессов разнообразны на различных стадиях жизненного цикла. В данном разделе основное внимание будет уделено решению отдельных задач на основе материального и теплового балансов современных действующих производств неорганического и органического синтезов.

Задача № 1

Составить материальный и тепловой балансы отдельных стадий производства серной кислоты методом мокрого катализа. Производительность установки по целевому продукту 8 000 – 9 000 кг/ч, концентрации от 92,5 до 95% масс.

Исходные данные: сырье – сероводород (H_2S) с расходом 3 041 кг/ч; воздух – 59 987 кг/ч.

Принимаем, что конверсия SO_2 в SO_3 (2-я стадия производства) – 99%; SO_3 полностью переходит в состав кислоты. В состав моногидрата входит практически вся реакционная вода, а влага воздуха уходит с отработанными газами. Данные для расчета теплового баланса приведены в разделе расчета теплового баланса.

Краткое изложение технологического процесса

Первая стадия – получение сернистого ангидрида сжиганием сероводорода в топке котлов-утилизаторов и его охлаждение.

Вторая стадия – окисление сернистого ангидрида в присутствии ванадиевого катализатора в контактном аппарате до серного ангидрида и его охлаждение в котле-утилизаторе.

Третья стадия – конденсация серного ангидрида и паров воды с образованием серной кислоты в холодильнике-конденсаторе.

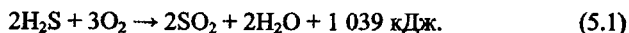
На рис. 1 вклейки приведена упрощенная схема производства серной кислоты и водяного пара, который получают за счет избыточного тепла от сгорания H_2S и (при необходимости) природного топливного газа. Сгорание происходит в топке котла-утилизатора (КУ). Избыточное тепло утилизируется в пароперегревателях П1 и П2. Вторая стадия производства идет в реакторе 4-полочном Р, а конденсация серного ангидрида и паров воды с образованием H_2SO_4 в конденсаторе КН.

В расчете материального баланса не учитываются приходная и расходная части по топливному (природному) газу, сжигаемому в КУ. При

работе по энергетической схеме возможно сжигание только топливного природного газа и производства одного лишь целевого продукта – водяного пара высокого давления.

Первая стадия производства:

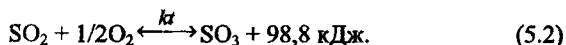
1) химическая реакция:



Реакция горения водорода происходит с выделением значительного количества теплоты, т.е. является необратимой и сильноэкзотермической реакцией.

Вторая стадия производства:

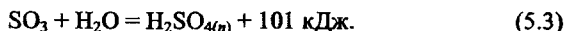
2) химическая реакция стадии контактирования



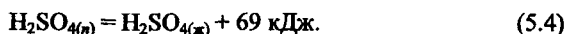
Является экзотермической, обратимой со значительной энергией активации, поэтому в промышленности проводится на катализаторах, расположенных послойно, а также с охлаждением контактного газа по мере конвертирования SO_2 в SO_3 .

Третья стадия предлагаемой технологии является завершающей, т.к. конечным продуктом ее является товарная серная кислота.

3) химическая реакция стадии конденсации



Парообразная серная кислота конденсируется:



Приведенные уравнения химической реакции (5.3) и физического процесса (5.4) отличаются большим выделением тепла.

Решение:

Расчет материального баланса

1. Рассчитаем расход сернистого ангидрида, образующегося в процессе горения 3 041 кг/ч H_2S по реакции (5.1), или

$$V_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{3041 \cdot 22,4}{34} = 2003 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$M_{\text{H}_2\text{S}} = 34; M_{\text{SO}_2} = 64,$$

$$x_{\text{SO}_2} = \frac{3041 \cdot 64}{34} = 5724,2 \text{ кг/ч.}$$

2. Рассчитаем расход образующейся в процессе горения H_2S реакционной воды по реакции (5.1):

$$M_{H_2O} = 18 x_{H_2O} = \frac{3041 \cdot 18}{34} = 1609,94 \text{ кг/ч.}$$

3. Рассчитаем расход образующегося в процессе контактного окисления серного ангидрида по реакции (5.2):

$$M_{SO_3} = 80 x_{SO_3} = \frac{5724,2 \cdot 80}{64} = 7155,25 \text{ кг/ч (при 100\% конверсии) и}$$

при конверсии 99% (по условию)

$$x_{SO_3} = 7155,25 \cdot 0,99 = 7083,69 \text{ кг/ч.}$$

4. Суммарный расход образующихся SO_2 и реакционной воды составляет

$$7083,69 + 1609,94 = 8693,6 \text{ кг/ч.}$$

5. Рассчитаем расход кислорода и воздуха на реакцию (5.1) при н.у.

$$x_{O_2}^1 = \frac{3041 \cdot 1,5 \cdot 32}{34} = 4293,2 \text{ кг/ч,}$$

ИЛИ

$$V_{O_2}^1 = \frac{4293,2 \cdot 22,4}{32} = 3006 \text{ м}^3/\text{ч,}$$

расход воздуха составит

$$V_{возд}^1 = \frac{3006 \cdot 100}{21} = 14314 \text{ м}^3/\text{ч,}$$

ИЛИ

$$x_{возд}^1 = 14314 \cdot 1,29 = 18465,4 \text{ кг/ч.}$$

6. Рассчитаем расход кислорода и воздуха на реакцию (5.2):

$$x_{O_2}^2 = \frac{5724,2 \cdot 16}{64} = 1431,05 \text{ кг/ч,}$$

или с учетом конверсии – 99% SO_2 в SO_3

$$1431,05 \cdot 0,99 = 1417 \text{ кг/ч.}$$

Расход кислорода при н.у. составит

$$V_{O_2}^2 = \frac{1417}{1,428} = 992,2 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Расход сухого воздуха на реакцию (5.2) составит

$$V_{возд}^2 = \frac{992,2 \cdot 100}{21} = 4724,8 \text{ м}^3/\text{ч,}$$

ИЛИ

$$x_{возд}^2 = 4724,8 \cdot 1,29 = 6094,9 \text{ кг/ч.}$$

7. Рассчитаем суммарный расход воздуха по двум химическим реакциям:

$$18465,4 + 6094,9 = 24560,3 \text{ кг/ч или } 14314 + 4724,8 = 19039 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Суммарный расход кислорода по двум химическим реакциям:

$$4293,2 + 1417,05 = 5710,3 \text{ кг/ч или } 3006 + 992,2 = 3998,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

8. По технологическому регламенту производства серной кислоты расход сухого воздуха на 1 и 2 стадии производства составляет 59987 кг/ч, или

$$\frac{59987}{1,29} \cong 46501,6 \text{ м}^3/\text{ч},$$

т.е. величина большая, чем расчетная потребность в воздухе ~ в два с половиной раза.

9. Рассчитаем содержание влаги в составе воздуха, подаваемого на 1 и 2 стадии производства серной кислоты.

Примем следующие показатели по воздуху: $t = 20^\circ\text{C}$; относительная влажность (ϕ) – 50%; $P_{\text{нат}} = 17,535$ мм рт.ст.; $P_{\text{атм}} = 748$ мм рт.ст.

– Концентрация водяных паров в воздухе составляет

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5 \cdot 17,535}{748} = 1,17 \% \text{ об.};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{возд}} \cdot 1,17}{100} \text{ м}^3.$$

– Состав воздуха с влагой, % об.: $\text{N}_2 - 78,08$; $\text{O}_2 - 20,75$; $\text{H}_2\text{O} - 1,17$ ($\Sigma = 100\%$).

– Плотность влажного воздуха:

$$\rho_{\text{вл.возд.}} = 0,7808 \cdot \frac{28}{22,4} + 0,2075 \cdot \frac{32}{22,4} + 0,0117 \cdot \frac{18}{22,4} = 1,2814 \text{ (г/л) (кг/м}^3\text{)}.$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\left(\frac{59987}{1,2814}\right) \cdot 1,17}{100} = 547,7 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 547,7 \cdot \frac{18}{22,4} = 440 \text{ кг/ч}.$$

10. Рассчитаем расход отдельных компонентов в составе воздуха, подаваемого на 1 и 2 стадии производства серной кислоты.

Объемный расход влажного воздуха составляет:

$$\frac{59987}{1,2814} = 46813,6 \text{ м}^3/\text{ч},$$

в т.ч.

$$N_2 - 46813,6 \cdot 0,7808 = 36552 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$O_2 - 46813,6 \cdot 0,2075 = 9713,8 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$H_2O - 46813,6 \cdot 0,0117 = 547,7 \text{ м}^3/\text{ч},$$

или расход массовый составит:

$$N_2 - 36552 \cdot \frac{28}{22,4} = 45690 \text{ кг/ч};$$

$$O_2 - 9713,8 \cdot \frac{32}{22,4} = 13877 \text{ кг/ч};$$

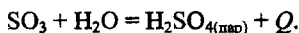
$$H_2O - 547,7 \cdot \frac{18}{22,4} = 440 \text{ кг/ч}.$$

Итого массовый расход влажного воздуха составляет:

$$45690 + 13877 + 440 = 60007 \text{ кг/ч}.$$

11. Рассчитаем расход количества воды, необходимой для получения жидкой H_2SO_4 .

Расчет идет по уравнению (3)



$$M_{SO_3} = 80; M_{H_2SO_4} = 98; M_{H_2O} = 18.$$

$$x_{H_2O} = \frac{7083,7 \cdot 18}{80} = 1594 \text{ кг/ч}.$$

Рассчитаем образующееся при этом количество 100%, безводной (моногидрата) серной кислоты:

$$x_{H_2SO_4} = \frac{7083,7 \cdot 98}{80} = 8678 \text{ кг/ч}.$$

12. Рассчитаем общий расход воды, образующейся в химической реакции (1) и приходящей с воздухом:

$$1609,94 + 440 = 2049,9 \text{ кг/ч}.$$

Таким образом, расчетный излишек воды составляет:

$$2049,9 - 1594 \approx 456 \text{ кг/ч}$$

для получения 100% H_2SO_4 .

13. Рассчитаем расход, образующейся товарной серной кислоты (92 - 95%):

$$x_{H_2SO_4(92\%)} = \frac{8677,5 \cdot 100}{92} = 9432 \text{ кг/ч},$$

$$x_{H_2SO_4(95\%)} = \frac{8677,5 \cdot 100}{95} = 9134 \text{ кг/ч}.$$

Количество воды, необходимое для получения товарной H_2SO_4 :

$$x_{H_2SO_4(92\%)} = 9432 - 8677,5 = 754,5 \text{ кг/ч,}$$

$$x_{H_2SO_4(95\%)} = 9134 - 8677,5 = 456,7 \text{ кг/ч.}$$

Таким образом, концентрация товарной серной кислоты зависит от характеристик используемого сырья и условий технологического процесса.

14. Рассчитаем плотности технологического газа (1), (2) и расход их отдельных компонентов:

– расход образующегося сернистого ангидрида составляет 5724 кг/ч или 2003,4 м³/ч;

– расход кислорода
 $13877 - 4293,2 = 9583,8$ (9584) кг/ч,

или

$$\frac{9584 \cdot 22,4}{32} = 6708,8 \text{ м}^3;$$

– расход азота – 45670 кг/ч,

или

$$\frac{45670 \cdot 22,4}{28} = 36536 \text{ м}^3;$$

– расход водяных паров 2050 кг/ч, в т.ч. – реакционной воды 1610 кг/ч и влаги воздуха – 440 кг/ч.

15. Рассчитаем массовый расход технологического газа (1):

$$\sum \frac{m}{TT} = 5724 + 9584 + 45670 + 2050 = 63028 \text{ кг/ч.}$$

16. Рассчитаем плотности (н.у.) технологического газа (1) и покомпонентный состав:

$$\rho_{ТГ(1)} = \frac{63028}{47799} = 1,3 \text{ кг/м}^3;$$

– расход компонентов технологического газа, н/м³·ч,

$$V_{SO_2} = \frac{5724 \cdot 22,4}{64} = 2003,4,$$

$$V_{O_2} = \frac{9584 \cdot 22,4}{32} = 6708,08,$$

$$V_{N_2} = \frac{45670 \cdot 22,4}{28} = 36536,$$

$$V_{в.паров} = \frac{2050 \cdot 22,4}{18} = 2551,$$

$$\sum V_{ТГ} = 47799 \text{ м}^3.$$

Расчеты материальных потоков сырья и продукта приведены в табл. 5.1.

17. Рассчитываем плотности (н.у.) технологического газа (2) и компонентный состав технологического газа.

- расход SO_3 – 7083,69 кг/ч (см. п. 3);
- расход O_2 : входит O_2 с воздухом – 13877 кг/ч;
расходуется O_2 на химические реакции (1) и (2):
 $4293,2 + 1417 = 5710,2$ кг/ч;
остается O_2 в составе технологического газа (2):
 $13877 - 5710,2 = 8167$ кг/ч;
- расход N_2 – 45670 кг/ч;
- пары воды – 2050 кг/ч;
- расход неконвертированной SO_2 в SO_3 – 57,24 кг/ч.

Общий расход технологического газа (2):

$$\sum m_{TG(2)} = 7083,69 + 8167 + 45670 + 2050 + 57,24 = 63027,9 \approx 63028 \text{ кг/ч.}$$

Плотность технологического газа (2):

$$\rho_{TG(2)} = \frac{63028}{46807,4} = 1,35 \text{ кг/м}^3.$$

Таблица 5.1

Материальный баланс отделения получения сернистого ангидрида (SO_2)

Приход (сырье)	кг/ч	нм ³ /ч	Расход (продукт)	кг/ч	нм ³ /ч
1. Сероводород (H_2S)	3041	2003	1. Технологический газ (1), в т.ч.:	63028	47799
2. Воздух, в т.ч.:	59987	46814	- сернистый ангидрид (SO_2)	5724	2003,4
- азот	45690	36552	- кислород	9584	6708,8
- кислород	13877	9714	- азот	45670	36536
- водяные пары	440	548	- водяные пары, в т.ч.:	2050	2551
			- реакционная вода	1610	
			- пары из воздуха	440	
Итого:	63028	48817	Итого:	63028	47799

18. Рассчитываем объемный состав технологического газа (2), м³/ч:

$$M_{\text{SO}_3} = 80; M_{\text{O}_2} = 32; M_{\text{N}_2} = 28; M_{\text{SO}_2} = 64.$$

$$V_{\text{SO}_3} = \frac{7083 \cdot 22,4}{80} = 1983,2;$$

$$V_{\text{O}_2} = \frac{8167 \cdot 22,4}{32} = 5716,9;$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{58 \cdot 22,4}{64} = 20,3;$$

$$V_{N_2} = \frac{45670 \cdot 22,4}{28} = 36536;$$

$$V_{в.п.} = \frac{2050 \cdot 22,4}{18} = 2551.$$

Суммарный объем технологического газа (2) составляет:

$$1983,2 + 5716,9 + 36536 + 2551 + 20,3 = 46807,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Полученные расчетные данные внесем в табл. 5.2.

Таблица 5.2
Материальный баланс отделения производства серного ангидрида (SO₂)

Приход	кг/ч	м ³ /ч	Расход	кг/ч	м ³ /ч
1. Технологический газ (1), в т.ч.:	63028	47799	1. Технологический газ (2), в т.ч.:	63028	46807,4
- сернистый ангидрид (SO ₂)	5724	2003	- серный ангидрид (SO ₃)	7083,7	1983
- кислород	9584	6708,8	- кислород	8167	5716,9
- азот	45670	36536	- азот	45670	36536
- водяные пары, в т.ч.:	2050	2551	- водяные пары	2050	2551
- реакционная вода	1610		- сернистый ангидрид (SO ₂)	57,3	20,3
- пары воды воздуха	440				
2. Воздух (в составе отделения (1))	-	-			
Итого:	63028	47799	Итого:	63028	46807,4

Таблица 5.3
Материальный баланс отделения конденсации

Приход	кг/ч	м ³ /ч	Расход	кг/ч	м ³ /ч
1. Технологический газ (2), в т.ч.:	63028	46807	1. Моногидрат (безводная серная кислота) 100%	8678	-
- серный ангидрид (SO ₃)	7083	1983	2. Отработанные технологические газы, в т.ч.:	54350	42839,2
- кислород	8167	5716,9	- кислород	8167	5716,9
- азот	45670		- азот	45670	36536,0
- сернистый ангидрид (SO ₂)	58	20,3	- SO ₂	58	20,3
- водяные пары, в т.ч.:	2050	2551	- водяные пары	455	566
- реакционная вода	1610				
- пары воды воздуха	440				
Итого:	63028	46807	Итого:	63028	42839

19. В состав отработанных технологических газов входят все компоненты кроме тех, что участвуют в образовании паров H₂SO₄ и их последующей конденсации.

Рассчитаем объем отдельных компонентов и объемный расход отработанных газов:

$$V_{O_2} = \frac{8167 \cdot 22,4}{32} = 5716,9 \text{ м}^3/\text{ч}; V_{N_2} = \frac{45670 \cdot 22,4}{28} = 36536 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{SO_2} = \frac{58 \cdot 22,4}{64} = 20,3 \text{ м}^3/\text{ч}; V_{\text{в.п.}} = \frac{455 \cdot 22,4}{18} = 566 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Суммарный объем отработанных газов, уходящих в атмосферу, составляет:

$$5716,9 + 36536 + 20,3 + 566 = 42839,5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Концентрация SO_2 в нем составляет 0,047% об.

Необходимо отметить, что в расчетах не учитывались продукты сгорания природного газа, который используется для увеличения энергопотенциала дымовых газов, теплота которых, в свою очередь, используется для производства перегретого пара.

Расчет теплового баланса отдельных стадий производства H_2SO_4

I. Отделение производства сернистого ангидрида.

1. Уравнение (5.1) показывает, что химическая реакция горения H_2S является сильноэкзотермичной, поэтому рассчитаем тепловой эффект по уравнению (5.1).

Справочные данные: теплоты образования участников реакции, ккал/кг-моль:

$$H_2O + 57800; H_2S + 5000; SO_2 + 83000.$$

Используем правило Гесса.

$$Q_{\text{хр}} = (2 \cdot 57800 + 2 \cdot 83000) - 2 \cdot 5000 = 271700 \text{ ккал/кг-моль},$$

или

$$271700 \cdot 4,19 = 1138423 \text{ кДж/кг-моль},$$

или

$$\frac{1138423}{2 \cdot 34} = 16742 \text{ кДж/кг } H_2S.$$

Расчет теплового эффекта можно также провести, используя уравнение Д.И. Менделеева, поскольку H_2S является горючим газом.

Определим доли элементов в брутто-формуле H_2S :

$$H - \frac{2}{34} = 5,88\%; S - \frac{32}{34} = 94,12\%.$$

$$(\Sigma_{\text{э-э}} = 5,88 + 94,12 = 100\%).$$

Рассчитаем тепловой эффект как Q_n^p :

$$Q_n^p = 4,19 \cdot (300 \cdot 5,88 + 26 \cdot 94,12) = 17645 \text{ кДж/кг } H_2S.$$

2. Представим схематично узел установки (котел КУ) (рис. 5.1).

Уравнение теплового баланса топки котла:

$$Q_{H_2S} + Q_{возд.} + Q_{xp} = Q_{тг} + Q_{пот.}$$

3. Принимаем температуру горения H_2S в топке – $1300^\circ C$; температуру H_2S – $20^\circ C$, а температуру воздуха – $700^\circ C$.

Справочные данные: удельная теплоемкость компонентов технологического газа (1-я стадия) при температуре $1300^\circ C$, кДж/кг·гр: SO_2 – 0,807; N_2 – 1,14; O_2 – 1,05 и H_2O – 2,23; при температуре $20^\circ C$ H_2S – 1,01; воздух при $700^\circ C$ – 1,04.

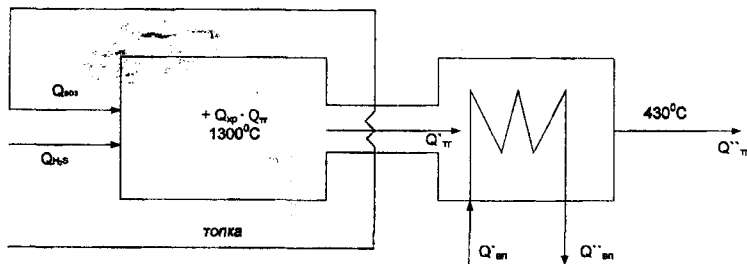


Рис. 5.1. Схема тепловых потоков КУ

4. В соответствии с материальным балансом и уравнением теплового баланса рассчитаем суммарный «приход» теплоты в топку котла.

Q_{H_2S} – теплосодержание сероводорода ($t = 20^\circ C$),

$$3041 \cdot 1,01 \cdot 20 = 61428,2 \text{ (кДж/ч);}$$

$Q_{возд.}$ – теплосодержание воздуха ($t = 700^\circ C$)

$$59987 \cdot 1,04 \cdot 700 = 43670536 \text{ (кДж/ч).}$$

Принимаем тепловой эффект реакции горения H_2S – 16742 кДж, тогда

$$Q_{xp} = 3041 \cdot 16742 = 50906300 \text{ (кДж/ч).}$$

$$\sum_{\text{прих}} Q_{sp} = 61428,2 + 43670536 + 50906300 = 94638264 \text{ кДж/ч.}$$

5. Рассчитаем количество теплоты, уходящей из котла КУ в составе отработанного технологического газа:

$Q_{тг}$ – теплосодержание технологического газа, включающего:

$$- SO_2 - 5724 \cdot 0,807 \cdot 1300 = 6005048,4 \text{ (кДж/ч);}$$

$$- O_2 - 9584 \cdot 1,05 \cdot 1300 = 13082160 \text{ (кДж/ч);}$$

$$- N_2 - 45670 \cdot 1,14 \cdot 1300 = 67682940 \text{ (кДж/ч);}$$

$$- \text{водяной пар} - 2050 \cdot 2,23 \cdot 1300 = 5942950 \text{ (кДж/ч).}$$

$$\sum_{\text{расх}} = 6005048,4 + 13082160 + 67682940 + 5942950 = 92713098 \text{ кДж/ч.}$$

6. Примем и рассчитаем теплопотери ~2% от суммарной теплоты «прихода» $Q_{пот.} = 0,02 \cdot 94638264 = 1892765,2$ кДж/ч.

Расчетные данные приведены в табл. 5.4.

7. Рассчитаем теплосодержание технологического газа на выходе из КУ (430 °С)

$$- SO_2 \quad 5724 \cdot 0,783 \cdot 430 = 1927213,5 \text{ (кДж/ч);}$$

$$- O_2 \quad 9584 \cdot 1,026 \cdot 430 = 4228269,1 \text{ (кДж/ч);}$$

$$- N_2 \quad 45670 \cdot 1,093 \cdot 430 = 21464443 \text{ (кДж/ч);}$$

$$- \text{водяной пар} \quad 2050 \cdot 2,064 \cdot 430 = 1819416 \text{ (кДж/ч).}$$

$$\Sigma = 1927213,5 + 4228269,1 + 21464443 + 1819416 = 29439341 \text{ кДж/ч.}$$

Таблица 5.4

Тепловой баланс отделения получения сернистого ангидрида.

Приход	кДж/ч	Расход	кДж/ч
1. Q_{H_2S}	61428,2	1. $Q_{те}$, в т.ч.:	92713098
2. $Q_{возд.}$	43670536	Q_{SO_2}	6005048,4
3. $Q_{хр}$	50906300	Q_{O_2}	13082160,0
		Q_{N_2}	67682940,0
		$Q_{в.п.}$	5942950
		2. $Q_{пот.}$	1892765,2
Итого:	94638264		94605863
	+32401		-32401

В данной задаче было принято нагревать воздух до 700 °С за счет тепла уходящего технологического газа. Остальное количество теплоты может быть превращено в пар. Зная расход теплоты на нагрев воздуха, подаваемого в котел КУ для сжигания H_2S , а также содержание технологического газа, уходящего из КУ, и энтальпию пара, производимого на этой же установке, можно ориентировочно рассчитать требуемое количество пара с определенными характеристиками. Кроме того, для повышения энергетической составляющей установки по пару на ней предусмотрена подача на сжигание кроме H_2S еще и природного газа (см. рис. 1 вклейки).

8. Примем, что производимый пар имеет температуру 300 °С. Энтальпия его при этом составляет 2710 кДж/кг.

$$G_{пара} = \frac{(94605863 - 43670536 - 29439341) \text{ кДж/ч}}{2710 \text{ кДж/кг}} = 7932,1 \text{ кг/ч,}$$

или с учетом потерь (~2%) теплоты

$$G_{\text{пара}} = \frac{(92713098 - 43670536 - 29439341)}{2710} = 7233,6 \text{ кг/ч.}$$

II. Отделение конденсации.

Аппарат – нестандартный конденсатор, выполненный из вертикально установленных в стальной этажерке стеклянных труб. Трубы у основания входят в стальной поддон.

Технологический газ вводится в трубное пространство конденсатора снизу, а выводится верхом. Противотоком по межтрубному пространству нагнетается воздух из атмосферы (для охлаждения технологического газа).

В конденсаторе развиваются и протекают химическая реакция (5.3) и физический процесс – конденсация H_2SO_4 (5.4) одновременно.

Реакции идут с выделением теплоты. По мере охлаждения и конденсации паров серной кислоты она собирается на стенках стеклянных труб и стекает вниз в поддон, откуда перекачивается в специальную емкость.

Необходимо отметить, что образование паров H_2SO_4 происходит уже на стадии охлаждения технологического газа (см. рис. 1 вклейки), после контактирования в реакторе Р, однако для упрощения расчетов примем, что пары серной кислоты образуются только в конденсаторе.

1. Примем температуру собираемой в конденсаторе H_2SO_4 – 250 °С; температуру воздуха, нагнетаемого в конденсатор, – 30 °С ($P = 7$ кПа), а на выходе – 202 °С.

2. Представим схематично узел установки (конденсатор, КН), тепловой баланс которой необходимо рассчитать (рис. 5.2).

Уравнение теплового баланса конденсатора имеет следующий вид:

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}},$$

$$\text{или } Q_{\text{т.газ}} + Q_{\text{в.охл}} + Q_{\text{хр}} + Q_{\text{тк}} = Q'_{\text{от.т.газ}} + Q'_{\text{в.охл}} + Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} + Q_{\text{пот}}.$$

Таблица 5.5

Теплофизические характеристики отдельных компонентов технологических потоков в конденсаторе

Компонент в составе «входящего» потока	i , кДж/кг	°С	Компонент в составе «выходящего» потока	i , кДж/кг	°С
1. Технологический газ, в т.ч.:		280	3. Технологический газ после конденсации, в т.ч.:		95
SO ₃	207,57		O ₂	90,2	
O ₂	265,6		N ₂	79,1	
N ₂	291,2		SO ₂	59,7	
SO ₂	190,9		водяной пар	178,0	
водяной пар	3035,0		4. Безводная H ₂ SO ₄	379,2	250
2. Воздух охлаждения	30,21	30	5. Воздух охлаждения после контактирования	205,35	

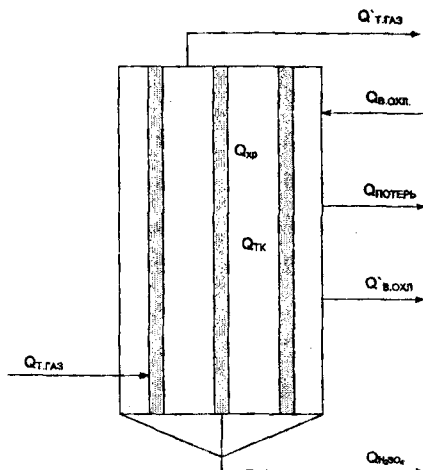


Рис. 5.2. Схема тепловых потоков конденсатора

3. Введем обозначения и рассчитаем теплосодержание входящих и выходящих из конденсатора потоков:

$Q_{т.газ}$ – теплосодержание технологического газа, входящего в конденсатор;

$Q_{в.охл.}$ – теплосодержание воздуха охлаждения;

$Q_{хр}$ – тепловой эффект химической реакции (5.3);

$Q_{тк}$ – тепловой эффект конденсации H_2SO_4 (5.4);

$Q'_{от.газ}$ – теплосодержание отработанного технологического газа, уходящего из конденсатора;

$Q_{H_2SO_4}$ – теплосодержание отводимой из конденсатора безводной серной кислоты;

$Q'_{в.охл.}$ – теплосодержание воздуха охлаждения после конденсатора;

$Q_{потерь}$ – тепло, теряемое на данной стадии, которое примем равным 0.

Рассчитаем теплосодержание всех потоков уравнения теплового баланса:

$$-Q_{тех.г.} = Q_{SO_3} + Q_{O_2} + Q_{N_2} + Q_{SO_2} + Q_{в.п.} \text{ кДж/ч.}$$

$$Q_{SO_3} = 7083 \cdot 207,3 = 1470430,8;$$

$$Q_{O_2} = 8167 \cdot 265,6 = 2169155,2;$$

$$Q_{N_2} = 45670 \cdot 291,2 = 13299560;$$

$$Q_{SO_2} = 58 \cdot 190,9 = 11078;$$

$$Q_{в.п.} = 2050 \cdot 3035 = 6221750.$$

$$-Q_{хр} = 8678 \cdot 1030,61 = 8943633,5 \text{ (кДж/ч)};$$

$$-Q_{тк} = 8678 \cdot 704,08 = 6110006 \text{ (кДж/ч)};$$

$$-Q_{е.ох} = G_{воз} \cdot i_{воз}^{30}, \text{ где } G_{воз} \text{ — неизвестно, а } i_{воз}^{30} = 30,21 \text{ кДж/кг};$$

$$-Q'_{е.ох} = G_{воз} \cdot i_{воз}^{202}, \text{ где } G_{воз} \text{ — неизвестно, а } i_{воз}^{202} = 205,35 \text{ кДж/кг};$$

$$-Q_{от.газ} = Q_{O_2} + Q_{N_2} + Q_{SO_2} + Q_{в.пара} \text{ (кДж/ч)}$$

$$Q_{O_2} = 8167 \cdot 90,2 = 736663,4; \quad Q_{N_2} = 45670 \cdot 79,1 = 3612497;$$

$$Q_{SO_2} = 58 \cdot 59,7 = 3462,6; \quad Q_{в.п.} = 455 \cdot 178,1 = 81035,5.$$

$$Q_{H_2SO_4} = 8678 \cdot 379,2 = 3290697,6.$$

5. Представим данные по тепловому балансу в виде табл. 5.6.

Таблица 5.6

Тепловой баланс конденсатора

Приход	кДж/ч	Расход	кДж/ч
1. Теплосодержание технологического газа ($Q_{т.газ}$), в т.ч.:		1. Теплосодержание целевого продукта H_2SO_4 ($Q_{H_2SO_4}$)	3290697,6
SO ₃	23171974		
O ₂	1470430,8		
N ₂	2169155,2		
SO ₂	13299560		
11078		2. Теплосодержание отработанного технологического газа ($Q_{от.газ}$) в т.ч.:	4433658,5
Водяной пар	6221750	O ₂	736663,4
		N ₂	3612497,0
2. Тепловой эффект образования H ₂ SO ₄ ($Q_{хр}$)	8943633,5	SO ₂	3462,6
		Водяной пар	81035,5
3. Тепловой эффект конденсации паров H ₂ SO ₄ ($Q_{тк}$)	6110006	3. Теплосодержание воздуха охлаждения после конденсатора ($Q'_{е.ох}$)	35762441
4. Теплосодержание воздуха на охлаждение ($Q_{е.ох}$)	5261180,2		
	43486793		43486797

6. Рассчитаем расход воздуха в конденсаторе:

Поскольку $\sum_{\text{теплоты}} \text{прихода} = \sum_{\text{теплоты}} \text{расхода}$, то по балансу

$$23171974 + 8943633,5 + 6110006 + Q_{е.ох} = 3290697,6 + 4433658,5 + Q'_{е.ох},$$

или

$$30501257 = Q'_{в.ох} - Q_{в.ох}; Q_{в.ох} = G_{в.оз} \cdot i_{в.оз},$$

а $G_{в.оз}$ – расход воздуха одинаков, как в «приходе», так и в «расходе», тогда

$$G_{в.оз} = \frac{Q}{(i_{в.оз}^{202} - i_{в.оз}^{30})} = \frac{30501257}{(205,35 - 30,21)} = 174153,6 \text{ кг/ч.}$$

7. С учетом установления расхода воздуха на охлаждение рассчитаем теплосодержание его до и после контактирования в конденсаторе:

$$Q_{в.ох} = G_{в.оз} \cdot i_{20} \text{ и } Q'_{в.ох} = G_{в.оз} \cdot i_{202},$$

или

$$Q_{в.ох} = 174153,6 \cdot 30,21 = 5261180,2 \text{ кДж/ч,}$$

$$Q'_{в.ох} = 174153,6 \cdot 205,35 = 35762441 \text{ кДж/ч.}$$

Задача № 2

Составить материальный и тепловой балансы двухступенчатой конверсии природного газа (паровой риформинг) с производством водородсодержащего газа.

Исходные данные: природный газ (метан, углеводороды, серосодержащие соединения, азот, углекислый газ) – 84,2 тыс. тонн в год.

Определить производительность установки по водороду и побочному продукту – CO_2 ; определить расход пара на процесс парового риформинга и возможность его получения на основе утилизации теплоты отходящих газовых потоков.

Условия технологического процесса:

Первая ступень (паровой риформинг) – никелевый катализатор; в среднем температура – 800°C ($760 - 860^\circ\text{C}$, $P = 3,3 \text{ МПа}$); **вторая ступень** (конверсия CO) – катализатор (FeO и CrO); температура в пределах $340 - 440^\circ\text{C}$, $P = 2 \text{ МПа}$; содержание в природном газе метана $97,5\%$ об.; конверсия CH_4 на первой стадии (паровой риформинг) составляет 95% , на второй стадии конверсия $\text{CO} - 73\%$.

Краткое изложение технологического процесса (рис. 2 вклейки)

Скомпримированный сырьевой (природный) газ смешивается с водородом, далее подогревается в паром в конвекционной части печи, после чего смесь поступает в реактор обессеривания P ($\text{S} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$). Прошедший гидрообессеривание сырьевой газ поступает на очистку в реактор десульфуризации. После чего, очищенный от органических соединений газ поступает в тройник смешения, где смешивается с технологическим паром.

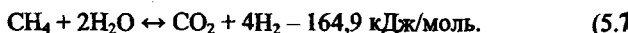
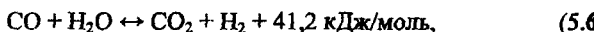
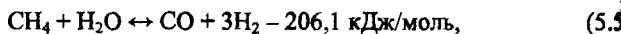
Парогазовая смесь подогревается в змеевиках конвекционной камеры печи до 540°C и поступает в 102 реакционные трубы радиантной камеры печи, где на никелевом катализаторе при температуре $760 - 860^{\circ}\text{C}$ протекает реакция паровой конверсии легких углеводородов (CH_4) в водород H_2 , оксид углерода CO и диоксид углерода CO_2 .

Температура в печи поддерживается за счет сжигания природного газа и воздуха горения. Воздух подогревается до $70 - 120^{\circ}\text{C}$.

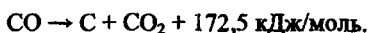
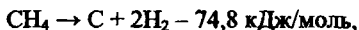
После печи технологический газ (парогазовая смесь) с температурой $800 - 860^{\circ}\text{C}$ и давлением $2,27 \text{ МПа}$ поступает в холодильник T_1 , где охлаждается до $300 - 340^{\circ}\text{C}$ за счет выработки пара высокого давления. Далее технологический газ с температурой $320 - 340^{\circ}\text{C}$ и давлением $2,0 \text{ МПа}$ поступает в высокотемпературный конвертер Kt , где на железо-хромовом катализаторе происходит конверсия окиси углерода. Температура при этом поднимается до 420°C . Далее технологический газ отдает тепло, подогревая паровой конденсат установки, химобессоленную воду T_2 и далее в узел адсорбционной очистки, где выделяется CO_2 и H_2 .

Первая стадия производства (паровой риформинг)

Химические реакции стадии



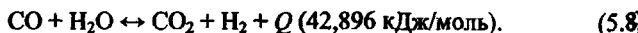
Побочные реакции



При температурах $1100 - 1200 \text{ К}$ уравнение реакции (5.5) и (5.7) сдвинуты вправо, а уравнение (5.6) – влево.

Вторая стадия производства (конверсия CO)

Химическая реакция



Решение:

Расчет материального и теплового баланса процесса парового риформинга

1. Определим суточный расход природного газа:

$$G_{\text{сут}}^{\text{пр.газ}} = \frac{84200}{360 \cdot 24} = 9,745 \text{ т/ч}.$$

2. Определим расход реакционного пара: исходя из уравнений (5.5) и (5.7) (уравнением (5.6) пренебрегаем, т.к. при данной температуре равновесие сдвинуто влево) видно, что на 2 моля CH_4 расходуется 3 моля H_2O и, следовательно, при 100% конверсии расход реакционного пара составит:

$$G_{p.\text{пара}} = \frac{9,745 \cdot 54}{32} = 16,44 \text{ т/ч.}$$

На производстве водяного пара берется, как минимум, в два раза больше стехиометрического количества, т.е. на 1 моль CH_4 приходится 3 моля H_2O , и реальный расход пара составляет:

$$G_{p.\text{пара}} = 16,44 \cdot 2 = 32,88 \text{ т/ч,}$$

или при 95% конверсии CH_4 практический расход водяного пара на химическую реакцию составит:

$$G_{p.\text{пара}} = 16,44 \cdot 0,975 \cdot 0,95 = 15,227 \text{ т/ч.}$$

Избыток водяного пара в технологическом газе составит:

$$G_{\text{в.пара}}^{\text{изб}} = 32,88 - 15,227 = 17,65 \text{ т/ч.}$$

3. Рассчитаем расход водорода, участвующего в реакции.

По уравнениям (5.5) и (5.7) на 2 моля CH_4 приходится 7 молей H_2 (при 100% конверсии CH_4), тогда расход водорода составит:

$$G_{\text{H}_2} = \frac{9,745 \cdot 14}{32} = 4,26 \text{ т/ч.}$$

С учетом содержания CH_4 в природном газе – 97,5% и его фактической конверсии – 95% выход H_2 составит:

$$G_{\text{H}_2\text{факт}} = 4,26 \cdot 0,975 \cdot 0,95 = 3,945 \text{ т/ч.}$$

4. Рассчитаем количества образующихся CO и CO_2 в составе технологического газа.

Т.к. на 1 моль CH_4 по стехиометрии уравнения (5.5) образуется 1 моль CO , а по уравнению (5.7) – 1 моль CO_2 , следовательно, на обе реакции идет равное количество CH_4 .

Общий фактический расход CH_4 по уравнениям (5.5) и (5.7) составит:

$$G_{(\text{CH}_4)\text{факт}} = (9,745 \cdot 0,975) \cdot 0,95 = 9,0259 \text{ т/ч,}$$

из которых на реакцию образования CO и CO_2 пойдет равное количество CH_4 по 4,513 т/ч.

$$G_{\text{CO}} = \frac{4,513 \cdot 28}{16} = 7,8977 \text{ т/ч,}$$

$$G_{\text{CO}_2} = \frac{4,513 \cdot 44}{16} = 12,4108 \text{ т/ч.}$$

5. Определим остаток неконвертированного CH_4 :

$$G_{(\text{CH}_4)_{\text{ост}}} = (9,745 \cdot 0,975) - \{0,95 \cdot (9,745 \cdot 0,975)\} = 0,47505 \text{ т/ч.}$$

6. Рассчитаем плотность и объемы компонентов технологического газа.

Предполагаем, что остальные газы представлены, в основном, азотом. Объемы и масса отдельных компонентов составляют:

$$V_{\text{H}_2} = \frac{3945,0 \cdot 22,4}{2} = 44325,8 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\rho_{\text{H}_2} = \frac{2}{22,4} = 0,089 \text{ кг/нм}^3,$$

$$m_{\text{H}_2} = 44325,8 \cdot 0,089 = 3944,99 \text{ кг/ч.}$$

$$V_{\text{CO}} = \frac{7897,7}{1,25} = 6318,16 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\rho_{\text{CO}} = \frac{28}{22,4} = 1,25 \text{ кг/нм}^3,$$

$$m_{\text{CO}} = 6318,16 \cdot 1,25 = 7897 \text{ кг/ч.}$$

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{475,05}{0,71} = 669,68 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{16}{22,4} = 0,71 \text{ кг/нм}^3,$$

$$m_{\text{CH}_4} = 669,68 \cdot 0,71 = 475,04 \text{ кг/ч.}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{17652,48}{0,8} = 22065,6 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}} = \frac{18}{22,4} = 0,8 \text{ кг/нм}^3,$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 22065,6 \cdot 0,8 = 17652,48 \text{ кг/ч.}$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{12410,75}{1,96} = 6332,0 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{44}{22,4} = 1,96 \text{ кг/нм}^3,$$

$$m_{\text{CO}_2} = 6332,0 \cdot 1,96 = 12410,7 \text{ кг/ч.}$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{244}{1,25} = 195,2 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\rho_{\text{N}_2} = \frac{28}{22,4} = 1,25 \text{ кг/нм}^3$$

$$m_{\text{N}_2} = 195,2 \cdot 1,25 = 243,75 \text{ кг/ч.}$$

Суммарный объем сухого технологического газа (н.у.):

$$\sum V_{\text{сух.т.г.}} = 44325,8 + 6318,16 + 6332,0 + 669,08 + 195,2 = 57840,24 \text{ нм}^3/\text{ч.}$$

Суммарный объем влажного газа:

$$V_{\text{общ}} = 57840,24 + 22065,6 = 79905,84 \text{ нм}^3/\text{ч.}$$

7. Рассчитаем доли компонентов в составе «сухого» и «влажного» технологического газа.

Сухой газ, %об.:

$$V_{\text{H}_2} = \frac{44325,8}{57840,24} \cdot 100 = 76,63,$$

$$V_{\text{CO}} = \frac{6318,16}{57840,24} \cdot 100 = 10,93,$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{6332,0}{57840,24} \cdot 100 = 10,95,$$

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{669,08}{57840,24} \cdot 100 = 1,16,$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{195,2}{57840,24} \cdot 100 = 0,34.$$

Влажный газ, % об.:

$$V_{\text{H}_2} = \frac{44325,8}{79905,84} \cdot 100 = 55,47,$$

$$V_{\text{CO}} = \frac{6318,16}{79905,84} \cdot 100 = 7,92,$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{6332,0}{79905,84} \cdot 100 = 7,94,$$

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{669,08}{79905,84} \cdot 100 = 0,83,$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22065,6}{79710,86} \cdot 100 = 27,6.$$

Расчетные данные заносим в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Материальный баланс процесса углеводородного риформинга

Приход (G)	т/ч	Расход (G)	т/ч	V (н.у.), нм ³ /ч	% об.	
					влаж.	сухой
1. Природный газ, в т.ч.:	9,745	1. Технологич. газ,	24,972	79905,84	—	—
CH ₄	9,501	в т.ч.:	3,9450	44325,8	55,47	76,63
ост. газы	0,244	CO	7,8970	6318,16	7,92	10,93
2. Водяной пар	32,88	CO ₂	12,4107	6332,0	7,94	10,95
		CH ₄	0,475	669,08	0,83	1,16
		ост. газы	0,244	195,20	0,24	0,32
		2. Водяной пар	17,6525	22065,6	27,6	—
Итого:	42,625	Итого:	42,625	79905,84	100	100

Вторая стадия процесса (конверсия CO)

1. Исходя из стехиометрических коэффициентов уравнения реакций приведенного выше (5.8), видно, что на 1 моль CO приходится 1 моль водорода, тогда при 100%-ной конверсии, расход водорода составит:

$$G_{H_2} = \frac{7,897 \cdot 2}{28} = 0,564 \text{ т/ч},$$

при 73%-ной конверсии выход водорода составит:

$$G'_{H_2} = 0,564 \cdot 0,73 = 0,412 \text{ т/ч}$$

При этом остаток неконвертированного СО составит:

$$G_{CO} = 7,897 - (7,897 \cdot 0,73) = 2,132 \text{ т/ч}.$$

2. Рассчитаем количество CO_2 при 100%-ной конверсии:

$$G_{CO_2} = \frac{7,897 \cdot 44}{28} = 12,41 \text{ т/ч},$$

тогда при 73%-ной конверсии:

$$G'_{CO_2} = 12,41 \cdot 0,73 = 9,059 \text{ т/ч}.$$

3. Рассчитаем расход пара, используемого при 100%-ной конверсии СО:

$$G_{H_2O} = \frac{7,897 \cdot 18}{28} = 5,076 \text{ т/ч},$$

при 73%-ной конверсии:

$$G_{H_2O} = 5,076 \cdot 0,73 = 3,705 \text{ т/ч}.$$

Остаток воды в технологическом газе составит:

$$G_{H_2O} = 17,6525 - 3,705 = 13,947 \text{ т/ч}.$$

4. Общее количество компонентов с учетом непрореагировавших N_2 и CH_4 в составе технологического газа:

$$G_{H_2} = 3,945 + 0,412 = 4,357 \text{ т/ч},$$

$$G_{CO} = 7,897 - (7,897 \cdot 0,73) = 2,132 \text{ т/ч},$$

$$G_{CO_2} = 12,41 + 9,059 = 21,469 \text{ т/ч},$$

$$G_{H_2O} = 17,6525 - 3,705 = 13,947 \text{ т/ч},$$

$$G_{CH_4} = 0,475 \text{ т/ч},$$

$$G_{N_2} = 0,244 \text{ т/ч}.$$

5. Рассчитаем составы технологического газа до и после конвертирования СО с учетом плотности компонентов при н.у.

Объемы компонентов ($нм^3/ч$):

$$V_{H_2} = \frac{4356,8}{0,089} = 48952,8,$$

$$V_{CO} = \frac{2132}{1,25} = 1705,6,$$

$$V_{CO_2} = \frac{21469,8}{1,96} = 10953,97,$$

$$V_{CH_4} = \frac{475,05}{0,71} = 669,08,$$

$$V_{N_2} = \frac{244}{1,25} = 195,2,$$

$$V_{H_2O} = \frac{13947}{0,8} = 17433,7.$$

Тогда сумма объемов компонентов сухого технологического газа составит:

$$\sum V_{T.G} = 48952,8 + 1705,6 + 10953,97 + 669,08 + 195,2 = 62476,65 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

А влажного технологического газа будет:

$$V_{\text{Вл.т.г.}} = 62476,65 + 17433,7 = 79910,35 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

Долевой состав сухого технологического газа, % об.:

$$v_{H_2} = \frac{48952,8}{62476,65} \cdot 100 = 78,35,$$

$$v_{CO} = \frac{1705,6}{62476,65} \cdot 100 = 2,73,$$

$$v_{CO_2} = \frac{10953,97}{62476,65} \cdot 100 = 17,53,$$

$$v_{CH_4} = \frac{669,08}{62476,65} \cdot 100 = 1,07,$$

$$v_{N_2} = \frac{195,2}{62476,65} \cdot 100 = 0,31.$$

Долевой состав влажного технологического газа, % об.:

$$v_{H_2} = \frac{48952,8}{79910,35} \cdot 100 = 61,3,$$

$$v_{CO} = \frac{1705,6}{79910,35} \cdot 100 = 2,13,$$

$$v_{CO_2} = \frac{10953,97}{79910,35} \cdot 100 = 13,7,$$

$$v_{CH_4} = \frac{669,08}{79910,35} \cdot 100 = 0,84,$$

$$v_{N_2} = \frac{195,2}{79910,35} \cdot 100 = 0,24,$$

$$v_{H_2O} = \frac{17433,7}{79910,35} \cdot 100 = 21,8.$$

6. Заносим расчетные данные в табл. 5.8.

Материальный баланс процесса конверсии СО

Сырье	Приход		% об.	
	G, т/ч	V (н.у.), нм ³ /ч		
			Влажн.	Сухой
1. Технологический газ, в т.ч.:	24,97	79905,84	—	—
H ₂	3,9450	44325	55,47	76,63
CO	7,8970	6318,16	7,92	10,93
CO ₂	12,4107	6332,0	7,94	10,95
CH ₄	0,475	669,08	0,83	1,16
остальные газы	0,244	198,20	0,24	0,32
2. Водяной пар	17,6525	22065,5	27,6	100
Итого:	42,625	79905,84	100	
Сырье	Расход		% об.	
	G, т/ч	V (н.у.), нм ³ /ч		
			Влажн.	Сухой
1. Технологический газ, в т.ч.:	28,677	62476,65	—	—
H ₂	4,357	48952,8	61,30	78,35
CO	2,132	1705,6	2,13	2,73
CO ₂	21,469	10953,97	13,70	17,53
CH ₄	0,475	669,08	0,84	1,07
остальные газы	0,244	195,2	0,24	0,31
2. Водяной пар	13,947	17433,7	21,8	—
Итого:	42,625	79910,35	100	100

7. Рассчитаем основные годовые показатели производительности технологического процесса:

– производительность по целевому продукту (водород):

$$G_{H_2} = 4,357 \cdot 24 \cdot 360 = 37642 \text{ т/год};$$

– производительность по CO₂

$$G_{CO_2} = 21,469 \cdot 24 \cdot 360 = 185492 \text{ т/год};$$

– расход конденсата в режиме цикла – 13,947 т/ч, следовательно, необходима подпитка водой, при возврате технологического конденсата на первую стадию технологического процесса:

$$G_{H_2O} = 32,88 - 13,947 = 18,933 \text{ т/ч},$$

$$G_{H_2O(\text{год})} = 18,933 \cdot 24 \cdot 360 = 163581 \text{ т/год}.$$

8. Рассчитаем тепловой баланс стадии парового риформинга (рис. 5.3).

Суммарное уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_3 + Q_6 = Q_2 + Q_4 + Q_5.$$

Из уравнения теплового баланса печи риформинга неизвестны следующие значения: Q_3, Q_4, Q_5, Q_6 .

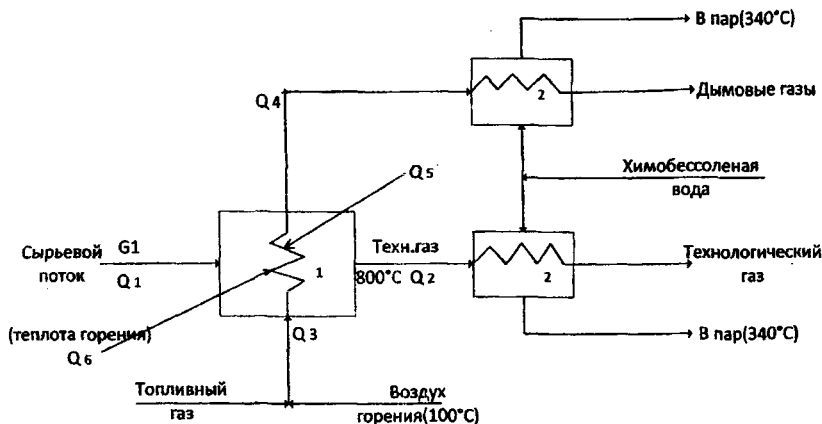


Рис. 5.3. Упрощенная схема тепловых потоков установки парового риформинга:

Q_1 – теплосодержание сырьевого потока (природный газ + водяной пар);
 Q_2 – теплосодержание технологического газа; Q_3 – теплосодержание топливного газа и воздуха горения; Q_4 – теплосодержание топочных газов; Q_5 – теплота, расходуемая на эндотермическую реакцию парового риформинга; Q_6 – теплота горения т.газов горения (теплотворность); Q_n – принимаем тепловые потери – 6% от $Q_{прихода}$

9. Определим тепловой эффект парового риформинга (Q_5).

В соответствии с расходом CH_4 в составе природного газа – 9501 кг/ч и плотности CH_4 (н.у.) – 0,7168, определим объемный расход метана, участвующего в химической реакции риформинга:

$$9501 : 0,7168 = 13254,74 \text{ нм}^3/\text{ч.}$$

Соответственно,

$$Q_5 = \frac{13254,74 \cdot 206200}{22,4} = 122014610 \text{ кДж/ч.}$$

10. Если условно принять, что $Q_3 = Q_4$ (без теплового эффекта горения топлива), то Q_6 (количество теплоты, выделяемое при горении топливного газа) будет равно:

$$Q_6 = Q_2 + Q_5 - Q_1,$$

или представить тепловой баланс в виде табл. 5.13.

11. Рассчитаем теплосодержание сырьевого потока, входящего в трубы с катализатором (печь риформинга),

или

$$59033,4114 + x = 96025,0364 + 122014,610 + 3542,0046,$$

$$(Q_6) \quad x = 221581,68 \text{ МДж/ч} - 59033,4114 \text{ МДж/ч} = 162548,27 \text{ МДж/ч},$$

$$Q_n = 59033,4114 \cdot 0,06 = 3542,0046 \text{ МДж/ч}.$$

Таблица 5.

Энтальпия компонентов сырья

Компонент	$t, ^\circ\text{C}$	$\bar{c}, \text{кДж/кг}\cdot\text{град}$	$i, \text{кДж/кг}$
1. CH ₄	540	$0,95 \cdot 4,19^* = 3,98$	2149,47
2. Остальные газы (примем N ₂)	540	$0,265 \cdot 4,19 = 1,11$	599,59
3. Водяной пар	540	$0,51 \cdot 4,19 = 2,137$	1153,93

* Пересчет \bar{c} ккал/кг·град в кДж/кг·град

Таблица 5.1.

Энтальпия компонентов продуктового потока (технологический газ)

Компонент	$t, ^\circ\text{C}$	$\bar{c}, \text{кДж/кг}\cdot\text{град}$	$i, \text{кДж/кг}$
1. Технологический газ, в т.ч.:			
H ₂	800	$3,61 \cdot 4,19 = 15,126$	12100,7
CO	800	$0,0286 \cdot 4,19 = 0,1198$	95,86
CO ₂	800	$0,298 \cdot 4,19 = 1,2486$	998,89
CH ₄	800	$1,11 \cdot 4,19 = 4,651$	3720,72
Остальные газы (по N ₂)	800	$0,282 \cdot 4,19 = 1,1816$	945,26
2. Водяной пар	800	$0,56 \cdot 4,19 = 2,346$	1877,12

Таблица 5.1.

Теплосодержание парогазовой смеси (сырьевой поток) и технологического газа

Приход, кДж/ч			
Сырьевой поток (парогазовая смесь)	$G, \text{кг/ч}$	$i^{540}, \text{кДж/кг}$	$Q_1, \text{кДж/ч}$
1. Природный газ (CH ₄)	9745	2149,5	20946877
2. Ост. газ природного газа (по N ₂)	244	599,6	146302,4
3. Водяной пар	32880	1153,9	37940232
Итого:	42625		59033411,4
Расход, кДж/ч			
Технологический газ + в.пар	$G, \text{кг/ч}$	$i^{800}, \text{кДж/кг}$	$Q_2, \text{кДж/ч}$
1.			
H ₂	3945	12100,7	47737261
CO	7897	95,86	757006
CO ₂	12410,7	998,89	12396924
CH ₄	475	3720,72	1767342
Ост. газы (по N ₂)	244	945,26	230643,4
2. Водяной пар *	17652,5	1877,12	33135860
Итого:	42625	-	96025036,4

Таблица 5.12

Энтальпия компонентов технологического газа после охлаждения в котле
(производство пара в.д.)

Компонент	$t, ^\circ\text{C}$	$\bar{c}, \text{кДж/кг}\cdot\text{град}$	$i, \text{кДж/кг}$
1. Технологический газ, в т.ч.:			
H ₂	340	$3,475 \cdot 4,19 = 14,56$	4950,4
CO	340	$0,260 \cdot 4,19 = 1,089$	370,26
CO ₂	340	$0,253 \cdot 4,19 = 1,06$	341,9
CH ₄	340	$0,79 \cdot 4,19 = 3,31$	1125,4
ост.газы (по N ₂)	340	$0,260 \cdot 4,19 = 1,089$	367,5
2. Водяной пар	340	$0,48 \cdot 4,19 = 2,011$	683,8

Таблица 5.13

Тепловой баланс печи риформинга

Приход, МДж/ч		Расход, МДж/ч	
1. Теплосодержание сырьевого потока (Q_1)	59033,4114	1. Теплосодержание технологического газа (Q_2)	96025,0364
2. Теплота горения топливного газа (теплотворность) (Q_6)		x	
		3. Потери в окружающую среду (Q_n)	122014,610
			3542

12. Рассчитаем расход топливного газа, зная Q_6 .

Справочные данные: теплотворность метана составляет 890,568 кДж/кг-моль.

Следовательно, расход топливного газа составит:

$$162548,27 : 890,568 = 182,5220 \text{ кг-моль/ч,}$$

или

$$4088,5 \text{ нм}^3 \text{CH}_4/\text{ч, или } 2930,6 \text{ кг/ч.}$$

Таблица 5.14

Расчет теплосодержания технологического газа
после передачи части теплоты на производство водяного пара CO₂
получаемого из CO

Компоненты	G, кг/ч	$i_{340}, \text{кДж/кг}$	$Q, \text{кДж/ч}$
1. Технологический газ + водяной пар, в т.ч.:	3945	4950,4	19529328
H ₂	7897	370,3	2924259,1
CO	12410,7	341,9	4243218,5
CO ₂	475	1125	534375
CH ₄	244	367,5	89670
остальные газы (по N ₂)	17652,5	683,8	12070779
2. Водяной пар			
Итого:			39391629

13. Рассчитаем теоретический расход воздуха исходя из элементарного состава топлива по формуле

$$G = \frac{1}{23} \cdot \left[\frac{32}{12} \cdot C + \frac{16}{2} \cdot H + \frac{32}{32} \cdot (S - O) \right],$$

или

$$G = 0,116C + 0,348H + 0,0435 \cdot (S - O),$$

где С, Н, S, О – процентное содержание элементов в топливе.

$$\text{CH}_4 - 12 + 4 = 16,$$

$$C - \frac{12}{16} = 75\%,$$

$$H - \frac{4}{16} = 25\%.$$

Теоретический расход воздуха на сжигание 1 кг метана составляет:

$$G = 0,116 \cdot 75 + 0,348 \cdot 25 = 8,7 + 8,7 = 17,4 \text{ кг}.$$

Берем воздуха в избытке

$$1,1 \cdot 17,4 = 19,14 \text{ кг на 1 кг топлива (CH}_4\text{)},$$

или $\frac{19,14}{1,293} = 14,8 \text{ нм}^3 \text{ сухого воздуха}.$

На 2930,6 кг/ч CH_4 расход сухого воздуха составит:

$$19,14 \cdot 2930,6 = 56091,7 \text{ кг/ч},$$

или $14,8 \cdot 2930,6 = 43372,9 \text{ нм}^3/\text{ч}.$

14. Суммарный расход топлива и воздуха на вход в топку печи риформинга составит:

$$2930,6 + 56091,7 = 59022,3 \text{ кг/ч},$$

или $4088,5 + 43372,9 = 47461,4 \text{ нм}^3/\text{ч}.$

15. Рассчитаем температуру горения метана в топке по формуле

$$t_{\text{макс}} = \frac{Q_H^P + \bar{c} \cdot t_m + \alpha \cdot G(0,24 + 0,46x) \cdot t_a}{G_1 \cdot c_1 + G_2 \cdot c_2 + \dots},$$

где Q_H^P – низшая теплотворная способность (теплота сгорания) топлива;

\bar{c} – средняя удельная теплоемкость топлива;

t_m – температура горючего топлива;

G – теоретический расход воздуха (кг), расходуемого на 1 кг топлива;

α – коэффициент избытка воздуха;

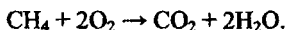
x – влагосодержание воздуха (в кг) на 1 кг сухого воздуха;

t_a – температура воздуха, поступающего на горение;

G_1, G_2 – весовое количество составных частей продуктов сгорания (кг) на 1 кг сгораемого топлива;

\bar{c}_1, \bar{c}_2 – соответственно, средние удельные теплоемкости составных частей продуктов сгорания топлива.

16. Определим массовый состав продуктов сгорания. Примем, что процесс горения идет до конца, т.е.



$$M_{\text{CH}_4} - 16; M_{\text{CO}_2} - 44; M_{\text{H}_2\text{O}} - 18; M_{\text{O}_2} - 32.$$

$$G_{\text{CO}_2} = \frac{2930,6 \cdot 44}{16} = \frac{128946,4}{16} = 8059,15 \text{ кг/ч?}$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2930,6 \cdot 18 \cdot 2}{16} = \frac{105501,6}{16} = 6593,85 \text{ кг/ч.}$$

Ввиду того, что в печь риформинга поступает на сгорание CH_4 горячий воздух ($\sim 100^\circ\text{C}$), то в составе дымовых газов кроме CO_2 и реакционной воды будут присутствовать избыточные кислород и азот. Поэтому рассчитаем количество затраченного на горение метана кислорода:

$$Q_p^x = \frac{2930,6 \cdot 32 \cdot 2}{16} = 11722,4 \text{ кг/ч.}$$

В составе сухого (избыточного) воздуха (56091,7 кг/ч) считаем, что присутствует только два компонента (азот и кислород), или

$$56091,7 \cdot 0,23 = 12901,09 \text{ кгO}_2/\text{ч},$$

$$56091,7 \cdot 0,77 = 43190,61 \text{ кгN}_2/\text{ч}.$$

Из подаваемого в топку воздуха не израсходовано кислорода

$$12901,09 - 11722,4 = 1178,69 \text{ кгO}_2/\text{ч}.$$

Поэтому состав дымовых газов следующий:

азота – 43190,61 кг/ч; кислорода – 1178,69 кг/ч; CO_2 – 8059,15 кг/ч;

реакционных в. паров – 6593,85 кг/ч.

Общий массовый расход дымовых газов:

$$43190,61 + 1178,7 + 8059,15 + 6593,85 = 59322,3 \text{ кг/ч, или } 16,5 \text{ кг/с.}$$

Для расчета $t_{\text{макс}}$ определим удельный расход продуктов сгорания на единицу сжигаемого топлива, кг прод. сгор./кг CH_4 :

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{6593,85}{2930,6} = 2,25,$$

$$G_{\text{CO}_2} = \frac{8059,15}{2930,6} = 2,75,$$

$$G_{\text{N}_2} = \frac{43190,61}{2930,6} = 14,74,$$

$$G_{O_2} = \frac{1178,69}{2930,6} = 0,4022.$$

$$Q_{H(CH_4)}^P = 55535 \text{ кДж/кг.}$$

Справочные данные: $\bar{c}(0 - 100^\circ\text{C})$, кДж/кг·град.: $\bar{c}(H_2O) = 1,87$; $\bar{c}(CO_2) = 0,85$; $\bar{c}(N_2) = 1,035$; $\bar{c}(O_2) = 0,92$.

$$t_{\text{макс}} = \frac{55535 + 2,3 \cdot 20 + 1,1 \cdot 17,4 \cdot 0,21 \cdot 100}{2,25 \cdot 1,87 + 2,75 \cdot 0,85 + 14,74 \cdot 1,035 + 0,40 \cdot 0,92} \approx 2500^\circ\text{C}.$$

Принимаем, что часть теплоты от сгорания природного газа идет на нагрев и эндотермическую химическую реакцию конверсии природного газа, а часть теплоты выносится из печи с дымовыми газами. Поэтому условно принимаем температуру последних порядка 1500°C .

17. С учетом принятого допущения рассчитаем теплосодержание дымовых газов при 1500°C .

Справочные данные, $i_{1500^\circ\text{C}}$, кДж/кг: $i_{H_2O} = 3430,6$; $i_{CO_2} = 1789$; $i_{N_2} = 1736$; $i_{O_2} = 1594,55$.

$$Q_{\text{дым.газов}} = \sum G_i \cdot i_i,$$

или

$$Q_{\text{дым.газов}} = 43190,6 \cdot 1736 + 1178,7 \cdot 1595 + 8059,2 \cdot 1789 + 6593,85 \cdot 3430,6 = 113897,66 \text{ МДж.}$$

18. Рассчитаем количество пара высокого давления, которое можно получить, используя теплосодержание технологического газа и дымовых газов от стадии парового риформинга природного газа. На основании данных, приведенных в табл. 5.11 и 5.14,

$$\Delta Q = 96025036,4 - 39391976 = 56633060 \text{ кДж/ч.}$$

При энтальпии водяного пара ($4,9 - 6 \text{ МПа}$) — $2600 - 2700 \text{ кДж/кг}$ теплосодержание технологического газа обеспечит

$56633060 : 2600 = 21782 \text{ кг/ч}$ водяного пара, или $\sim 523 \text{ т/сутки}$, или $188,2 \text{ тыс.т/год}$.

19. Рассчитаем расход водяного пара, который может быть получен при полной утилизации теплоты дымовых газов установки парового риформинга:

$$113897,7 \text{ МДж/ч} : 2,7 \text{ МДж/кг} = 42184 \text{ кг/ч}$$

$$(42,184 \text{ т/ч, или } 1012423,9 \text{ т/сут}).$$

Очевидно, что количества теплоты технологического газа после парового риформинга достаточно, чтобы получать пар высокого давления, используемого непосредственно в производстве водорода на данной установке.

Теплоты дымовых газов достаточно для обогрева используемого сырья, поступающего на установку, и производства водяного пара, который также является товарным продуктом для других потребителей производства.

Следующий технологический процесс производства водорода – это высокотемпературная конверсия СО, поэтому составим тепловой баланс данной стадии производства на основании матбаланса (табл. 5.8). В табл. 5.14 приведены данные по расчету теплосодержания технологического газа после его охлаждения до 340 °С и перед входом в аппарат конверсии СО в СО₂.

20. Рассчитаем теплосодержание технологического газа после конвертирования СО в высокотемпературном конвертере до СО₂. Примем температуру химической реакции 400 °С.

Таблица 5.15

Расчет теплосодержания технологического газа после конверсии СО.

Компонент	G, кг/ч	i ₄₀₀ , кДж/кг	Q, кДж/ч
H ₂	4357	5832	25410024
СО	2132	440	938080
СО ₂	21469	444	9532236
СН ₄	475	1440	684000
N ₂	244	432	105408
в.пар	13947	840	11715480
Итого:			48385221

21. Реакция конверсии СО в СО₂ является экзотермической, поэтому ее лучшие вести при более низких температурах, хотя активность катализатора уменьшается с понижением температуры.

Расчет теплового эффекта химической реакции в зависимости от температуры проводим по формуле

$$q_{xp} = 10681 - 1,44 \cdot T - 0,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,084 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \text{ (ккал/кг-моль)},$$

при $T = 273 + 400 = 673 \text{ К}$;

$$\begin{aligned} q_{xp} &= 10681 - 1,44 \cdot 673 - 0,4 \cdot 10^{-4} \cdot 673^2 + 0,084 \cdot 10^{-6} \cdot 673^3 = \\ &= 9696,4 \text{ ккал/кг-моль}, \end{aligned}$$

или 40627,9 кДж/кг-моль.

В химической реакции было конвертировано СО

$$6318,16 - 1705,6 = 4612,56 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$\text{или } \frac{4612,56}{22,4} = 205,9 \text{ кг-моль СО/ч.}$$

Тогда тепловой эффект от конверсии CO в CO₂ составит

$$q_{xp}^{CO \rightarrow CO_2} = 205,9 \cdot 40627,9 = 8365287 \text{ кДж/ч.}$$

22. Составим тепловой баланс процесса конверсии CO в CO₂ (табл. 5.16).

Таблица 5.16

Тепловой баланс реактора конверсии CO в CO₂

Приход	кДж/ч	Расход	кДж/ч
1. Теплосодержание технологического газа при 340 °С Q_1	39391629	1. Теплосодержание технологического газа при 400 °С Q_2	48385221
2. Тепловой эффект химической реакции $q_{xp}^{400^\circ C}$	8365287		
Итого:	47756916		48385221 - 628605

По тепловому балансу видно, что в данном случае химическая реакция протекает при температуре менее 400 °С, что благоприятно для развития обратимой реакции в сторону конверсии CO в CO₂.

Задача № 3

Составить материальный и тепловой баланс отдельных стадий производства метилакрилата.

Исходные данные: основное сырье – НАК (нитрил акриловой кислоты), серная кислота (для первой стадии производства), метанол (для второй стадии). Расход НАК – 258,23 кг/ч (99,5%) в растворе. Серная кислота берется в количестве, соответствующем мольному соотношению НАК : H₂SO₄ = 1 : 1,3. Концентрация серной кислоты 84,5% по массе. Конверсия НАК – 100%. Метанол берется в соотношении НАК : CH₃OH = 1 : 4 ± 0,1. В состав акриламида-сырца входит бисульфат аммония в количестве 32,5 кг/ч.

Краткое изложение технологического процесса (рис. 5.4)

Технологический процесс осуществляется в две стадии: первая – гидратация нитрила акриловой кислоты (НАК) в водной среде с серной кислотой с образованием целевого продукта первой стадии – акриламида и побочных продуктов – акриловой кислоты, бисульфата аммония; вторая –

этерификация акриламида метанолом с образованием целевого продукта данной стадии – метилакрилата и побочных продуктов – бисульфата аммония, диметилового эфира и других соединений.

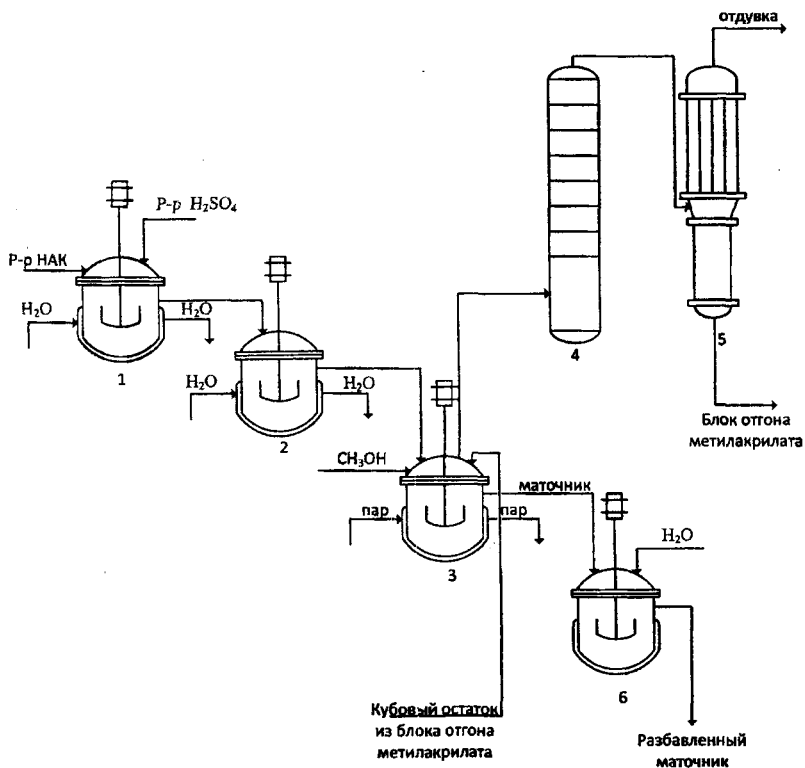


Рис. 5.4. Схема участка синтеза и отгона метилакрилата-сырца:

1, 2 – реакторы амидации; 3 – реактор этерификации; 4 – колонна отгона метилакрилата и летучих соединений; 5 – конденсатор; 6 – емкость для разбавления маточника

Первая стадия осуществляется в реакторе смешения 1 с мешалкой и змеевиком для охлаждения. Сюда непрерывно подаются НАК и раствор серной кислоты. Процесс идет при поддержании в аппарате температуры 90 – 100 °С.

Процесс амидации (гидратации) завершается в следующем аппарате 2 – дозревателе, где реакционная масса перемешивается и охлаждается водой (в рубашке дозревателя).

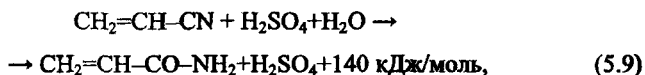
Вторая стадия (этерификация) проходит в реакторе 3 с мешалкой, в который акриламид-сырец поступает самотеком из дозревателя 2. В реактор 3 насосом непрерывно подается метанол. Образующийся эфир – метилакрилат совместно с легколетучими соединениями отгоняется из реактора 3 из реакционной массы, которая подогревается до 136 ± 6 °С водяным паром, подаваемым в рубашку реактора 3. Кроме метанола в реактор на этерификацию подается отгон стадии регенерации хлористого кальция (осушение целевого продукта) и остаток колонны из К-3, где осуществляется отгонка товарного метилакрилата. Маточный раствор из 3 непрерывно перетекает в смеситель 4, где смешивается с водой и выводится из производства. Метилакрилат непрерывно отгоняется из реакционной массы и в колонне К-1 4 отделяется от высококипящих примесей. Низ К-1 – не более 130 °С, верх – 80 ± 5 °С. Уходящие верхом пары метилакрилата охлаждаются в конденсаторах 5 и конденсируются метанольной водой. Далее следует процесс выделения метилакрилата, который включает стадии сушки метилакрилата-сырца и регенерации отработанного на осушении раствора хлористого кальция; стадии перегонки метилакрилата-сырца и его стабилизации.

В данном случае будут рассмотрены только первая и вторая стадии синтеза метилакрилата-сырца.

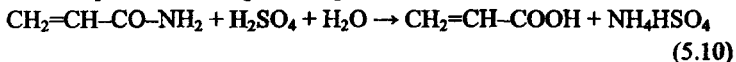
Первая стадия

Химические реакции:

основная реакция – гидратация нитрила акриловой кислоты (НАК):

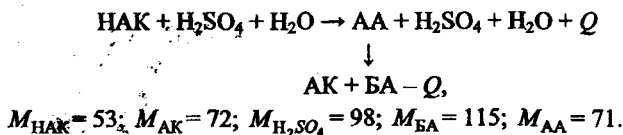


побочные реакции – гидролиз акриламида:



с образованием акриловой кислоты и бисульфата аммония.

Схема превращения НАК:



Решение:

1. Рассчитаем расход сырья – НАК и H_2SO_4 .

Водный раствор НАК включает:

$$\text{НАК} \quad 258,23 \cdot 0,995 = 256,938 \approx 257 \text{ кг/ч,}$$

$$H_2O \quad 258,23 - 257 = 1,29 \text{ кг/ч.}$$

2. Расход H_2SO_4 . По условию H_2SO_4 берется к НАК = 1,3:1,0, т.е. на взаимодействие H_2SO_4 по уравнению (5.9) с НАК ее расход составит

$$\frac{257 \cdot 98}{53} = 475,2 \text{ кг/ч,}$$

но часть H_2SO_4 расходуется на побочную реакцию взаимодействия акриламида с H_2SO_4 :

$$\frac{32,5 \cdot 98}{115} = 27,69 \text{ кг/ч.}$$

Таким образом, общий расход H_2SO_4 составляет:

$$475,2 + 27,69 = 502,89 \text{ кг/ч.}$$

При 30%-ном избытке, ее расход составит:

$$502,89 \cdot 0,3 + 502,89 = 653,75 \text{ кг/ч.}$$

При этом, с учетом ее содержания (84,5%) в водном растворе, расход сырьевой H_2SO_4 составит:

$$x_{H_2SO_4} = \frac{653,75 \cdot 100}{84,5} = 773,67 \text{ кг/ч,}$$

в т.ч. в растворе H_2SO_4 имеется

$$773,67 - 653,75 = 119,9 \text{ кг/ч воды.}$$

3. Рассчитаем расход АА из 257 кг/ч НАК:

$$x_{AA}^1 = \frac{257 \cdot 71}{53} = 344,28 \text{ кг/ч.}$$

4. Рассчитаем расход АА (побочная реакция) на получение 32,5 кг/ч бисульфата аммония:

$$x_{AA}^2 = \frac{32,5 \cdot 71}{115} = 20,06 \text{ кг/ч.}$$

5. Рассчитаем расход АА в составе целевого продукта данной стадии. Поскольку всего из НАК образовалось 344,28 кг/ч, а на побочную реакцию было израсходовано 20,06 кг/ч АА, то в целевом продукте акриламид-сырец АА составит

$$344,28 - 20,06 = 324,22 \text{ кг/ч.}$$

6. Рассчитаем расход АК в побочной реакции:

$$x_{AK} = \frac{20,06 \cdot 72}{71} = 20,34 \text{ кг/ч.}$$

Это количество АК входит с бисульфатом аммония в состав целевого продукта первой стадии – акриламид-сырца.

7. Определим расход воды на основную химическую реакцию (5.9):

$$x_{H_2O} = \frac{257 \cdot 18}{53} = 87,28 \text{ кг/ч.}$$

8. Определим расход воды на побочную химическую реакцию (5.10):

$$x_{H_2O} = \frac{20,06 \cdot 18}{71} = 5,08 \text{ кг/ч.}$$

9. Количественный расход воды в ставе акриламида-сырца составит: $(119,9 + 1,23) - (87,28 + 5,08) = 28,87 \text{ кг/ч.}$

10. Определим остаток H_2SO_4 в составе акриламида-сырца: $653,75 - 27,6 = 626,1 \text{ кг/ч.}$

Полученные расчетные данные сведем в табл. 5.17 материального баланса.

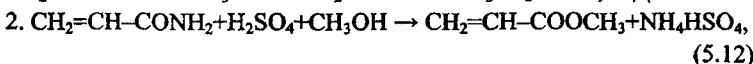
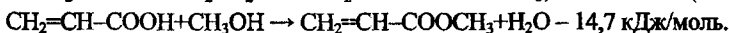
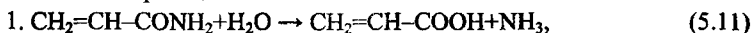
Таблица 5.17

Материальный баланс первой стадии (гидратация) производства метилакрилата

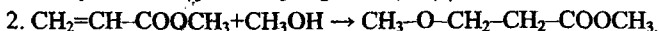
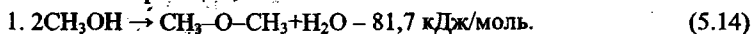
Приход	кг/ч	Расход	кг/ч
1. НАК, в т.ч.:	258,23	1. Акриламид-сырец, в т.ч.:	1032
– НАК	257,00	– H_2O	28,87
– H_2O	1,23	– H_2SO_4	626,10
2. H_2SO_4 , в т.ч.:	773,66	– АА	324,22
– H_2SO_4	653,7	– АК	20,34
– H_2O	119,9	– бисульфат аммония	32,50
Итого:	1032		1032

**Вторая стадия производства метилакрилата –
этерификация акриламида метанолом**

Химические реакции основные:



Химические реакции побочные:



Принимаем: конверсия акриламида – 88,9% – 89%; конверсия акриловой кислоты – 48 – 49%. Раствор CH_3OH содержит чистого метанола –

99,9% масс.; кубовый остаток содержит МА и АК в количестве, приведенном в таблице материального баланса второй стадии.

Решение:

1. Рассчитаем количество конвертированного акриламида (АА):

$$324,22 \cdot 0,888 = 287,9 \text{ кг/ч,}$$

соответственно осталось неконвертированного АА:

$$324,22 - 287,9 = 36,32 \text{ кг/ч.}$$

2. Рассчитаем количество конвертированного АК:

$$20,34 \cdot 0,485 = 2,8639 \text{ кг/ч,}$$

$$36,2 \cdot 0,485 = 17,557 \text{ кг/ч,}$$

т.е. всего

$$9,864 + 17,557 = 27,42 \text{ кг/ч,}$$

а осталось

$$(36,2 + 20,34) - 27,42 = 29,12 \text{ кг/ч.}$$

3. Рассчитаем количество МА из АА:

$$x_{МА} = \frac{287,9 \cdot 86}{71} = 348,72 \text{ кг/ч.}$$

4. Рассчитаем количество МА из АК:

$$x_{МА} = \frac{27,42 \cdot 86}{72} = 32,75 \text{ кг/ч.}$$

5. Суммарное количество образовавшегося МА составляет

$$348,72 + 32,75 = 381,47 \text{ кг/ч.}$$

Дополнительно в процесс был возвращен полупродукт – кубовый остаток отгонной колонны, содержащий МА и АК. Соответственно, общее количество МА составит в сумме:

$$381,47 + 91,4 = 472,87 \text{ кг/ч.}$$

Большая часть МА (99,3%) войдет в состав целевого продукта второй стадии:

$$472,87 \cdot 0,993 = 469,7 \text{ кг/ч,}$$

а оставшаяся часть – 0,7% распределится (допустим) следующим образом – 0,5% МА от расхода в составе маточника (2,36), а остальное (0,95) – в составе отдувки.

6. Рассчитаем расход NH_4HSO_4 (БА), в составе маточника:

$$x_{БА} = \frac{287,9 \cdot 115}{71} = 466,32 \text{ кг/ч,}$$

и дополнительное количество БА пришло на синтез МА в составе
АА-сырца – 32,5 кг/ч,

т.е. всего в маточнике:

$$466,32 + 32,5 = 498,82 \text{ кг/ч.}$$

7. Определим затраты H_2SO_4 на этерификацию:

$$x_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{287,9 \cdot 98}{71} = 397,38 \text{ кг/ч,}$$

а пришли в процесс с акриламидом-сырцом – 626,1 кг/ч, т.е. H_2SO_4 конвертировалось от «прихода»:

$$x = \frac{397,38}{626,1} = 0,635 \text{ (63,5\%),}$$

осталось H_2SO_4 в составе жидкой фракции – маточника:

$$626,1 - 397,38 = 228,72 \text{ кг/ч.}$$

8. Рассчитаем затраты CH_3OH на синтез МА:

$$x_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{381,47 \cdot 32}{86} = 141,94 \text{ кг/ч.}$$

9. Рассчитаем расход CH_3OH на синтез ДЭ ($M_{\text{CH}_3-\text{O}-\text{CH}_3} = 46$), образующегося в побочных реакциях (вводим допущение о количестве ДЭ ~35,9 кг/ч, в т.ч.: в отдувке – 23,5; маточник – 9,3 и МА-сырец – 3,1):

$$x_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{35,9 \cdot 32}{46} = 24,97 \text{ кг/ч.}$$

10. Рассчитаем количество образующейся реакционной воды из АК:

$$x_{\text{реак. H}_2\text{O}} = \frac{27,42 \cdot 18}{72} = 6,855 \text{ кг/ч.}$$

Из CH_3OH при побочной реакции и получении диэтилового эфира

$$x_{\text{реак. H}_2\text{O}} = \frac{24,97 \cdot 18}{64} = 7,023 \text{ кг/ч.}$$

Общее количество образующейся реакционной воды:

$$6,855 + 7,023 = 13,878 \text{ кг/ч.}$$

11. Расчет «примесей» рассчитаем по дебалансу:

$$1390,8 - 1377,42 = 13,38 \text{ кг/ч.}$$

Результаты расчета представлены в табл. 5.18.

Обращаем внимание, что маточник состоит, в основном, из H_2SO_4 и бисульфата аммония (~ 87% масс.)

Таблица 5.18

Материальный баланс стадии этерификации

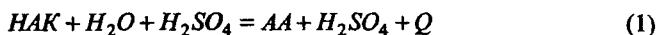
Приход	кг/ч	Расход	кг/ч
1. Акрил-амид сырец, в т.ч.:	1032	1. Метилакрилат – сырец, в т.ч.:	520,52
- H ₂ O	28,87	- H ₂ O	3,8
- H ₂ SO ₄	626,10	- CH ₃ OH	20,4
AA	324,22	MA	469,7
AK	20,34	AK	23,52
- БА	32,50	- ДЭ	3,1
2. Метанол, в т.ч.:	228,8	2. Маточник, в т.ч.:	839,43
- H ₂ O	0,2	- H ₂ O	10
- CH ₃ OH	228,6	- H ₂ SO ₄	228,72
		- CH ₃ OH	34,89
		- AA	36,32
		- MA	2,4
		- ДЭ	9,3
		- AK	5,6
		- БА	498,82
		- примеси	13,38
			(менее 1%)
3. Кубовый продукт, в т.ч.:	130	3. Отдувки, в т.ч.:	30,85
- H ₂ O	0,4	- CH ₃ OH	6,4
- CH ₃ OH	0,08	- MA	0,95
- MA	91,4	- ДЭ	23,5
- AK	36,2		
- примеси	1,92		
Итого:	1390,8	Итого:	1390,8

Тепловой баланс гидратации (амидации) производства метилакрилата

В аппарате (амидатор) (рис. 5.5) идет экзотермическая реакция, температура реакционной смеси поддерживается в пределах 90 – 110 °С за счет охлаждения водой водооборотной системы.

Исходные данные: расход сырья и продуктовой смеси (см. табл. 5.17); температура НАК = +2 °С; H₂SO₄ = 39 – 40 °С; теплоемкость (кДж/кгС⁰) раствора H₂SO₄ (~85%) при $t_{\text{ср}} = 40$ °С – 1,765; при $t_{\text{выс}} = 100$ °С – 1,945; $C_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 4,229$; $C_{\text{H}_2\text{O}}^{100^0} = 4,229$; $C_{\text{НАК}} = 2,09$; $C_{\text{МА}} = 2,01$; $C_{\text{АА}} = 2,01$; $C_{\text{NH}_4\text{HSO}_4} = ?$

При расчете теплового эффекта принимается во внимание: 1) химическая реакция образования акриламида:



(тепловой эффект – 130 – 150 кДж/моль)

и 2) химическая реакция гидролиза АА:



(тепловой эффект – 327,4 кДж/моль).

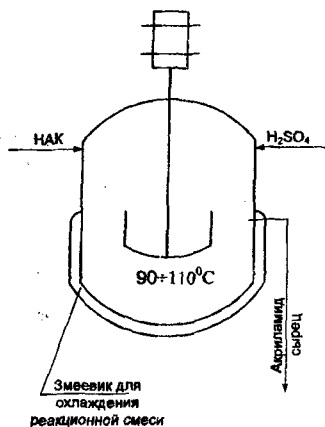


Рис. 5.5. Схема функционирования реактора смешения – амидатора

Решение:

1. Уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{НАК}} + Q_{\text{p-p } H_2SO_4} + Q_{xp}^1 + Q_{xв}^1 = Q_{AA_c} + Q_{xp}^2 + Q_{xв}^2,$$

где $Q_{\text{НАК}}$ – теплосодержание раствора НАК;

$Q_{\text{p-p } H_2SO_4}$ – теплосодержание серной кислоты;

Q_{AA_c} – теплосодержание реакционной смеси акриламида-сырца;

Q_{xp}^1 – тепло экзотермической реакции;

Q_{xp}^2 – тепло эндотермической реакции;

$Q_{xв}^1, Q_{xв}^2$ – теплосодержание входящей и уходящей из рубашки оборотной воды.

2. Рассчитаем теплосодержание сырьевых потоков, поступающих в химический реактор:

$$- Q_{\text{НАК}} = G \cdot c \cdot t = 257 \cdot 2,09 \cdot 2 + 1,23 \cdot 4,229 \cdot 2 = 1084,66 \text{ кДж/ч};$$

$$- Q_{\text{p-p } H_2SO_4} = 773,66 \cdot 1,765 \cdot 40 = 54620,4 \text{ кДж/ч}.$$

3. Рассчитаем теплосодержание продуктового потока, выходящего из амидатора:

$$Q_{AA_2} = 28,87 \cdot 4,229 \cdot 100 + 626,10 \cdot 1,945 \cdot 100 + 324,22 \cdot 2,01 \cdot 100 + 20,34 \cdot 2,09 \cdot 100 + +32,50 \cdot 1,3936 \cdot 100 = 207933,9 \text{ кДж/ч.}$$

* при этом рассчитаем удельную теплоемкость соли – бисульфата аммония: удельная теплоемкость входящих в нее элементов составляет, ккал/кг-моль: N – 5,0; H – 2,4; O – 4,0; S – 5,4, соответственно $C_{NH_4HSO_4} = 5 \cdot 1 + 2,4 \cdot 5 + 5,4 + 4,0 \cdot 4 = 38,4$ ккал/кг, или 1,3936 кДж/кг.

4. Рассчитаем тепловой эффект экзотермической реакции амидации при условии, что $x_{НАК} = 100\%$ и $q_{xp}^1 = 140$ кДж/моль:

$$257 : 53 = 4,849 \text{ кг-моль/ч (4849 г-моль/ч),}$$

тогда

$$q_{xp}^1 = 4849 \cdot 140 = 678867,92 \text{ кДж/ч.}$$

5. Рассчитаем тепловой эффект эндотермической реакции гидролиза акриламида (2) $q_{xp}^2 = 327,4$ кДж/моль:

$$20,6 : 71 = 0,29 \text{ кг-моль/ч (290 г-моль/ч),}$$

тогда

$$q_{xp}^2 = 290 \cdot 327,4 = -94946 \text{ кДж/ч.}$$

6. Рассчитаем количество теплоты, которое необходимо снять, чтобы удержать в химреакторе температуру реакционной смеси $\sim 100^\circ\text{C}$:

$$Q_{xp} = Q_{НАК} + Q_{p-p \text{ H}_2\text{SO}_4} + Q_{xp}^1 - Q_{AA_2} - Q_{xp}^2,$$

или

$$Q_{xs} = 54620,4 + 1084,66 + 678867,92 - 207933,9 - 94946 = 431693,08 \text{ кДж/ч.}$$

7. Рассчитаем расход охлаждающей воды для снятия избытка теплоты.

Примем, что температура охлаждающей (оборотной) воды $+20^\circ\text{C}$, выходящей из змеевика химреактора $+30^\circ\text{C}$, тогда

$$G_w = \frac{Q_{xp}}{c \cdot \Delta t} = \frac{431693,08}{4,18 \cdot (30 - 20)} = 10327,5 \text{ кг/ч,}$$

если примем, что вода нагревается в рубашке до 50°C , тогда

$$G_w = \frac{431693,08}{4,18 \cdot (50 - 20)} = \frac{431693,08}{125,4} = 3442,5 \text{ кг/ч,}$$

таким образом можно с одной стороны уменьшить расход оборотной воды на охлаждение и дополнительно получить горячую воду, которую можно использовать на производство водяного пара для обогрева в реакторе этерификации данного производства.

Задача № 4

Рассчитать материальный и тепловой баланс стадии нейтрализации кислых сточных вод (жидкий отход акрилатного производства при производстве минерального удобрения сульфата аммония).

Исходные данные:

1) сырье:

– кислые сточные воды акрилатного производства после разбавления их водой (маточник с расходом 5098 кг/ч; состав маточника, % масс.: H_2SO_4 – 8,45; бисульфат аммония – 31,5; метанол и другие органические примеси – 4,67; остальное – вода);

– газообразный аммиак для нейтрализации кислых сточных вод;

– рециркулят (фильтрат/фугат стадии разделения суспензии после выпарки) – расходом 20000 кг/ч. Состав, % масс.: сульфат аммония – 35; органика – 2,99; остальное – вода;

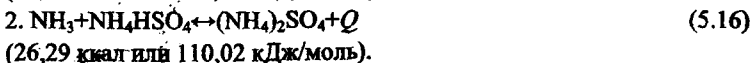
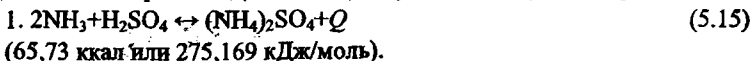
2) отход стадии нейтрализации – шлам, расход – 213 кг/ч, состав, % масс.: органические соединения – 91,5; остальное – вода.

РН среды 4,5 – 5,0 ед. РН; давление – близкое к атмосферному.

Краткое изложение технологического процесса

Жидкие отходы производства метилакрилата (маточник) (рис. 5.6), разбавленные водой, поступают на стадию нейтрализации, где кислые сточные воды нейтрализуются газообразным аммиаком, поступающим в жидкость через барботеры. Туда же (рис. 5.7) поступает рециркулят (стадия разделения суспензии). Нейтрализованный раствор перекачивается на стадию выпарки и последующую вакуум-кристаллизацию, где выпаривается вода и идет формирование кристаллов сульфата аммония, а затем сконцентрированный по сульфату аммония раствор (пульпа) поступает на осветление и разделение суспензии (центрифугирование). Фугат маточного раствора частично возвращается на нейтрализацию и частично сжигается. Разделенные кристаллы СА сушатся и упаковываются в полиэтиленовые мешки.

Химические реакции (основные), идущие в нейтрализаторе:



Процессы по уравнениям химических реакций экзотермические.

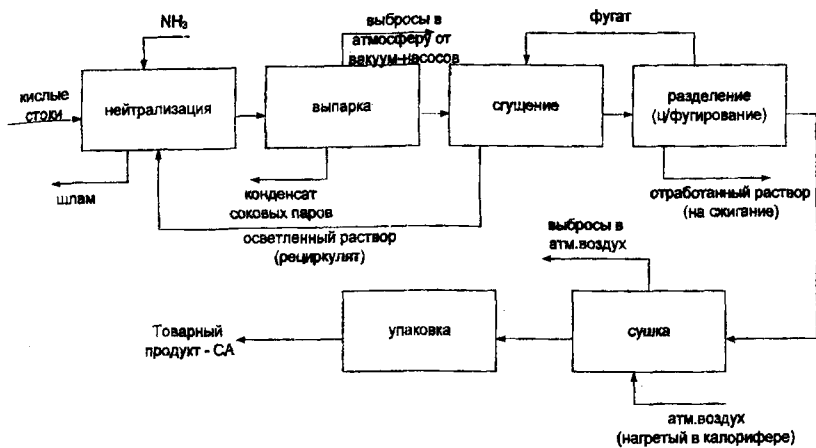


Рис. 5.6 Схема материальных потоков и стадий производства сульфата аммония (СА)

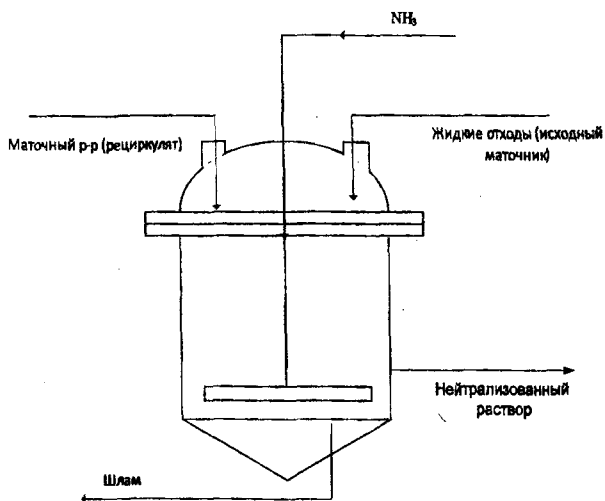


Рис. 5.7. Схема нейтрализатора с технологическими потоками

Кроме основных реакций идут параллельные реакции. Например, нейтрализация метил и диметилсерных кислот, при этом также образуется сульфат аммония. Этими реакциями при расчетах пренебрегаем.

Решение:

1. Рассчитаем массовый расход сырьевых потоков, в частности маточника, кг/ч:



$$5098 \cdot 0,0845 = 431,$$

органические примеси

$$5098 \cdot 0,04668 = 238;$$

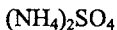


$$5098 \cdot 0,315 = 1606,$$

вода

$$5098 - 431 - 1606 - 238 = 2823.$$

2. Рассчитаем массовый расход рециркулята, кг/ч:



$$20000 \cdot 0,35 = 6999,9,$$

вода – 12400,2,

органические примеси

$$20000 \cdot 0,0299 = 599,9.$$

3. Рассчитаем массовый расход отхода стадии нейтрализации, шлама, кг/ч: органические соединения

$$213 \cdot 0,915 = 195,$$

вода

$$213 - 195 = 18.$$

4. Рассчитаем массовый расход и состав нейтрального раствора (без учета рецикла):

– определим количество образующегося $(NH_4)_2SO_4$ по реакции нейтрализации (5.15):

$$x_{CA} = \frac{431 \cdot 132}{98} = 580,53 \text{ кг/ч},$$

$$M_{H_2SO_4} = 98,$$

$$M_{(NH_4)_2SO_4} = 132;$$

по реакции (5.16):

$$x_{CA} = \frac{1606 \cdot 132}{115} = 1843,4 \text{ кг/ч},$$

$$M_{NH_4HSO_4} = 115.$$

Суммарное количество образующегося СА:

$$580,53 + 1843,4 = 2423,93 \text{ кг/ч}.$$

5. Расход органического вещества в составе нейтрального раствора (по дебалансу)

$$238 - 195 = 43 \text{ кг/ч,}$$

воды

$$2823 - 18 = 2805 \text{ кг/ч.}$$

6. Расход нейтрального раствора с учетом рецикла:

$$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 2423,93 + 6999,9 = 9423,83 \text{ кг/ч,}$$

органика

$$43 + 599,9 = 642,9 \text{ кг/ч,}$$

вода

$$2805 + 12400 \cdot 2 = 15205,2 \text{ кг/ч.}$$

7. Рассчитаем необходимый для нейтрализации кислых сточных вод расход аммиака по уравнению (5.15):

$$x_{\text{NH}_3}^1 = \frac{34 \cdot 580,53}{132} = 149,53 \text{ кг/ч;}$$

по уравнению (5.16):

$$x_{\text{NH}_3}^2 = \frac{17 \cdot 1843,4}{132} = 237,4 \text{ кг/ч.}$$

Суммарный расход аммиака на нейтрализацию:

$$\sum_{\text{NH}_3} = 149,53 + 237,4 = 386,94 \text{ кг/ч.}$$

8. Материальный баланс процесса представлен в табл. 5.19.

9. На основании материального баланса рассчитаем тепловой баланс процесса нейтрализации. В табл. 5.20 представлены теплофизические данные, используемые в расчетах.

Таблица 5.19

Материальный баланс процесса нейтрализации

Приход	кг/ч	% масс.	Расход	кг/ч	% масс.
1. Маточный раствор, в т.ч.:	5098,6		1. Нейтральный рас- твор, в т.ч.:	25271,94	
– H ₂ SO ₄	431	8,45	– (NH ₄) ₂ SO ₄	9423,83	37,28
– NH ₄ HSO ₄	1606	31,5	– орг.соединения	642,91	2,5
– орг.примеси	238	4,67	– H ₂ O	15205,2	60,16
– H ₂ O	2823	55,37			
2. Аммиак	386,94				
3. Рециркулят, в т.ч.:	20000		2. Шлам, в т.ч.:	213	
(NH ₄) ₂ SO ₄	6999,9	35	орг.соединения	195	91,54
– орг.соединения	599,9	2,99	– H ₂ O	18	8,46
– H ₂ O	12400,2	62			

Итого:	25484,94	Итого:	25484,94
--------	----------	--------	----------

Таблица 5.20

Удельная теплоемкость соединений.

№ п/п	Соединение	Удельная теплоемкость, кДж/кг·град	№ п/п	Соединение	Удельная теплоемкость, кДж/кг·град
1	H ₂ SO ₄	1,46 (30 ⁰ C)	4	(NH ₄) ₂ SO ₄	1,60
2	NH ₄ HSO ₄	1,39	5	NH ₃	2,10
3	H ₂ O	4,19	6	Органика (по CH ₃ OH)	2,59

Теплота образования, кДж/к-моль:

- 1) H₂SO₄ – 811300; 2) NH₃ – 46190; 3) (NH₄)₂SO₄ – 1179300;
4) NH₄HSO₄ – 1023651.

– Рассчитаем тепловой эффект химической реакции (5.15) с учетом теплот образования участников реакции:

$$q_{(1)} = 1179300 - (811300 + 2 \cdot 46190) = 275620 \text{ кДж/кмоль,}$$

и реакции нейтрализации (5.16):

$$q_{(2)} = 1179300 - (46190 + 1023651) = 109459 \text{ кДж/кмоль.}$$

– Рассчитаем суммарный тепловой эффект процесса по (5.15) с учетом расхода участников химической реакции:

$$Q_{xp}^1 = \frac{580 \cdot 53}{132 \cdot 275620} = 1212164,2 \text{ кДж/ч,}$$

$$Q_{xp}^2 = \frac{1843,4}{132 \cdot 109459} = 1528611,4 \text{ кДж/ч.}$$

Температура технологических потоков:

- 1) маточного раствора – 25⁰C;
2) газообразного аммиака – 10⁰C;
3) рециркулята – 30⁰C.

В задачу расчета входит определение температуры нейтрального раствора (рис. 5.8) (Q_{np}).

Уравнение теплового баланса нейтрализатора будет иметь следующий вид:

$$\sum Q_{приход} = \sum Q_{расход},$$

или

$$Q_{xp}^1 + Q_{NH_3} + Q_{rec} + Q_{xp}^1 + Q_{xp}^2 = Q_{шт} + Q_{np} + Q_{тн}.$$

Задачей расчета является определение температуры уходящего нейтрализованного раствора; или

$$Q_{нр} = Q_{прпх} - Q_{шл} - Q_{тп};$$

$$\sum G_{нр}^i \cdot C_{нр}^i \cdot t_{нр} = Q_{прпх} - Q_{шл} - Q_{тп};$$

$$t = \frac{Q_{прпх} - Q_{шл} - Q_{тп}}{G_{СА} \cdot C_{СА} + G_{орг} \cdot C_{орг} + G_{H_2O} \cdot C_{вод}},$$

где $Q_{нр}$ – теплосодержание исходного маточного раствора;

Q_{NH_3} – теплосодержание газообразного аммиака;

$Q_{рец}$ – теплосодержание потока рецикла;

$Q_{xp}^{1,2}$ – тепловый эффект экзотермической реакции нейтрализации;

$Q_{шл}$ – теплосодержание потока шлама;

$Q_{нр}$ – теплосодержание нейтрализованного раствора;

$Q_{тп}$ – теплопотери.

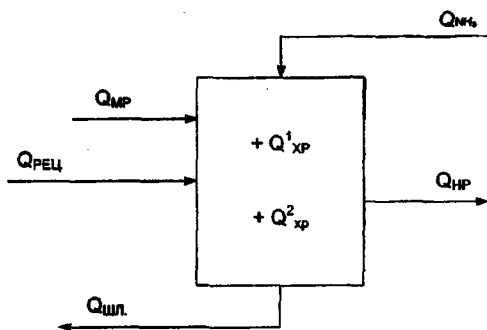


Рис. 5.8. Схема тепловых потоков нейтрализатора

При хорошей теплоизоляции теплопотери будут минимальны. Расход шлама составляет менее 1% от объема нейтрализованного раствора, поэтому вводим допущение, что они минимальны. Расчет теплосодержания потоков проводим по формуле

$$Q = G \cdot c \cdot t.$$

Рассчитаем теплосодержание материальных потоков, входящих в нейтрализатор:

$$Q_{\text{мр}} = 431 \cdot 1,46 \cdot 25 + 1606 \cdot 1,39 \cdot 25 + 238 \cdot 2,59 \cdot 25 + 2823 \cdot 4,19 \cdot 25 =$$

$$= 382659,75 \text{ кДж/ч,}$$

$$Q_{\text{NH}_3} = 386,94 \cdot 2,1 \cdot 10 = 8125,74 \text{ кДж/ч,}$$

$$Q_{\text{реч}} = 6999,9 \cdot 1,6 \cdot 30 + 599,9 \cdot 2,59 \cdot 30 + 12400,2 \cdot 4,19 \cdot 30 =$$

$$= 1941312,5 \text{ кДж/ч.}$$

С учетом тепловых эффектов по реакциям (5.15) и (5.16) суммарное количество теплоты составит:

$$\sum Q_{\text{прих}} = 382659,75 + 8125,74 + 1941312,5 + 1212164,2 + 1528611,4 =$$

$$= 5072873,5 \text{ кДж/ч.}$$

В «расходе» рассчитываем только сумму произведений $G_i \cdot c_i$ нейтрализованного раствора:

$$\sum G_{\text{нр}}^i \cdot c_{\text{нр}}^i = 9423,83 \cdot 1,6 + 642,91 \cdot 2,59 + 15205,2 \cdot 4,19 =$$

$$= 80453,03 \text{ кДж/ч.}$$

$$Q_{\text{нр}} = \sum G_{\text{нр}}^i \cdot c_{\text{нр}}^i \cdot t_{\text{нр}},$$

откуда

$$t_{\text{нр}} = \frac{Q_{\text{нр}}}{\sum G_{\text{нр}}^i \cdot c_{\text{нр}}^i}.$$

$$\text{Примем } Q_{\text{нр}} = \sum Q_{\text{прих}}.$$

Рассчитаем (ориентировочно) температуру уходящих потоков из нейтрализатора:

$$t_{\text{ориент}} = \frac{5072873,5}{80453,03} = 63,05 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

С учетом допущений, примем температуру уходящих потоков $\sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Как вариант можно рассмотреть возможность расчета теплопотерь. Для этого приведем данные по конструкции нейтрализатора: $d = 3,6 \text{ м}$; $h = 5 \text{ м}$; $V = 50 \text{ м}^3$. Материал изготовления – сталь углеродистая и кислотоупорная шлитка.

Потерю тепла в окружающую среду лучеиспусканием и конвекцией найдем по уравнению для стенок цилиндра:

$$Q_{\text{окр.среда}} = \alpha \cdot (t_2 - t_x) \cdot F,$$

где α – суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией. Для аппаратов с температурой поверхности до $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ используется формула

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t,$$

где Δt – разность температур между поверхностью аппарата и окружающей средой;

t_e – температура горячей воды, $t_e = 60^\circ\text{C}$ (принимаем);

t_x – температура воздуха в цехе, $t_x = 15^\circ\text{C}$ (принимаем);

F – поверхность цилиндрической формы аппарата нейтрализатора,

$$F = 2\pi R \cdot (R + h) = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,8 \cdot (1,8 + 5) \cong 76,86 \text{ м}^2.$$

Потери тепла в окружающую среду в нейтрализаторе:

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot 45 = 12,89 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.},$$

$$Q_{\text{окр. среды}} = 12,89 \cdot 76,86 \cdot 45 \cong 44583 \text{ Вт} \cong 160499 \text{ кДж/ч.}$$

Таким образом, теплопотери в окружающую среду составят:

$$\frac{160499}{5072873,5} \approx 3\%.$$

Рассчитаем теплосодержание потока шлама, приняв температуру его $\sim 60^\circ\text{C}$:

$$Q_{\text{шла}} = (195 \cdot 2,59 + 18 \cdot 4,19) \cdot 60 = 34828,2 \text{ кДж/ч.}$$

Рассчитаем теплосодержание нейтрализованного раствора, уходящего из аппарата:

$$Q_{\text{нр}} = \sum G_{\text{нр}}^i \cdot c_{\text{нр}}^i \cdot t_{\text{нр}} = 80453,03 \cdot 60 = 4827182 \text{ кДж/ч.}$$

Рассчитаем сумму тепла в «расходе»

$$4827182 + 34828,2 + 160499 = 5022509,2 \text{ кДж/ч.}$$

Полный тепловой баланс представлен в табл. 5.21.

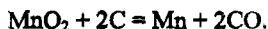
Таблица 5.21

Тепловой баланс нейтрализатора

Приход	кДж/ч	Расход	кДж/ч
1. Теплосодержание маточного раствора	382659,75	1. Теплосодержание нейтрализованного раствора	4827182
2. Теплосодержание аммиака	8125,74	2. Теплосодержание шлама	34828,2
3. Теплосодержание рециркулянта	1941312,5	3. Теплопотери	160499
4. Тепловой эффект реакции (5.15) нейтрализации	1212164,2		
5. Тепловой эффект реакции (5.16) нейтрализации	1528611,4		
Итого:	5072873,5	Итого:	5022509,2
			- 50364,3 (0,99%)

Задачи для самостоятельного решения

1. Металлический марганец получают восстановлением марганцевой руды углеродом:



В электрическую печь загружают 10 кг MnO_2 и 4 кг кокса. По восстановлению MnO_2 анализом установлено, что в конечном продукте содержится 4,4 кг металлического марганца и 2,2 кг MnO .

Выполнить материальный баланс процесса и найти общий тепловой эффект процесса (при стандартных условиях), т.е. сколько требуется тепла для восстановления MnO_2 при заданных условиях.

Ответ: 21 000 кДж.

2. Составить материальный и тепловой балансы коксовой печи, которая обогревается доменным газом состава, % об.: $\text{CO} - 27,4$; $\text{CO}_2 - 10,8$; $\text{CH}_4 - 0,5$; $\text{H}_2\text{O} - 2,0$; $\text{H}_2 - 2,9$; $\text{N}_2 - 56,4$. Сгорание доменного газа идет с 20% избытка воздуха. Начальная температура воздуха, угля и доменного газа $- 20^\circ\text{C}$. Полученный коксовый газ имеет следующий состав, % об.: $\text{H}_2 - 50$; $\text{CH}_4 - 25$; $\text{C}_2\text{H}_4 - 1,5$; $\text{CO} - 6,4$; $\text{CO}_2 - 3,4$; $\text{N}_2 - 11,8$; $\text{H}_2\text{O} - 1,9$. Выход продуктов коксования на 1000 кг влажного угля следующий: 71% кокса, 270 м³ коксового газа; 2,3% смолы, 0,7% бензола, 0,2% аммиака (в виде аммиачной воды). Влажность загруженного в коксовую печь угля 10%. Расходом тепла на процесс коксования пренебречь; теплопотери в окружающее пространство принять 10%. Температура отходящих продуктов горения 250°C , температура коксового газа и продуктов коксования 750°C . Теплоемкость паров бензола принять 1,68 кДж/кг, теплоемкость смолы 2,52 кДж/кг.

Примечание: при определении расходных статей баланса следует подсчитывать тепло, расходуемое на испарение влаги угля и нагрев ее до 750°C суммарно, т.е. исходя из содержания влаги в отдельных продуктах коксования (в газе и аммиачной воде). В соответствии с этим из общего теплосодержания коксового газа нужно вычесть теплоту содержащихся в нем водяных паров.

Ответ: приход тепла $\sim 2,06$ ГДж на 1000 кг угля. В т.ч. на 1) теплосодержание доменного газа $\sim 0,5\%$; 2) теплота сгорания его $\sim 98\%$; 3) теплосодержание, вносимое углем $\sim 1,1\%$; 4) теплосодержание воздуха $\sim 0,4\%$.

В расходе: 1) теплосодержание коксового пирога $\sim 41,5\%$; 2) теплосодержание коксового газа $\sim 16\%$; 3) теплосодержание продуктов коксования (смолы, бензола, аммиака) $\sim 3\%$; 4) теплосодержание влаги угля $\sim 17,5\%$; 5) теплосодержание продуктов горения $\sim 12\%$; 6) потери тепла $\sim 10\%$.

2. При 24-часовых испытаниях известковой печи получены следующие данные: а) загружено известняка в печь 146 т (за сутки), состав его, % масс.: CaCO_3 – 94,3; H_2O – 0,17 и примеси – 5,53; б) получено извести 91500 кг, состав ее, % масс.: CaO – 76,65; CaCO_3 – 14,2; CaSO_4 – 0,65 и примесей – 8,5; в) расход антрацита на обжиг составляет 8,68% от массы известняка. Состав антрацита, % масс.: С – 84,1; летучие – 1,63; H_2O – 5; S – 1; зола – 8,27. Коэффициент избытка воздуха 1,021.

Подсчитать: а) объем сухих печных газов (н.у.); б) расход воздуха при обжиге (за сутки); в) составить материальный баланс процесса обжига.

Ответ: а) 5230 м^3 , или 7970 кг/ч ; б) 126000 кг ; в) общий приход материальной части печи равен 286000 кг/сут .

4. Составить тепловой баланс установки по окислению аммиака при содержании NH_3 в газе перед конвертором 9,5% и степени окисления 0,95. Принять, что аммиачно-воздушная смесь не подогревается ($t = 0^\circ\text{C}$), а тепло нитрозных газов используется в паровом котле для получения водяного пара давлением 0,4 МПа с теплосодержанием 2740 кДж/кг ; газы при входе в паровой котел имеют температуру 550°C , при выходе 220°C . Подсчитать также количество получаемого в паровом котле водяного пара на 1 кг сжигаемого аммиака и количество получаемой азотной кислоты, если коэффициент абсорбции окислов азота 96% и КПД парового котла 0,9.

Ответ: приход тепла равен 13600 кДж на 1 кг окисляемого аммиака; потери тепла контактным аппаратом и трубопроводом до парового котла ~20%; потери его паровым котлом 5%; тепла на получение водяного пара расходуется 47%; тепло, уносимое газами из парового котла, ~28%. Получается водяного пара 2,4 кг и моногидрата HNO_3 3,4 кг на 1 кг NH_3 .

5. Газ (состав: 1,37% CO_2 ; 8,92% CO ; 9,02% H_2 ; 5,61% N_2 ; 0,07% H_2S ; 75,11% H_2O) подвергается конверсии при 530°C .

Подсчитать: а) равновесный состав сухого конвертированного газа; б) с какой температурой должен идти газ на конверсию, т.е. до какой температуры он должен быть подогрет в теплообменниках; в) какова температура конвертированного газа на выходе из теплообменников, если температура неконвертированного газа при входе в теплообменники 95°C ; г) составить тепловой баланс конвертора.

Ответ: а) 29,3% CO_2 ; 0,2% H_2S ; 1,4% CO ; 52,3% H_2 ; 16,8% N_2 ; б) 450°C ; в) 180°C ; г) $Q = 82200 \text{ кДж}$ на 100 м^3 сырого неконвертированного газа.

Заключение

Авторы хотели бы отметить, что для продуктивного использования учебного пособия необходимы качественные знания всех изучаемых в вузе разделов «химии», с которыми имеется преемственная связь.

В качестве рекомендации, перед началом технологических расчетов, авторы предлагают следующую последовательность выполнения работ. Первоначально четко определиться в структуре технологического процесса (сырье, его подготовка, физико-химические основы технологического процесса, тепловые эффекты, условия равновесия и пр., целевой и побочные продукты и т.д.), что позволит представить схему материальных и энергетических потоков. Определить для себя алгоритм расчета по поставленной задаче и только после этого приступить к ее решению. Для облегчения расчетов в пособие имеется справочный материал.

Авторы надеются, что данное пособие закрепит теоретические знания курса «Общая химическая технология» и будет способствовать развитию инженерно-технологического мышления его пользователя.

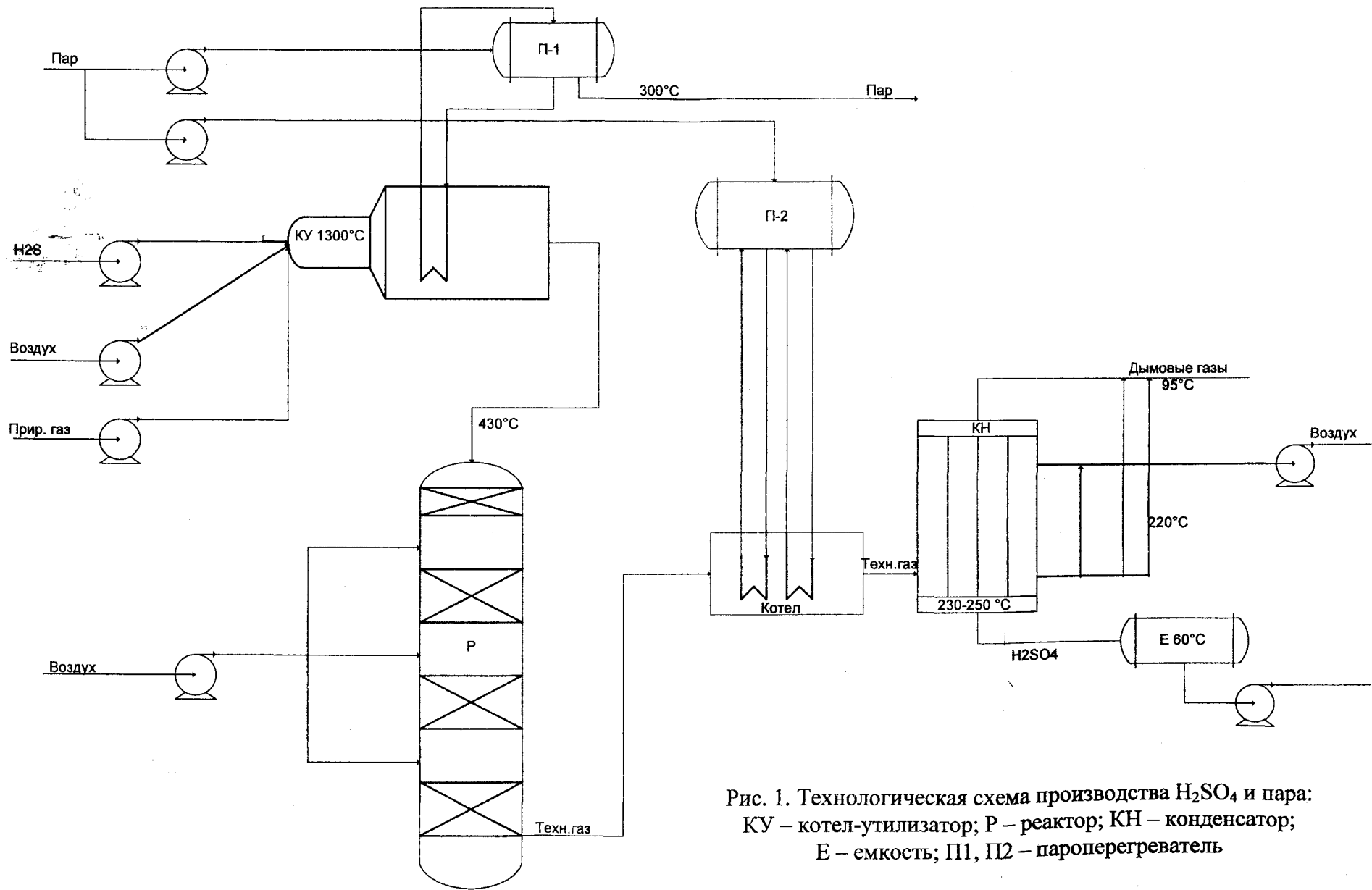


Рис. 1. Технологическая схема производства H₂SO₄ и пара:
 КУ – котел-утилизатор; Р – реактор; КН – конденсатор;
 Е – емкость; П1, П2 – пароперегреватель

Литература

1. Бесков, С.Д. Технохимические расчеты / С.Д. Бесков. – 3-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 1962.
2. Бесков, С.Д. Технохимические расчеты / С.Д. Бесков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1966.
3. Расчеты химико-технологических процессов / под ред. И.П. Мухленова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л. : Химия, 1982.
4. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков ; под ред. П.Г. Романкова. – Изд. 10-е, перераб. доп. – Л. : Химия, 1987.
5. Аранская, О.С. Сборник задач и упражнений по химической технологии и биотехнологии / О.С. Аранская. – Минск : Университетское, 1989.
6. Сборник задач и упражнений по общей химии : учеб. пособие для вузов / Л.М. Романцева [и др.]. – М. : Высш. шк., 1980.
7. Химико-технологические системы / В.С. Бесков [и др.]. – М. : Химия, 1999.
8. Перельман, В.И. Краткий справочник химика / В.И. Перельман ; под общ. ред. чл.-кор. АН СССР Б.Н. Некрасова. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1955.
9. Андреева, Р.А. Общая химическая технология : учеб.-метод. комплекс / Р.А. Андреева, Т.А. Рудинская, И.А. Ельшина. – Новополюк : ПГУ, 2008.

Атомные массы некоторых элементов

Порядковый номер	Название элемента	Символ	Атомная масса
7	Азот	N	14,0067
13	Алюминий	Al	26,9815
18	Аргон	Ar	39,94
56	Барий	Ba	137,34
4	Бериллий	Be	9,0122
5	Бор	B	10,811
35	Бром	Br	79,906
23	Ванадий	V	50,912
83	Висмут	Bi	208,980
1	Водород	H	1,00797
74	Вольфрам	W	183,85
72	Гафний	Hf	178,49
2	Гелий	He	4,0026
32	Германий	Ge	72,59
26	Железо	Fe	55,847
79	Золото	Au	196,967
53	Иод	I	126,9044
48	Кадмий	Cd	112,40
19	Калий	K	39,102
20	Кальций	Ca	40,08
8	Кислород	O	15,9994
27	Кобальт	Co	58,9332
14	Кремний	Si	28,086
36	Криптон	Kr	83,80
54	Ксенон	Xe	131,3
57	Лантан	La	138,91
3	Литий	Li	6,939
12	Магний	Mg	24,312
25	Марганец	Mn	54,9381
29	Медь	Cu	63,54
42	Молибден	Mo	95,94
33	Мышьяк	As	74,9216

Название элемента	Символ	Атомная масса
Натрий	Na	22,9898
Неон	Ne	20,183
Никель	Ni	58,71
Ниобий	Nb	92,906
Олово	Sn	118,69
Осмий	Os	190,2
Платина	Pt	195,09
Плутоний	Pu	[242]
Радий	Ra	226 00
Ртуть	Hg	200,59
Свинец	Pb	207,19
Селен	Se	78,96
Сера	S	32,064
Серебро	Ag	107,870
Стронций	Sr	87,62
Сурьма	Sb	121,75
Таллий	Tl	204,37
Теллур	Te	127 60
Тантал	Ta	170,948
Титан	Ti	47,90
Торий	Tb	232,038
Углерод	C	12,01115
Уран	U	238 03
Фосфор	P	30 9738
Фтор	F	18,9984
Хлор	Cl	35,453
Хром	Cr	51,996
Цинк	Zn	65,37
Цирконий	Zr	91,22

**Перевод наиболее распространенных в расчетной практике
несистемных единиц измерения в стандартные (СИ)**

Старые и несистемные единицы	Единицы системы СИ
Масса, объем	
1 тонна (т)	1000 кг = 1 Мг
1 литр (л)	1,000028 · 10 ⁻³ м ³
Давление	
1 физическая атмосфера (атм)*	101 325 н/м ² = 1,01325 бар
1 кг/см ² (1 кгс/см ²)	98066,5 н/м ² = 0,980665 бар
1 кг/м ² (кг·с/м ²)	9,80665 н/м ²
1 бар	10 ⁵ н/м ²
1 тонна-сила (т.с; Т)	9806,65 н
1 дин/см ²	0,1 н/м ²
1 мм рт. ст.	133,322 н/м ²
1 мм вод. ст.	9,80665 н/м ²
Работа, энергия	
1 килограмм-сила-метр (кгс·м, кгМ)	9,80665 дж
1 киловатт-час (квт·ч)	3,6·10 ⁶ дж
1 лошадиная сила-час (л. с. ч)	2,648·10 ⁶ дж
1 эрг	10 ⁻⁷ дж
1 калория стандартная (кал, 25°С)**	4,1868 дж
1 килокалория (ккал) стандартная	4186,8 дж = 4,1868 кдж
1 калория химическая (кал, 0°С)	4,1840 дж
1 электронвольт (эв)	1,60207 · 10 ⁻¹⁹ дж
Мощность	
1 кгс·м/сек (кг·м/сек)	9,80665 вт
1 л.с	735,499 вт
1 эрг/сек	10 ⁻⁷ вт
1 ккал/час	1,1630 вт
1 кал/сек	4,1868 вт

* В технических расчетах без особой грубой ошибки можно принимать 1 атм (нормальное давление) = 10⁵ н/м² = 0,1 Мн/м².

** В технических расчетах обычно принимают 1 ккал = 4,2 кдж и соответственно 1 кал = 4,2 дж.

Удельная теплота, теплоемкость и энтропия

1 ккал/кг	4186,8 кдж/кг
1 кал/г	4186,8 дж/кг
1 ккал/(кг·град)	4186,8 дж/(кг·град) = = 4,1868 кдж/(кг·град)
1 кал/(г·град)	4186,8 дж/(г·град) = = 4,1868 кдж/(кг·град)

Тепловой поток

1 ккал/ч	1,1630 вт
1 кал/сек	4,1868 вт

Плотность теплового потока

1 ккал/(м ² ·ч)	1,1630 вт/м ²
1 кал/(см ² ·сек)	41 868 вт/м ²

Коэффициент теплопередачи

1 ккал/(м ² ·ч·град)	1,1630 вт/(м ² ·град)
1 кал/(см ² ·сек·град)	41 868 вт/(м ² ·град)

Коэффициент теплопроводности

1 ккал/(м·ч·град)	1,1630 вт/(м·град)
1 кал/(см·сек·град)	418,68 вт/(м·град)

Давление насыщенного водяного пара в H/M^2 при различных температурах

Температура, °C	H/M^2	Температура, °C	H/M^2	Температура, °C	H/M^2
-60	1,333	10	1225	30	4250
-50	5,332	11	1306	31	4460
-40	16,00	12	1400	32	4720
-30	40,00	13	1470	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	2480	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	90	$70,1 \cdot 10^3$
4	814	27	3580	100	$101,3 \cdot 10^3$
6	935	28	3800		
8	1065	29	4020		

Некоторые константы наиболее употребительных газов

Газ	Укритическая температура и давление	Молекулярная масса	Плотность при нормальных условиях	Мольная масса	Константы уравнения Ван-дер-Ваальса		Температура инверсии, °С	Температура критической точки	Удельная теплота парообразования при нормальном давлении	Удельная теплота испарения при нормальном давлении	Отношение теплоемкостей при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме	
					a , атм ² м ⁶ /моль ²	b , м ³ /моль						
Азот	—	28,02	1,25156	22,402	0,1363	0,0355	—210,5	—135,8	200	25,5	0,811	1,404
Азотодистиллят индустриальный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Гидроксид аммиака	—	92,02	4,1126	22,370	0,423	—	—10,0	—	390	134,5	1,49	—
Аммиак	—	17,03	0,7703	22,094	0,137	0,0373	—77,7	—33,35	1370	350	0,658	1,31
Аргон	—	39,94	1,7803	22,4	0,137	0,0375	—189,4	—185,7	157	28	0,404	1,67
Ацетилен	—	26,02	1,1791	22,14	0,437	0,0512	—81,5	—83,6	690	—	0,52	1,26
Бораз	—	28,96	1,2928	22,4	0,133	0,0366	—213	—192	107	23	0,85	1,40
Бромол	—	2,01	0,03987	22,429	0,0248	0,0219	—253,4	—252,7	452	58,6	0,070	1,41
Водяной пар	—	18,02	1,00	22,12	0,303	0,0326	0,0	100	2290	333	1,00	1,324
Гелий	—	4,00	0,178	22,4	0,00345	0,0237	—272,2	—268,8	21,6	5,2	0,122	1,67
Дезоксиазот	—	46,01	2,055	22,37	0,645	0,0532	—10,0	21,2*	802	148	1,49	—
Захваченный азот	—	44,02	1,9778	22,26	0,365	0,0416	—102,4	—88,7	602	148	1,296	1,30
Кислород	—	32,00	1,42892	22,394	0,138	0,0318	—218,8	—181,97	213	13,8	1,142	1,401
Метан	—	16,03	0,7165	22,363	0,228	0,0428	—184	—161,4	504	60,8	0,162	1,31
Оксид азота	—	30,01	1,3402	22,391	0,144	0,0236	—163,7	—151,8	460	77	1,27	1,400
Оксид углерода	—	28,01	1,2504	22,337	0,143	0,0334	—207	—192	211,5	33,4	0,80	1,404
Пропан	—	42,08	1,915	22,00	—	—	—185,25	—47,75	440	71,6	0,61	1,17
Сернистый газ	—	64,07	2,9266	21,89	0,676	0,0565	—72,7	—10,0	399	125	1,46	1,29
Сервоодород	—	34,09	1,5392	22,16	0,345	0,0520	—83	—61,8	562	70	0,96	1,32
Углекислый газ	—	44,00	1,9769	22,26	0,385	0,0427	—56,4	—10,5	338	189,6	1,19	1,304
Хлор	—	70,92	3,214	22,366	0,659	0,0562	—100,5	—33,9	624	190,2	1,07	1,355
Хлористый водород	—	36,47	1,6392	22,29	0,370	0,0408	—114	—85	414	57,8	1,185	1,41
Этан	—	30,03	1,3565	21,16	—	—	—182,8	—88,7	821	93,2	0,546	1,22
Этилен	—	28,05	1,2603	22,26	0,455	0,0572	—163,7	—105	482	119,2	0,41	1,265

* Для равновесного состояния $2\text{N}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4$.

Температурная зависимость истинной мольной и объемной теплоемкости газов и паров при нормальном давлении

Наименование газа	Истинная мольная теплоемкость, <i>кдж/кмоль · град</i>	Истинная объемная теплоемкость, <i>кдж/м³ · град</i>	Температура границы, °C	Расхождение с опы- том, % (не более)	
He, Ne, Ar, Kr, Xe и пары металлов (Zn, Hg и т. д.)	20,82	—	—	—	
Cl ₂ , Br ₂ , I ₂	31 + 0,0042 T	—	0 — 2000	3	
H ₂	28,8 + 0,000276 T + 1,17 · 10 ⁻⁶ T ²	1,24 + 3,734 · 10 ⁻⁵ t + 0,747 · 10 ⁻⁷ t ²	0 — 1700	1,5	
	27,2 + 0,00387 (0 — 2700°C)	1,194 + 22,4 · 10 ⁻⁵ t (2000 — 3000°C)	—	3	
H ₂ O, H ₂ S	28,8 + 0,01375 T — 1,435 · 10 ⁻⁶ T ²	1,55 + 4,64 · 10 ⁻⁵ t + 2,55 · 10 ⁻⁷ t ²	0 — 2000	1,5	
	34,2 + 0,0021 T	—	0 — 2000	3	
O ₂ , N ₂ , CO, HCl, воздух	28,3 + 0,00254 T + 0,545 · 10 ⁻⁶ T ²	1,322 + 7,45 · 10 ⁻⁵ t + 0,594 · 10 ⁻⁷ t ²	0 — 2000	1,5	
	27,2 + 0,0042 T (0 — 2700°C)	1,234 + 22,0 · 10 ⁻⁵ t (2000 — 3000°C)	—	3	
Более точно	O ₂	26,2 + 0,0115 T — 3,22 · 10 ⁻⁶ T ²	—	0 — 1700	—
	N ₂	26,4 + 0,00760 T — 1,445 · 10 ⁻⁶ T ²	—	0 — 1700	—
	CO	26,2 + 0,00375 T — 1,92 · 10 ⁻⁶ T ²	—	0 — 1700	—
	NO	26,0 + 0,0102 T — 2,55 · 10 ⁻⁶ T ²	—	0 — 1200	—
CO ₂ , SO ₂	32,2 + 0,0222 T — 3,43 · 10 ⁻⁶ T ² (0 — 2200 °C)	1,96 + 4,63 · 10 ⁻⁴ — 2,336 · 10 ⁻⁷ t ² (500 — 3000°C)	—	2	
	36,5 + 0,0276 T — 9,2 · 10 ⁻⁶ T ² (от 75 до + 20°C)	1,636 + 18,40 · 10 ⁻⁴ t — 14,9 · 10 ⁻⁷ t ² (0 — 500°C)	—	2	

NH ₃	$24,8 + 0,0376T - 7,40 \cdot 10^{-6}T^2$	—	0 — 1700	1,0
	$33,6 + 0,0029T + 2,14 \cdot 10^{-6}T^2$	—	0 — 1000	1,0
	$36,1 + 0,0034t + 30,2 \cdot 10^{-6}t^2$	—	0,680	1,5
	$28,0 + 0,0264T$	—	0 — 500	1,5
NO ₂	$29,3 + 0,0298T - 3,61 \cdot 10^{-6}T^2$	—	—	—
CH ₄	$14,15 + 0,075T - 17,54 \cdot 10^{-6}T^2$	—	0 — 1000	1,0
	$3,14 + 0,021T$	$1,62 + 3,56 \cdot 10^{-3}t$	от 100 и выше	1,0
	$2,47 + 0,04025T$	—	от -100 до +150	3,0
C ₂ H ₆	$5,76 + 0,1755T - 0,058 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	1,0
	$16,0 + 0,1765T - 0,0533 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	0,5
C ₂ H ₄	$0,514 + 0,270T - 0,0352 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	0,5
C ₃ H ₈	$0,72 + 0,1304T - 0,0447 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	0,5
	$27,9 + 0,067T$	$1,90 + 2,29 \cdot 10^{-3}t$	0 — 1200	5,0
C ₃ H ₂	$24,4 + 0,0222T - 0,0231 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	0,5
C ₆ H ₆	$-21,1 + 0,401T - 0,170 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	—
Изопрен	$3,93 + 0,337T - 0,1243 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1200	—
S ₂	$35,9 + 0,00125T$	—	0 — 1200	—
SO ₂	$13,65 + 0,037T$	—	—	—
CH ₃ OH (газ)	$20,45 + 0,1037T - 0,0247 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 400	—
C ₂ H ₅ OH (газ)	$9,05 + 0,208T - 0,0651 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 400	—
CH ₃ CHO (газ)	$19,0 + 0,1395T - 0,0389 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 400	—
HCHO (газ)	$20,94 + 0,0536T - 0,0156 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1250	—
HCOOH (газ)	$30,70 + 0,095T - 0,346 \cdot 10^{-3}T^2$	—	0 — 1250	—

Температурная зависимость средней молярной теплоемкости газов от t °С при нормальном давлении

Наименование газа	Температурные границы, °С	Средняя молярная теплоемкость \bar{c} ккал/кмоль · град (4,1868 \bar{c} кдж/кмоль · град)	Приближенные формулы средней молярной теплоемкости \bar{c} , ккал/кмоль · град (4,1868 \bar{c} кдж/кмоль · град)
Cl ₂ , Br ₂ , I ₂ , S ₂	0 — 2200	—	7,67 + 0,0005 t
H ₂	{ 0 — 2000 0 — 1700	6,79 + 0,0001 t + 0,1332 · 10 ⁻⁶ t^2 6,919 + 0,000109 t + 0,093 · 10 ⁻⁶ t^2	— 6,685 + 0,00045 t
O ₂ , N ₂ , NO, CO, HCl, воздух	0 — 2000	7,08 + 0,000198 t + 0,1065 · 10 ⁻⁶ t^2	6,685 + 0,00045 t
Более точно	{ O ₂ N ₂ CO NO	0 — 1700 0 — 1700 0 — 1700 0 — 1200	— — — —
		6,953 + 0,001163 t — 0,257 · 10 ⁻⁶ t^2 6,771 + 0,000815 t — 0,115 · 10 ⁻⁶ t^2 6,787 + 0,000920 t — 0,153 · 10 ⁻⁶ t^2 6,87 + 0,001051 t — 0,204 · 10 ⁻⁶ t^2	
		0 — 2000 0 — 1700	— —
		8,3 + 0,000124 t + 0,455 · 10 ⁻⁶ t^2 7,76 + 0,001548 t — 0,114 · 10 ⁻⁶ t^2	8,05 + 0,0005 t
CO ₂ , SO ₂	{ 0 — 500 500 — 3000	8,76 + 0,00492 t — 2,665 · 10 ⁻⁶ t^2 10,49 + 0,001233 t — 0,00416 · 10 ⁻⁶ t^2 — 2,64 · 10 ⁻⁹ t^3	— 8,785 + 0,0033 t
	Более точно { CO ₂ SO ₂	0 — 1700 0 — 1700	— —
		8,996 + 0,003590 t — 0,825 · 10 ⁻⁶ t^2 9,827 + 0,002938 t — 0,701 · 10 ⁻⁶ t^2	
CH ₄	0 — 1700	7,957 + 0,007809 t — 1,1396 · 10 ⁻⁶ t^2	8,52 + 0,0046 t
NH ₃	0 — 1000	8,544 + 0,00410 t — 0,538 · 10 ⁻⁶ t^2	8,42 + 0,00315 t
C ₂ H ₂	0 — 1700	10,950 + 0,004528 t — 0,881 · 10 ⁻⁶ t^2	—
C ₂ H ₄	0 — 1200	—	11,03 + 0,008 t
Нефтяные пары	—	(4,0 — ρ) 0,000248 t + 0,193 ρ	—

* ρ — плотность нефтяных паров при 15°С, которая практически равна 0,5—0,75 кг/м³

**Температурная зависимость средней молярной теплоемкости газов
от 0° до t°C при постоянном объеме**

Наименование газа	Средняя молярная теплоемкость, <i>кДж/кмоль · град</i>
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

Средняя молярная теплоемкость газов от 0 до t°C при нормальном давлении

Значение средней молярной теплоемкости, С кдж/кмоль · град

Температура, °С	Значение средней молярной теплоемкости, С кдж/кмоль · град																
	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O, H ₂ S	NH ₃	NO	C ₂ H ₄	SO ₂	C ₂ H ₆	воздух	HC ^o OH (газ)	CH ₃ OH (газ)	C ₂ H ₅ OH (газ)	HCOOH (газ)
0	28,8	29,3	28,4	28,42	37,7	33,4	32,5	34,7	28,5	39,4	41,2	46,2	28,6	35,2	49,0	74,6	54,0
100	29,0	29,6	28,7	28,9	39,2	36,6	33,2	36,2	29,0	42,1	42,4	47,8	29,0	37,4	53,7	80,5	57,8
200	29,1	30,1	29,0	29,2	40,6	39,3	33,8	37,3	29,5	48,6	43,5	49,6	29,3	39,6	57,0	86,6	61,6
300	29,15	30,5	29,4	29,6	41,9	42,0	34,5	39,4	29,9	53,3	44,7	51,3	29,7	41,1	62,8	92,2	64,7
400	29,2	30,9	29,6	29,9	43,2	45,5	35,1	40,8	30,3	57,9	45,8	53,0	30,0	43,8	65,8	97,2	66,2
500	29,3	31,3	30,0	30,2	44,4	48,3	35,6	42,3	30,6	62,5	46,6	54,4	30,3	45,9	70,0	101,4	68,3
600	29,4	31,8	30,3	30,5	45,5	50,9	36,0	43,7	31,0	67,0	47,5	56,0	30,6	47,8	74,2	105,2	70,7
700	29,5	32,0	30,6	30,8	46,5	53,5	36,6	45,1	31,3	71,7	48,5	57,4	30,9	49,5	—	—	—
800	29,6	32,3	30,8	31,2	47,5	55,8	37,5	46,4	31,6	76,3	49,3	58,7	31,2	51,1	—	—	—
900	29,7	32,7	31,1	31,5	48,5	58,1	38,0	47,6	31,9	82,0	50,0	60,0	31,4	52,8	—	—	—
1000	29,8	33,0	31,4	31,7	49,3	60,2	38,6	48,8	32,2	84,0	50,6	61,2	31,7	54,0	—	—	—
1100	29,9	33,4	31,6	31,9	50,1	62,4	39,1	—	32,5	90,1	50,9	62,3	31,9	55,4	—	—	—
1200	30,0	33,8	31,3	32,2	50,9	64,4	39,6	—	32,7	94,7	51,3	63,4	32,2	57,0	—	—	—
1300	30,2	34,0	32,0	32,4	51,4	66,1	40,2	—	—	—	51,7	64,3	32,4	—	—	—	—
1400	30,4	34,1	32,2	32,6	52,0	67,8	40,7	—	—	—	52,0	65,2	32,6	—	—	—	—
1500	30,6	34,3	32,4	32,9	52,6	69,3	41,2	—	—	—	52,3	66,0	32,9	—	—	—	—
1600	30,8	34,5	32,7	33,1	53,1	—	41,8	—	—	—	52,6	—	33,1	—	—	—	—
1700	31,0	34,7	32,9	33,3	53,5	—	42,3	—	—	—	52,9	—	33,2	—	—	—	—
1800	31,2	34,9	33,1	33,4	53,9	—	42,8	—	—	—	53,1	—	33,4	—	—	—	—
1900	31,4	35,1	33,2	33,6	54,2	—	43,2	—	—	—	53,3	—	33,5	—	—	—	—
2000	31,6	35,3	33,4	33,8	54,5	—	43,6	—	—	—	53,5	—	33,7	—	—	—	—
2100	31,8	35,4	33,6	33,9	54,8	—	44,1	—	—	—	53,7	—	33,9	—	—	—	—
2200	31,9	35,5	33,8	34,0	55,1	—	44,4	—	—	—	53,9	—	33,9	—	—	—	—
2300	32,1	35,7	33,9	34,2	55,3	—	44,9	—	—	—	54,1	—	34,0	—	—	—	—
2400	32,3	35,9	34,0	34,3	55,5	—	45,3	—	—	—	54,2	—	34,2	—	—	—	—
2500	32,5	36,0	34,1	34,4	55,8	—	—	—	—	—	54,3	—	34,3	—	—	—	—
3000	33,2	36,8	34,6	34,9	56,7	—	—	—	—	—	54,7	—	34,7	—	—	—	—

Средняя молярная теплоемкость газов от 0° до t°C при постоянном объеме

Температура, °C	Значения средней молярной теплоемкости, кДж/кмоль · град				
	двухатомные газы (N ₂ , O ₂ , H ₂ , CO, NO)	CO ₂	H ₂ O	четырёхатом- ные газы (NH ₃ и др.)	пятиатомные газы (CH ₄ и др.)
1200	22,2	40,4	30,0	44,2	52,4
1400	22,6	41,5	31,0	44,5	52,8
1600	23,0	42,1	32,0	44,8	53,2
1800	23,4	42,7	33,5	45,2	53,6
2000	23,6	43,1	34,8	45,0	54,0
2200	24,0	43,8	36,6	46,0	54,5
2400	24,5	44,2	38,3	45,5	55,0
2600	24,9	44,8	40,4	47,0	55,4
2800	25,2	45,2	42,3	47,4	55,7
3000	25,6	45,9	44,0	47,8	56,1
3200	26,0	46,5	45,6	—	—
3400	26,4	47,0	47,4	—	—
3600	26,8	47,4	49,0	—	—
3800	27,2	47,8	50,7	—	—
4000	27,6	48,0	52,4	—	—
5000	29,7	49,5	60,0	—	—

**Истинная удельная теплоемкость, температура и теплота плавления
некоторых твердых веществ**

Наименование вещества	Температура плавления, °С	Температурные границы, °С	Истинная удельная теплоемкость, $\text{кдж/кг} \cdot \text{град}$	Теплота плавления, кдж/кг
Алюминий	659	-254,0	0,010	361
		-231,2	0,092	
		-136,0	0,614	
		-39,0	0,823	
		0 - 659 659 - 1500	$0,987 + 5,18 \cdot 10^{-4}t$ 1,19 (жидкий)	
Кальций	849	-251,9	0,0532	328
		-211,1	0,334	
		-110,0	0,613	
		0 - 440	$0,653 + 0,35 \cdot 10^{-3}t$ (α -Ca)	
		440 - 849 849 - 1240	$0,695 + 0,1465 \cdot 10^{-3}t$ (β -Ca) 0,775 (жидкий)	
Олово	231,9	0 - 231,9 232 - 1000	$0,225 + 0,17 \cdot 10^{-3}t$ 0,233 (жидкое)	60,6
Хром	1550	0 - 1550 1550 - 1650	$0,443 + 0,238 \cdot 10^{-3}t$ 0,78 (жидкий)	317
Медь	1084	-258	0,0029	206
		-249,5	0,0578	
		-223,1	0,0946	
		-184	0,227	
		-39	0,368	
0 - 1084 1084 - 1500	$0,932 + 1,13 \cdot 10^{-4}t + 3,8 \cdot 10^{-9}t^2$ 0,494 (жидкая)			
Магний	649	-232,9	0,1452	200,0
		-179,3	0,1874	
		0 - 649	$1,015 + 2,3 \cdot 10^{-4}t - 1,17 \cdot 10^{-6}t^2$	
		649 - 800	1,270 (жидкий)	
Марганец	1220	0 - 835	0,412 + 0,000570t (α -Mn)	263
		835 - 1044	$0,463 + 3,01 \cdot 10^{-4}t$ (β -Mn)	
		1044 - 1220	$0,453 + 3,21 \cdot 10^{-4}t$ (γ -Mn)	
		1220 - 1400	0,840 (жидкий)	
Кремний	1417	0 - 900 1417 - 2500	$0,847 + 9,20 \cdot 10^{-5}t - 0,151 \cdot 10^{-8}t^2$ 1,06 (жидкий)	554

**Истинная удельная теплоемкость, температура и теплота плавления
некоторых твердых веществ**

Наименование вещества	Температура плавления, °C	Температурные границы, °C	Истинная удельная теплоемкость, $\text{кдж/кг} \cdot \text{град}$	Теплота плавления, кдж/кг
Алюминий	659	-254,0	0,010	361
		-231,2	0,092	
		-136,0	0,614	
		-39,0	0,823	
		0 — 659	$0,937 + 5,18 \cdot 10^{-4}t$	
		659 — 1500	1,19 (жидкий)	
Кальций	849	-251,9	0,0532	328
		-211,1	0,334	
		-110,0	0,613	
		0 — 440	$0,653 + 0,35 \cdot 10^{-3}t$ (α -Ca)	
		440 — 849	$0,695 + 0,1465 \cdot 10^{-3}t$ (β -Ca)	
		849 — 1240	0,775 (жидкий)	
Олово	231,9	0 — 231,9 232 — 1000	$0,225 + 0,17 \cdot 10^{-3}t$ 0,233 (жидкое)	60,6
Хром	1550	0 — 1550 1550 — 1650	$0,443 + 0,238 \cdot 10^{-3}t$ 0,78 (жидкий)	317
Медь	1084	-258	0,0029	206
		-249,5	0,0578	
		-223,1	0,0946	
		-184	0,227	
		-39	0,368	
		0 — 1084	$0,332 + 1,13 \cdot 10^{-4}t + 3,8 \cdot 10^{-9}t^2$	
	1084 — 1500	0,494 (жидкий)		
Магний	649	-232,9	0,1452	200,0
		-179,3	0,1874	
		0 — 649	$1,015 + 2,3 \cdot 10^{-4}t - 1,17 \cdot 10^{-8}t^2$	
		649 — 800	1,270 (жидкий)	
Марганец	1220	0 — 835	0,412 + 0,000570t (α -Mn)	263
		835 — 1044	$0,463 + 3,01 \cdot 10^{-4}t$ (β -Mn)	
		1044 — 1220	$0,453 + 3,21 \cdot 10^{-4}t$ (γ -Mn)	
		1220 — 1400	0,840 (жидкий)	
Сремний	1417	0 — 900 1417 — 2500	$0,847 + 9,20 \cdot 10^{-6}t - 0,151 \cdot 10^{-9}t^2$ 1,06 (жидкий)	554

Наименование вещества	Температура плавления, °С	Температурные границы, °С	Истинная удельная теплоемкость $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$	Теплота плавления, кДж/кг	
Железо	1530	— 241	0,0113		
		— 231	0,0243		
		— 206,1	0,0905		
		— 163	0,260		
		0 — 777	$0,453 + 0,00021 t + 0,524 \cdot 10^{-6} t^2$		
		777 — 908	$1,110 + 9,00 \cdot 10^{-4} t$		(α -Fe)
908 — 1401	$0,607 + 3,00 \cdot 10^{-4} t$	(β -Fe)	12,6($\alpha \rightarrow \beta$)		
1401 — 1530	0,826	(γ -Fe)	26,0($\beta \rightarrow \gamma$)		
1530 — 1600	0,613 (жидкое)	(δ -Fe)	13,4($\gamma \rightarrow \delta$)		
				322($\gamma \rightarrow \delta$)	
Углерод (среднее для аморфного и графита)	3500 (аморфный)	— 244,4	0,021		
		— 229,0	0,0348		
		— 190,6	0,1005		
		— 50,3	0,476		
		0 — 1300	$0,798 + 0,00185 t + 0,63 \cdot 10^{-6} t^2$		
1300 — 2000	$1,71 + 2,336 \cdot 10^{-4} t$				
Графит	3600 (возгонка)	0 — 1100	$1,488 + 9,12 \cdot 10^{-4} t - 4,08 \cdot 10^{-6} t^2$		
Алмаз	3500	0 — 1040	$0,710 + 1,063 \cdot 10^{-3} t - 4,55 \cdot 10^{-6} t^2$		
Никель	1452	0 — 353	$0,442 + 0,0002618 t + 2,384 \cdot 10^{-7} t^2$	310	
		353 — 1452	$0,519 + 0,647 \cdot 10^{-4} t$		(α -Ni)
		1452 — 1630	0,630 (жидкий)		(β -Ni)
Сера	113	0 — 95,6	$0,706 + 6,2 \cdot 10^{-4} t$ (ромбическая)	39,4	
	119	95,6 — 119	$0,731 + 9,44 \cdot 10^{-4} t$ (моноклиническая)		
Ртуть	— 38,9	— 39 до 357	$0,148 - 2,9 \cdot 10^{-6} t$ (жидкая)	11,6	
		357 — 1200	0,104 (пар)		
Свинец	327,4	— 257,1	0,0377	24,8	
		— 249,6	0,0641		
		— 218,6	0,108		
		0 — 327	$0,127 + 4,02 \cdot 10^{-6} t$		
		327 — 1000	0,1415 (жидкий)		
Цинк	419,6	— 240	0,080	102	
		— 188	0,272		
		0 — 419,6	$0,381 + 1,73 \cdot 10^{-4} t$		
		420 — 900	$0,496 + 3,53 \cdot 10^{-5} t$ (жидкий)		

Наименование вещества	Температура плавления, °С	Температуры, °С	Истинная удельная теплоемкость $\text{кдж/кг} \cdot \text{град}$	Теплота плавления, кдж/кг
Железо	1530	— 241	0,0113	12,6 ($\alpha \rightarrow \beta$) 26,0 ($\beta \rightarrow \gamma$) 13,4 ($\gamma \rightarrow \delta$) 322 ($\delta \rightarrow \text{ж}$)
		— 231	0,0243	
		— 206,1	0,0905	
		— 163	0,260	
		0 — 777	$0,453 + 0,00021 t + 0,524 \cdot 10^{-6} t^2$	
		777 — 908	$1,110 + 9,00 \cdot 10^{-4} t$	
908 — 1401	$0,607 + 3,00 \cdot 10^{-4} t$	(α -Fe)		
1401 — 1530	0,826	(β -Fe)		
1530 — 1600	0,613 (жидкое)	(γ -Fe)		
			(δ -Fe)	
Углерод (среднее для аморфного и графита)	3500 (аморфный)	— 244,4	0,021	
		— 229,0	0,0348	
		— 190,6	0,1005	
		— 50,3	0,476	
		0 — 1300	$0,798 + 0,00185 t + 0,63 \cdot 10^{-6} t^2$	
		1300 — 2000	$1,71 + 2,336 \cdot 10^{-4} t$	
Графит	3600 (возгонка)	0 — 1100	$1,488 + 9,12 \cdot 10^{-4} t - 4,08 \cdot 10^{-6} t^2$	
Алмаз	3500	0 — 1040	$0,710 + 1,063 \cdot 10^{-3} t - 4,55 \cdot 10^{-6} t^2$	
Никель	1452	0 — 353	$0,442 + 0,0002618 t + 2,384 \cdot 10^{-7} t^2$	310
		353 — 1452	$0,519 + 0,647 \cdot 10^{-4} t$	
		1452 — 1630	0,630 (жидкий)	
Сера	113	0 — 95,6	$0,706 + 6,2 \cdot 10^{-4} t$ (ромбическая)	39,4
	119	95,6 — 119	$0,731 + 9,44 \cdot 10^{-4} t$ (моноклиническая)	
Ртуть	— 38,9	— 39 до 357 357 — 1200	$0,148 - 2,9 \cdot 10^{-6} t$ (жидкая) 0,104 (пар)	11,6
Свинец	327,4	— 257,1	0,0377	24,8
		— 249,6	0,0641	
		— 218,6	0,108	
		0 — 327	$0,127 + 4,02 \cdot 10^{-5} t$	
		327 — 1000	0,1415 (жидкий)	
Цинк	419,6	— 240	0,080	102
		— 188	0,272	
		0 — 419,6	$0,381 + 1,73 \cdot 10^{-4} t$	
		420 — 900	$0,496 + 3,53 \cdot 10^{-5} t$ (жидкий)	

Средняя удельная теплоемкость некоторых твердых веществ

Наименование вещества	Температурные границы, °С	Средняя удельная теплоемкость, кдж/кг · град
Al	От -182 до +15	0,704
	0 - 659	$0,93 + 0,00021 t$
Ca	0 - 20	0,608
	0 - 849	0,730 (приближенно)
Cr	От -253 до -196	0,0525
	От -188 до 0	0,333
	0 - 1550	$0,443 + 2,03 \cdot 10^{-4} t + 0,0446 \cdot 10^{-6} t^2$
Углерод (среднее для аморфного и графита)	0 - 1300	$0,796 + 9,5 \cdot 10^{-4} t + 0,21 \cdot 10^{-6} t^2$
	1300 - 2000	$1,71 + 1,168 \cdot 10^{-4} t - \frac{281}{t}$
	600 - 1200	1,80 - 1,95 (приближенно)
Cu	От -192 до +20	0,335
	20 - 100	0,394
	0 - 1084	$0,382 + 0,566 \cdot 10^{-4} t + 0,0126 \cdot 10^{-6} t^2$
Sn	От -186 до +79	0,196
	19 - 99	0,231
	0 - 231,9	$0,225 + 1,845 \cdot 10^{-4} t$
Fe	От -192 до +20	0,373
	0 - 777	$0,453 + 1,05 \cdot 10^{-4} t + 0,175 \cdot 10^{-6} t^2$ (α-феррит)
	777 - 908	$1,110 + \frac{78,0}{t}$ (β-феррит)
	908 - 1401	$0,637 + \frac{69,8}{t}$ (γ-феррит)
1401 - 1530	$0,826 + \frac{82,4}{t}$ (δ-феррит)	

Наименование вещества	Температурные гра- ницы, °С	Средняя удельная теплоемкость, кДж/кг · град
P	От -78 до +10	0,713 (желтый)
	13 — 44,1	0,840 (желтый)
	15 — 98	0,713 (красный)
Ni	От -253 до -196	0,0872
	От -188 до +20	0,364
	0 — 353	$0,442 + 1,31 \cdot 10^{-5} t + 0,0591 \times$ $\times 10^{-6} t^2$ (α -Ni)
	353 — 1452	$0,548 - \frac{9,1}{t}$ (β -Ni)
Si	От -188 до +20	0,0495
	0 — 1417	$0,847 + 0,788 \cdot 10^{-4} t$
W	0 — 2200	$0,134 + 9,76 \cdot 10^{-6} t$
	0 — 420	$0,382 + 6,95 \cdot 10^{-5} t + 5,35 \times$ $\times 10^{-8} t^2 - 26,7 \cdot 10^{-12} t^3$
Al ₂ O ₃	0 — 500	$0,786 + 5,97 \cdot 10^{-4} t - 0,298 \times$ $\times 10^{-6} t^2$
	500 — 1000	$0,966 + 1,95 \cdot 10^{-4} t + \frac{7,14}{t}$
	0 — 1000	$0,872 + 3,68 \cdot 10^{-4} t$ (приближен- но)
CaC ₂	—	1,173 (приближенно)

Наименование вещества	Температурные Границы, ° С	Средняя удельная теплоемкость. кДж/кг·град
CaO	0—800	$0,749 + 3,78 \cdot 10^{-4} t -$ $-0,1533 \cdot 10^{-6} t^2$
FeO	—	0,612 (приближенно)
Fe ₂ O ₃	0—700	$0,611 + 5,34 \cdot 10^{-4} t -$ $-0,242 \cdot 10^{-6} t^2$
Fe ₃ O ₄	0—700	$0,597 + 6,39 \cdot 10^{-4} t -$ $-0,394 \cdot 10^{-6} t^2$
MgO	0—100 100—1200	$0,908 + 7,36 \cdot 10^{-4} t$ $1,022 + 1,71 \cdot 10^{-4} t - \frac{5,76}{t}$
SiO ₂	0—575	$0,794 + 9,44 \cdot 10^{-4} t -$ $-0,715 \cdot 10^{-6} t^2$
	575—1710	$1,172 - \frac{91,2}{t}$
	0—1500	$0,768 + 3,23 \cdot 10^{-4} t$ (приближенно)
Mg	От—186 до—79	0,792
	0—619	$1,045 + 2,2 \cdot 10^{-4} t$

Наименование вещества	Температурные границы, ° С	Средняя удельная теплоемкость, кдж/кг · град	
Mn	От — 253 до — 196	0,0944	
	От — 79,2 до + 15	0,457	
	0 — 835	$0,412 + 2,82 \cdot 10^{-4} t$	
	835 — 1044	$0,690 - \frac{2,692}{t}$	
	1044 — 1220	$0,690 - \frac{97,0}{t}$	
Hg	От — 270,2 до — 269,1	0,00222	
	От — 253 до — 196	0,09725	
	От — 77,2 до — 38,9	0,1378	
	От — 38,9 до + 357	$0,148 - 1,446 \cdot 10^{-6} t$ (жидкая Hg)	
Pb	От — 192 до + 20	0,1228	
	15 — 100	0,1295	
	0 — 327,4	$0,127 + 0,796 \cdot 10^{-4} t$	
S	0 — 95,6	0,735	
	17 — 45	0,684	(ромбическая сера; при 95,6° переходит в моноклиническую)
	95,6 — 119	0,832	(моноклиническая сера)
	119 — 160	0,985	(жидкая сера; при 160° переходит в пластическую)
	160 — 264	1,26	
CaCO ₃	0 — 1200	$0,828 + 3,82 \cdot 10^{-4} t$	

Наименование вещества	Температурные границы, ° С	Средняя удельная теплоемкость кДж/кг · град
CaSiO ₃	0 — 900	$0,715 + 4,76 \cdot 10^{-4} t - 0,233 \times 10^{-6} t^2$
Динас	600 — 1400	$1,327 - \frac{183,5}{t}$
Шамот	0 — 500	$0,855 - 0,151 \cdot 10^{-4} t + 0,559 \cdot 10^{-6} t^2$
	500 — 1100	$1,606 - 11,26 \cdot 10^{-4} t + 0,786 \cdot 10^{-6} t^2$
Доменные шлаки	0 — 1360	$0,694 + 8,95 \cdot 10^{-4} t - 1,18 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,572 \cdot 10^{-9} t^3$
	1300 — 1600	1,20
Основные марте-новские шлаки	От 0° до температуры плавления Температура плавления и выше	$0,777 + 1,31 \cdot 10^{-4} t + 0,545 \cdot 10^{-6} t^2$ 1,20

**Средняя удельная теплоемкость твердых веществ
при комнатной температуре**

Наименование вещества	Средняя удельная теплоемкость, кдж/кг · град	Наименование вещества	Средняя удельная теплоемкость, кдж/кг · град
-----------------------	--	-----------------------	--

а) Элементы и химические соединения

(Лед при 0° С)	2,114	FeCO ₃	0,822
(Лед при -20° С)	1,805	K ₂ CO ₃	0,907
AgCl	0,359	Na ₂ CO ₃	1,142
CaCl ₂	0,680	AgNO ₃	0,602
CuCl ₂	0,580	KNO ₃	0,926
KCl	0,677	NaNO ₃	1,090
NaCl	0,864	NH ₄ NO ₃	1,250
ZnCl ₂	0,566	KAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	1,462
NH ₄ Cl	1,520	CaSO ₄ · 2 H ₂ O	1,070
KI	0,311	CuSO ₄	0,644
KClO ₃	0,822	CuSO ₄ · 5 H ₂ O	1,128
NaClO ₃	0,940	FeSO ₄ · 7 H ₂ O	1,450
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,836	K ₂ SO ₄	0,750
CuS	0,522	MnSO ₄ · 5 H ₂ O	1,353
CuFeS ₂	0,542	Na ₂ SO ₄	0,970
ZnS	0,481	CaSO ₄	0,734
K ₂ S	0,677	NiSO ₄	0,906
CuO	0,547		
FeO	0,670		
ZnSO ₄	0,730		
K ₂ Cr ₂ O ₇	0,795		
KClO ₄	0,797		
KMnO ₄	0,750		
NaOH	3,270		

Наименование вещества	Средняя удельная теплоемкость, кДж/кг · град	Наименование вещества	Средняя удельная теплоемкость, кДж/кг · град
-----------------------	--	-----------------------	--

д) Сплавы

Сталь углеродистая	0,514	Бронза фосфористая	0,3606
» хромо-никелевая	0,495	» алюминиевая	0,437
» хромистая	0,503	Вуда сплав	0,1475
» марганцовистая	0,525	Константан	0,410
» кремнистая	0,499	Латуны	0,387
ванадиевая	0,495	Нейзидьбер	0,366
Бронза (80% Cu+20%Sn)	0,3606	Манганин	0,420

е) Минералы и строительные материалы

Апатит	0,795	Кирпич	0,900
Асбест	0,817	Мел	0,996
Асфальт	0,921	Мрамор	0,888
Базальт	0,860	Песок	0,800
Бетон	0,880	Песчаник	0,729
Гематит	0,729	Пирит	0,536
Гипс	0,880	Пробка	2,003
Глина сухая	0,921	Слюда	0,371
Гранит	0,825	Стекло лабораторное	0,838
Доломит	0,930	Тальк	0,845
Известняк	0,880	Фарфор	1,000
Известь	0,795	Шифер	0,754
Инфузорная земля	0,888	Эбонит	1,25—1,66
Каолин	0,938		

Наименование веществ	Средняя удельная теплоемкость, кДж/кг · град	Наименование веществ	Средняя удельная теплоемкость, кДж/кг · град
----------------------	--	----------------------	--

г) Органические соединения

Анилин	2,095	Капрон	2,44
Антрацен	1,33	Каучук	1,843
Антрахинон	1,27	м-Крезол	2,52
Гидрохинон	1,08	Кислота муравьиная	1,80
Капролактан	2,52	» уксусная	2,59
Кислота винная	1,505	Полихлорвинил	0,85—1,17
» пивелевая	1,167	Резина	2,10
Мальтоза	1,35	Тростниковый сахар	1,27
Молочный сахар	1,205	Тимох	1,622
Масло растительное	2,095	Фенол	2,35
Нафталин	1,315	Целлюлоза	1,51
Нефть	1,67—2,10	Этилацетат	2,01
Парафин	2,94		
Полипропилен	1,90—2,15		
Полистирол	1,25—1,45		
Полиэтилен	2,10—2,30*		

* Некоторые виды полиэтилена имеют $c = 1,68 - 1,93$

Удельная теплоемкость и теплота парообразования жидких веществ

Наименование вещества	Химическая формула	Температура кипения при нормальном давлении, °С	Теплота парообразования, кДж/кг	Удельная теплоемкость, кДж/кг · град	Температурные границы, °С
Алюминий	Al	1800	9340	см. табл. 12	—
Аммиак (жидкий)	NH ₃	-33,4	1370	4,41 4,60 5,10	-40 0 60
Ацетон	CH ₃ COCH ₃	56	525	2,12 + 0,0032t	от -30 до +56*
Анилин	C ₆ H ₅ NH ₂	184	459	2,002 2,14 2,29	0 50 100
Бензол	C ₆ H ₆	80,2	396	1,58 1,63 1,70 1,88 1,98	0 5 20 60 90
Вода	H ₂ O	100	2260	4,190 4,187* 4,188	0 4 100
Глицерин	C ₃ H ₅ (OH) ₃	290		2,03 2,26 2,504 2,80	-50 0 50 100
Железо	Fe	3000	6680	см. табл. 12	—
Кислота муравьиная	HCOOH	100,6	505	2,08 + 0,00297t	0—120

*Точнее, 4,189

Наименование вещества	Химическая формула	Температура кипения при нормальном давлении °С	Темперота парообразования, кдж/кг	Удельная теплоемкость, кдж/кг · град	Температурные границы, °С
Кислота уксусная	CH ₃ COOH	118	406	1,96 + 0,0039 t	0—80
Кислота серная (концентр.)	H ₂ SO ₄	338	—	1,42 + 0,00159 t	10—45
Кислота стеариновая	C ₁₇ H ₃₅ COOH	—	—	2,30	75—137
Кремний	Si	2600	5300	см. табл. 12	—
Нитробензол	C ₆ H ₅ NO ₂	211	332	1,50 1,38 1,646	10 50 120
Олово	Sn	2260	1097	см. табл. 12	—
Пиридин	C ₅ H ₅ N	116	427	1,696	Ок. 100
Ртуть	Hg	357	288	см. табл. 12 и 13	—
Сернистый ангидрид	SO ₂	—10,1	398	1,31 1,37 + 0,00117 t	—20 11—140
Смола (каменноугольная)	—	—	~355	~2,5	—
Сера	S	316	1474	0,835 0,974 1,170 1,386 1,358	119 119—147 161—201 201—233 233—264
Сероуглерод	CS ₂	46	352	0,975 + 1,03 · 10 ⁻⁴ t	от —100 до +150

Наименование вещества	Химическая формула	Температура кипения при нормальном давлении, °С	Теплота парообразования, кДж/кг	Удельная теплоемкость, кДж/кг·град	Температурные границы, °С
Сжиженные газы	N_2, O_2, H_2 и другие	—	—	см. табл. 5	—
Спирт метиловый	CH_3OH	66,5	1100	2,374 2,580	0 40
Спирт этиловый	C_2H_5OH	78,4	906	1,980 2,240 2,430 2,730 3,450 4,420	-50 0 25 50 100 150
Спирт пропиловый	C_3H_7OH	97,3	684	1,910 2,010 2,740	-50 0 50
Толуол	$C_6H_5CH_3$	111	362	1,617 1,766 1,970	0 50 100
Фосфор	P	280	1202	0,860	49—98
Хлороформ	$CHCl_3$	60,2	266	$0,926 + 1,38 \cdot 10^{-3} t$	от -30 до +60
Цинк	Zn	906	1885	см. табл. 12	—
Четыреххлористый углерод	CCl_4	76,6	195,2	$0,83 + 1,3 \cdot 10^{-4} t$	0—70
Эфир серный	$C_2H_5OC_2H_5$	34,8	354	2,216 2,30 3,36	0 30 120
Эфир уксусноэтиловый	$CH_3COOC_2H_5$	77	369	2,005	20

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

t° С	Значение теплосодержания, i кДж/кмоль										
	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O H ₂ S	NH ₃	NO	SO ₂	C ₂ H ₄
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	2900	2983	2870	2880	3920	3660	3320	3620	2900	4240	4300
200	5820	6010	5800	5840	8120	7940	6760	7560	5900	8700	9720
300	8750	9160	8800	8820	12560	12800	10330	11800	8860	13380	15500
400	11670	12360	11820	11930	17250	18200	14020	16340	12100	19100	25140
500	14650	15640	14980	15100	22200	24180	17850	21170	15300	23630	31200
600	17620	19000	18150	18300	27300	30540	21740	26200	18550	28600	45300
700	20630	22400	21350	21590	32600	37400	25800	31580	21900	33900	50100
800	23700	25860	24820	24900	38000	44600	29960	37100	25700	39400	61000
900	27670	29400	28000	28200	43700	52300	34200		28720	45400	72800
1000	29800	32900	31300	31700	49200	60100	38500		32200	50500	85500
1100	33000	36600	34700	35100	55100	68500	43000		35700	56400	99400
1200	36200	40200	37900	38600	61000	77000	47500		39200	62100	113600
1300	39300	43400	41600	42000	66800	86000	52200			67900	129000
1400	42600	47600	45100	45600	72700	94800	56800			73800	145000
1500	45800	51000	43600	49200	78600	103800	61700			79500	162000
1600	49200	54700	52200	52600	84600	113200	66700			85400	
1700	52600	58400	55700	56400	90800	122800	71700			91100	
1800	55900		59600		96500		76700			96500	
1900	59400		63100		102000		82000			102000	
2000	63100		66500		108000		87000			108000	
2500	81900		84000		142000		124800			112200	
3000	101500		101600		176000		162200			142000	
3500	120200		120200		221000		208000			176500	
4000	139300		141000		261000		260000				

**Теплоты образования важнейших химических соединений
при 20°C и нормальном давлении**

I. Неметаллические соединения

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, кДж/кмоль		
		газ	жидкость	раствор
<i>Водородные соединения</i>				
HCl	$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2 \dots\dots\dots$	92 200	—	164 800
HBr	$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{Br}_2 \dots\dots\dots$	35 200	—	118 600
HI	$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{I}_2 \dots\dots\dots$	— 25 140	—	55 400
H ₂ O	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (при 0°C)	242 000	286 580	
H ₂ O	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (при 20°C)	242 200	286 000	—
H ₂ O ₂	$\text{H}_2 + \text{O}_2 \dots\dots\dots$	—	196 200	190 000
H ₂ S	$\text{S}_{\text{ромб}} + \text{H}_2 \dots\dots\dots$	20 980	—	40 300
H ₂ S	$\frac{1}{2} \text{S}_2 \text{ газ} + \text{H}_2 \dots\dots\dots$	82 600	—	—
NH ₃	$\frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{3}{2} \text{H}_2 \dots\dots\dots$	46 100	70 000	81 100
PH ₃	$\text{P}_{\text{тверд}} + \frac{3}{2} \text{H}_2 \dots\dots\dots$	— 24 300	—	—
AsH ₃	$\text{As}_{\text{крист}} + \frac{3}{2} \text{H}_2 \dots\dots\dots$	— 185 000	—	—
CH ₄	$\text{C}_{\text{графит}} + 2\text{H}_2 \dots\dots\dots$	77 870	—	—
CH ₄	$\text{C}_{\text{саморф}} + 2\text{H}_2 \dots\dots\dots$	92 660	—	—
C ₂ H ₆	$2\text{C}_{\text{графит}} + 3\text{H}_2 \dots\dots\dots$	95 100	—	—
C ₂ H ₆	$2\text{C}_{\text{саморф}} + 3\text{H}_2 \dots\dots\dots$	124 420	—	—
C ₂ H ₄	$2\text{C}_{\text{графит}} + 2\text{H}_2 \dots\dots\dots$	— 87 510	—	—
C ₂ H ₂	$2\text{C}_{\text{графит}} + \text{H}_2 \dots\dots\dots$	— 229 400	—	—
<i>Кислородные соединения</i>				
HCIO	$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \dots\dots\dots$	—	—	127 600
HCIO ₂	$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots\dots\dots$	—	—	100 200
HCIO ₃	$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + 2\text{O}_2 \dots\dots\dots$	—	78 800	164 100
SO ₂	$\text{S}_{\text{ромб}} + \text{O}_2 \dots\dots\dots$	289 000	314 000	327 000
SO ₂	$\frac{1}{2} \text{S}_2 \text{ газ} + \text{O}_2 \dots\dots\dots$	348 000	—	—
SO ₃	$\text{S}_{\text{ромб}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots\dots\dots$	385 000	427 600	593 000

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, ккал/моль		
		газ	жидкость	раствор
SO ₂	SO ₂ + $\frac{1}{2}$ O ₂	96 000	138 100	304 000
H ₂ SO ₄	S _{ромб} + 2O ₂ + H ₂	—	805 000	884 000
H ₂ SO ₄	SO ₂ раствор + $\frac{1}{2}$ O ₂ + H ₂ O	—	—	267 000
H ₂ S ₂ O ₄	2S _{ромб} + 2O ₂ + H ₂	—	—	654 000
N ₂ O	N ₂ + $\frac{1}{2}$ O ₂	-74 200	-62 900	-55 400
NO	$\frac{1}{2}$ N ₂ + $\frac{1}{2}$ O ₂	-90 500	—	—
N ₂ O ₂	N ₂ + $\frac{3}{2}$ O ₂	-89 700	—	+31 840
NO ₂	$\frac{1}{2}$ N ₂ + O ₂	-33 920	—	—
N ₂ O ₄	N ₂ + 2O ₂	-10 900	+21 800	+48 200
HNO ₃	$\frac{1}{2}$ N ₂ + O ₂ + $\frac{1}{2}$ H ₂	—	—	129 000
HNO ₃	$\frac{1}{2}$ N ₂ + $\frac{3}{2}$ O ₂ + $\frac{1}{2}$ H ₂	144 000	174 000	206 000
P ₂ O ₅	2P _{тв} + $\frac{5}{2}$ O ₂	—	1 533 000 (тврд.)	1 694 000
H ₃ PO ₄	P _{тв} + 2O ₂ + $\frac{3}{2}$ H ₂	—	1 257 000	1 278 000
As ₂ O ₃	2As _{тв} + $\frac{3}{2}$ O ₂	—	648 000	617 000
As ₂ O ₅	2As _{тв} + $\frac{5}{2}$ O ₂	—	918 000	944 000
H ₃ AsO ₄	As _{тв} + 2O ₂ + $\frac{3}{2}$ H ₂	—	904 000	902 300
Sb ₂ O ₃	2Sb + $\frac{3}{2}$ O ₂	—	684 000	—
V ₂ O ₅	2Ваморф + $\frac{3}{2}$ O ₂	—	1181 000	1211 000
CO	Саморф + $\frac{1}{2}$ O ₂ *	124 300	—	—
CO	Сграфит + $\frac{1}{2}$ O ₂	109 800	—	—
CO ₂	Саморф + O ₂ *	410 000	—	434 000
CO ₂	Сграфит + O ₂	395 000	—	420 000
CO ₂	CO + $\frac{1}{2}$ O ₂	285 500	—	—
SiO ₂	Siаморф + O ₂	(824 000 для твердого)		
SiO ₂	Siкрист + O ₂	(801 000 для твердого)		

* При всех процессах обугливания (например, при коксовании угля) получается так называемый аморфный углерод. Поэтому при расчетах сгорания кокса и подобных ему видов топлива теплоту сгорания обычно берут для C_{аморф}.

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, кДж/моль		
		газ	жидкость	раствор

Другие соединения

NOCl	$\frac{1}{2} N_2 + \frac{1}{2} O_2 + \frac{1}{2} Cl_2$	- 25 140	—	—
PCl ₃	P _{тв} + $\frac{3}{2} Cl_2$	236 000	316 000	—
PCl ₅	P _{тв} + $\frac{5}{2} Cl_2$	—	(440 000 для твердого)	—
AsCl ₃	As _{тв} + $\frac{3}{2} Cl_2$	—	299 000	—
CCl ₄	C _{аморф} + 2Cl ₂	76 400	106 300	—
COCl ₂	C _{графит} + $\frac{1}{2} O_2 + Cl_2$	216 000	—	—
COCl ₂	CO + Cl ₂	109 800	—	—
SiF ₄	Si _{крист} + 2F ₂	151 000	—	—
H ₂ SiF ₆	Si _{крист} + 3F ₂ + H ₂	—	—	228 400
CS ₂	C _{аморф} + 2S _{тв}	- 108 900	- 82 000	—
CS ₂	C _{аморф} + S _{2 gas}	52 400	—	—
HCN	C + $\frac{1}{2} H_2 + \frac{1}{2} N_2$	- 125 700	- 104 700	- 100 400

II. Соединения металлов

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, кДж/моль	
		твердое вещество	раствор

Оксиды и щелочи

Na ₂ O	2Na + $\frac{1}{2} O_2$	422 000	659 000
Na ₂ O ₂	2 Na + O ₂	498 000	—
NaOH	Na + $\frac{1}{2} O_2 + \frac{1}{2} H_2$	430 000	473 000
K ₂ O	2K + $\frac{1}{2} O_2$	364 000	677 000
KOH	K + $\frac{1}{2} O_2 + \frac{1}{2} H_2$	430 000	486 000
NH ₄ OH	$\frac{1}{2} N_2 + \frac{3}{2} H_2 + H_2O$	—	85 000
Cu ₂ O	2Cu + $\frac{1}{2} O_2$	171 000	—
CuO	Cu + $\frac{1}{2} O_2$	157 300	—
Cu(OH) ₂	CuO + H ₂ O	6950	—

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования. кДж/моль	
		твердое вещество	раствор
Ag ₂ O	$2\text{Ag} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	27 200	—
MgO	$\text{Mg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	611 000	—
Mg(OH) ₂	$\text{Mg} + \text{O}_2 + \text{H}_2$	910 000	—
CaO	$\text{Ca} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	634 000	713 000
Ca(OH) ₂	$\text{Ca} + \text{O}_2 + \text{H}_2$	990 000	1 060 000
BaO	$\text{Ba} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	559 000	703 000
Ba(OH) ₂	$\text{Ba} + \text{O}_2 + \text{H}_2$	918 000	970 000
ZnO	$\text{Zn} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	348 000	—
Zn(OH) ₂	$\text{Zn} + \text{O}_2 + \text{H}_2$	10 040	—
CdO	$\text{Cd} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	273 000	—
Hg ₂ O	$2\text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	93 000	—
HgO	$\text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	90 200	—
Al ₂ O ₃	$2\text{Al} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	1 584 000	—
Al(OH) ₃	$\text{Al} + \frac{3}{2} \text{O}_2 + \frac{3}{2} \text{H}_2$	1 243 000	—
SnO	$\text{Sn} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	280 000	—
SnO ₂	$\text{Sn} + \text{O}_2$	578 000	—
PbO	$\text{Pb} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	220 600	—
PbO ₂	$\text{Pb} + \text{O}_2$	273 400	—
V ₂ O ₃	$2\text{V} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	1 265 000	—
V ₂ O ₅	$2\text{V} + \frac{5}{2} \text{O}_2$	1 830 000	—
Cr ₂ O ₃	$2\text{Cr} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	1 117 000	—
CrO ₃	$\text{Cr} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	587 000	597 000
MnO	$\text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	381 000	—
MnO ₂	$\text{Mn} + \text{O}_2$	515 000	—
Mn ₂ O ₄	$3\text{Mn} + 2\text{O}_2$	1 370 000	—
FeO	$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	272 000	—
Fe ₂ O ₃	$2\text{Fe} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	817 000	—

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, кДж/кмоль	
		твердое вещество	раствор
Fe ₃ O ₄	3Fe + 2O ₂	1 110 000	—
Fe(OH) ₃	Fe + $\frac{3}{2}$ O ₂ + $\frac{3}{2}$ H ₂	800 000	—
NiO	Ni + $\frac{1}{2}$ O ₂	229 400	—
TiO ₂	Ti + O ₂	914 000	—
WO ₂	W + O ₂	551 000	—
MoO ₂	Mo + O ₂	598 000	—
<i>Сульфиды*</i>			
Na ₂ S	2N + S	372 000	437 000
K ₂ S	2K + S	366 000	460 000
CuS	Cu + S	48 600	—
Cu ₂ S	2Cu + S	79 600	—
Ag ₂ S	2Ag + S	13 800	—
CaS	Ca + S	467 000	492 000
BaS	Ba + S	430 000	459 000
ZnS	Zn + S	173 000	—
SnS	Sn + S	160 000	—
CdS	Cd + S	142 300	—
HgS	Hg + S	45 600	—
PbS	Pb + S	87 500	—
MnS	Mn + S	260 000	—
FeS	Fe + S	97 700	—
FeS ₂	Fe + 2S	148 700	—
<i>Хлориды</i>			
NaCl	Na + $\frac{1}{2}$ Cl ₂	409 000	403 000
KCl	K + $\frac{1}{2}$ Cl ₂	442 000	424 000
NH ₄ Cl	NH ₃ газ + HCl _{газ}	175 400	159 000
NH ₄ Cl	$\frac{1}{2}$ N ₂ + 2H ₂ + $\frac{1}{2}$ Cl ₂	318 000	301 000
CuCl	Cu + $\frac{1}{2}$ Cl ₂	137 800	—
CuCl ₂	Cu + Cl ₂	216 000	263 000
AgCl	Ag + $\frac{1}{2}$ Cl ₂	128 000	62 400
MgCl ₂	Mg + Cl ₂	633 000	783 000
CaCl ₂	Ca + Cl ₂	800 000	804 000
BaCl ₂	Ba + Cl ₂	859 000	866 000
ZnCl ₂	Zn + Cl ₂	413 000	478 000
HgCl	Hg + $\frac{1}{2}$ Cl ₂	131 000	—

* Здесь принимается, что исходным является сера твердая (ромбическая).

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, кДж/кмоль	
		твердое вещество	раствор
HgCl ₂	Hg + Cl ₂	223 000	209 000
AlCl ₃	Al + $\frac{3}{2}$ Cl ₂	675 000	994 000
SnCl ₄	Sn + Cl ₂	338 500	340 000
SnCl ₂	Sn + 2Cl ₂	532 500	658 000
PbCl ₂	Pb + Cl ₂	359 000	330 400
MnCl ₂	Mn + Cl ₂	470 000	536 000
FeCl ₃	Fe + Cl ₂	344 000	419 000
FeCl ₂	Fe + $\frac{3}{2}$ Cl ₂	402 000	540 000

Нитриды, карбиды, цианиды*

Ca ₃ N ₂	3Ca + N ₂	470 000	—
CaC ₂	Ca + 2C	59 000	—
Ca(CN) ₂	Ca + 2C + N ₂	—	246 000
CuN ₂	Cu + $\frac{3}{2}$ N ₂	-267 000	—
CuCN	Cu + C + $\frac{1}{2}$ N ₂	-92 600	—
NaCN	Na + C + $\frac{1}{2}$ N ₂	94 700	92 600
AgN ₂	Ag + $\frac{3}{2}$ N ₂	-284 000	—
AgCN	Ag + C + $\frac{1}{2}$ N ₂	-132 000	—
KCN	K + C + $\frac{1}{2}$ N ₂	116 400	103 800
AlN	Al + $\frac{1}{2}$ N ₂	251 400	—
Al ₄ C ₃	4Al + 3C	1 025 000	—
Fe ₃ C	3Fe + C	-22 600	—
SiC	Si _{аморф} + C	10 450	—
HgN ₂	Hg + $\frac{3}{2}$ N ₂	-299 600	—
Hg(CN) ₂	Hg + 2C + N ₂	-266 200	-278 000

*Сульфаты***

Na ₂ SO ₄	2Na + S + 2O ₂	1 373 000	1 374 000
NaHSO ₄	Na + $\frac{1}{2}$ H ₂ + S + 2O ₂	1 120 000	1 125 000
K ₂ SO ₄	2K + S + 2O ₂	1 427 000	1 400 000

* Углерод всюду входит как С графит.

** Сера всюду входит как S ромб.

Соединение	Исходные вещества (реакции образования)	Теплота образования, ккал/моль	
		твердое вещество	раствор
KHSO ₄	$K + \frac{1}{2} H_2 + 2O_2$	1 148 000	1 130 000
(NH ₄) ₂ SO ₄	$N_2 + 4H_2 + S + 2O_2$	1 180 000	1 170 000
NH ₄ HSO ₄	$\frac{1}{2} N_2 + \frac{5}{2} H_2 + S + 2O_2$	1 024 000	1 024 000
CuSO ₄	$Cu + S + 2O_2$	467 000	530 000
MgSO ₄	$Mg + S + 2O_2$	1 264 000	1 354 000
CaSO ₄	$Ca + S + 2O_2$	1 392 000	1 411 000
BaSO ₄	$Ba + S + 2O_2$	1 424 000	1 400 000
ZnSO ₄	$Zn + S + 2O_2$	964 000	1 040 000
CdSO ₄	$Cd + S + 2O_2$	928 000	975 000
Hg ₂ SO ₄	$2Hg + S + 2O_2$	734 000	—
HgSO ₄	$Hg + S + 2O_2$	692 000	712 000
Al ₂ (SO ₄) ₃	$2Al + 3S + 6O_2$	—	3 682 000
MnSO ₄	$Mn + S + 2O_2$	1 040 000	1 101 000
FeSO ₄	$Fe + SO_2 + \frac{1}{2} O_2 + \text{вода}$	—	390 200
Fe ₂ (SO ₄) ₃	$2Fe + 3SO_2 + \frac{3}{2} O_2 + \text{вода}$	—	942 000

Нитраты, нитриты

NaNO ₂	$Na + \frac{1}{2} N_2 + \frac{3}{2} O_2$	466 000	445 000
KNO ₂	$K + \frac{1}{2} N_2 + \frac{3}{2} O_2$	500 000	465 000
NH ₄ NO ₂	$N_2 + 2H_2 + \frac{3}{2} O_2$	389 000	343 000
Cu(NO ₂) ₂	$Cu + N_2 + 3O_2$	300 000	343 800
AgNO ₂	$Ag + \frac{1}{2} N_2 + \frac{3}{2} O_2$	120 200	97 600
Ca(NO ₂) ₂	$Ca + N_2 + 3O_2$	907 000	925 000
Pb(NO ₂) ₂	$Pb + N_2 + 3O_2$	454 000	421 000
Ba(NO ₂) ₂	$Ba + N_2 + 3O_2$	955 000	916 000
NaNO ₃	$Na + \frac{1}{2} N_2 + O_2$	—	354 000
KNO ₃	$K + \frac{1}{2} N_2 + O_2$	—	366 000
NH ₄ NO ₃	$N_2 + 2H_2 + O_2$	272 000	252 000
AgNO ₃	$Ag + \frac{1}{2} N_2 + O_2$	47 400	10 460

*Карбонаты**

Na ₂ CO ₃	$2Na + C + \frac{3}{2} O_2$	1 142 000	1 165 000
---------------------------------	---------------------------------------	-----------	-----------

* Углерод вступил как С-графит.

Соединение	Исходные вещества (реакция образования)	Теплота образования, кДж/к.моль	
		твердое вещество	раствор
NaHCO ₃	$\text{Na} + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	960 000	942 000
K ₂ CO ₃	$2\text{K} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	1 176 000	1 203 000
KHCO ₃	$\text{K} + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	976 000	955 000
(NH ₄) ₂ CO ₃	$\text{N}_2 + 4\text{H}_2 + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	—	926 000
NH ₄ HCO ₃	$\frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{5}{2} \text{H}_2 + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	360 000	334 000
CuCO ₃	$\text{Cu} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	596 000	—
CaCO ₃	$\text{Ca} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	1 190 000	—
BaCO ₃	$\text{Ba} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	1 192 000	—
ZnCO ₃	$\text{Zn} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	814 000	—
PbCO ₃	$\text{Pb} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	710 000	—
FeCO ₃	$\text{Fe} + \text{C} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \dots$	719 000	—
<i>Фосфаты</i>			
Na ₃ PO ₄	$3\text{Na} + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	1 810 000	—
Na ₂ HPO ₄	$2\text{Na} + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	1 732 000	1 756 000
NaH ₂ PO ₄	$\text{Na} + \text{P} + \text{H}_2 + 2\text{O}_2 \dots$	—	1 487 000
K ₃ PO ₄	$3\text{K} + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	—	2 023 000
K ₂ HPO ₄	$2\text{K} + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	—	1 796 000
KH ₂ PO ₄	$\text{K} + \text{H}_2 + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	1 570 000	1 550 000
(NH ₄) ₂ HPO ₄	$\text{N}_2 + \frac{9}{2} \text{H}_2 + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	—	1 562 000
MgHPO ₄	$\text{Mg} + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	1 732 000	—
MgNH ₂ PO ₄	$\text{Mg} + \frac{1}{2} \text{N}_2 + 2\text{H}_2 + \text{P} + 2\text{O}_2 \dots$	3 770 000	—
Ca ₃ (PO ₄) ₂	$3\text{Ca} + 2\text{P} + 4\text{O}_2 \dots$	4 080 000	—
<i>Другие соединения*</i>			
NaF	$\text{Na} + \frac{1}{2} \text{F}_2 \dots$	673 700	571 200

* Углерод входит в виде графит.

Соединение	Исходные вещества (реакции образования)	Теплота образования, кДж/к.моль	
		твердое вещество	раствор
Na_2SiO_3	$2\text{Na} + \text{Si} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	410 000	—
KI	$\text{K} + \text{I}_{2\text{г}}$	335 000	314 000
NaClO	$\text{Na} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2$	—	346 400
NaClO_2	$\text{Na} + \frac{3}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2$	363 000	339 200
NaClO_3	$\text{Na} + 2\text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2$	420 000	406 000
KClO	$\text{K} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2$	—	359 000
KClO ₂	$\text{K} + \frac{3}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2$	402 000	360 000
KClO ₃	$\text{K} + 2\text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2$	476 000	425 000
CaF_2	$\text{Ca} + \text{F}_2$	1 222 000	—
$\text{Ca}(\text{OCl})_2$	$\text{Ca} + \text{O}_2 + \text{Cl}_2$	—	756 000
CaSiO_3	$\text{CaO} + \text{SiO}_2$	138 500	—
CaCN_2	$\text{Ca} + \text{C} + \text{N}_2$	348 300	—
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	$2\text{K} + \text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{O}_2$	949 000	875 000
K_2CrO_4	$\text{CrO}_3 + \text{K}_2\text{O}$	—	299 600
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	$2\text{CrO}_3 + \text{Na}_2\text{O}$	—	293 000
Na_2CrO_4	$\text{CrO}_3 + \text{Na}_2\text{O}$	324 300	314 400
KMnO_4	$\text{K} + \text{Mn} + 2\text{O}_2$	816 000	772 000
$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	$4\text{K} + \text{Fe} + 6\text{C} + 3\text{N}_2$	574 000	525 000
$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	$3\text{K} + \text{Fe} + 6\text{C} + 3\text{N}_2$	174 000	113 900
FeSiO_3	$\text{Fe} + \text{Si} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	1 066 000	—
Na_2MnO_4	$\text{Na}_2\text{O} + \text{Mn} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	711 000	—
$\text{NH}_2\text{-CO-ONH}_2$	$2\text{NH}_3_{\text{газ}} + \text{CO}_2_{\text{газ}}$	159 700	—
	$(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}^{\text{ж}}$	33 100	—

III. Органические соединения

Вещество	Химическая формула	Теплота образования из элементов	
		кДж/к.моль	ккал/кг
Ацетон (ж)	CH_3COCH_3	248 000	4600
Ацрилон	$\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$	— 177 400	— 998
Бензол	C_6H_6	— 54 500	— 697
Глицерин	$\text{C}_3\text{H}_8(\text{OH})_3$	657 500	7120

* Теплота образования карбамата $\text{NH}_2\text{-CO-ONH}_2$ из мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ и воды дана для жидкой фазы при 150°C.

Вещество	Химическая формула	Теплота образования из элементов	
		кДж/кмоль	кДж/кг
Глицоль	$C_2H_4(OH)_2$	467 000	7540
Гуанидиннитрат	$CN_2H_5 \cdot HNO_3$	368 200	3010
Грелучая ртуть	$Hg(CNO)_2$	- 274 000	- 964
1,5-Динитронафталин	$C_{10}H_6(NO_2)_2$	- 30 600	- 140
1,8-Динитронафталин	$C_{10}H_6(NO_2)_2$	- 19 250	- 68
2,4-Динитротолуол	$C_6H_3CH_3(NO_2)_2$	28 900	159
Диметиламин	$C_2H_5N(CH_3)_2$	- 53 800	- 444
m-Динитробензол	$C_6H_4(NO_2)_2$	16 750	100
Коллодий	$C_{10}H_{11}(ONO_2)_2O_{11}$	2 680 000	2340
Клетчатка	$(C_6H_{10}O_5)_x$	113 000	6990
m-Крезол	$C_6H_4CH_3OH$	150 700	1372
Ксилол	$C_6H_4(CH_3)_2$	16 750	147
Крахмал	$(C_6H_{10}O_5)_x$	-	6750
Кислота муравьиная (г)	HCOOH	363 000	7900
Кислота муравьиная (ж)	»	410 000	8900
» уксусная (г)	CH_3COOH	437 000	7280
» » (ж)	»	488 000	8140
d-Маннит	$C_6H_{12}(OH)_6$	1 325 000	7280
Нафталин	$C_{10}H_8$	- 176 000	-
Тринитроглицерин	$C_3H_5(ONO_2)_3$	346 300	1523
Нитромагнит	$C_6O_8(NO_2)_6$	637 000	1410
o-Нитротолуол	$C_6H_4CH_3NO_2$	35 200	256
p-Нитрофенол	$C_6H_4NO_2OH$	230 000	1650
Нитронафталин	$C_{10}H_7NO_2$	- 36 280	- 211
Пироксилин (13% N)	$C_{10}H_{10}(ONO_2)_4O_6$	2 750 000	2403
Пикриновая кислота	$C_6H_3(NO_2)_3OH$	210 500	-
Пикрат калия	$C_6H_3(NO_2)_3OK$	492 000	1845
Резорцин	$C_6H_4(OH)_2$	360 200	3280
Спирт метиловый (г)	CH_3OH	201 600	6300
» » (ж)	»	239 000	8550
» этиловый (г)	C_2H_5OH	- 236 000	5620
» » (ж)	»	278 000	6040
Толуол	$C_6H_5CH_3$	33 520	- 378

Вещество	Химическая формула	Теплота образования из элементов	
		кДж/кмоль	кДж/кг
1, 3, 5-Тринитробензол	$C_6H_3(NO_2)_3$	9 640	46
2, 4, 6-Тринитротолуол	$C_6H_2CH_3(NO_2)_3$	54 500	248
2, 4, 6-Тринитрофенол	$C_6H_2(NO_2)_3OH$	224 000	964
Тринитрокрезол	$C_6HCH_3(NO_2)_3OH$	220 800	910
Гетрил	$C_6H_2(NO_2)_3NCH_3NO_2$	— 39 000	— 136
Терпентин	$C_{10}H_{16}$	76 000	200
Фенол	C_6H_5OH	14 670	1560
Формальдегид	$HCHO$	116 000	3870
Щавелевая кислота	$H_2C_2O_4$	825 000	—
Эфир серный	$C_2H_5OC_2H_5$	274 000	—

IV. Полимеры

Исходное вещество (мономер)		Полимер (химическая формула)	Тепловой эффект полимеризации (опытные данные)	
наименование	химическая формула		кДж/кмоль*	кДж/кг
Этилен	C_2H_4	$[-CH_2-CH_2-]_x$ (г)	93 500	3340
		» (ж)	109 100	3900
		» (ТВ)	116 400	4160
Стирол	$C_6H_5-CH=CH_2$	$[-CH-CH_2-]_x$ C_6H_5	68 700	660
Изопрен	$CH_2=C(CH_3)-CH=CH_2$	$[-CH_2-C(CH_3)=CH-CH_2-]_x$	75 000	1100
изо-Бутилен	$(CH_3)_2C=CH_2$	$[-C(CH_3)_2-CH_2-]_x$	52 800	945
Винилацетат	$CH_3COO-CH=CH_2$	$[-CH-CH_2-]_x$ CH_3COO	89 300	1040
Метилметакрилат	$CH_2=C(CH_3)COOCH_3$	$[-CH_2-C(CH_3)-]_x$ $COOCH_3$	54 500	545

* Из расчета на мономер.

Теплоты 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 ккал/кг моль
Углерод	Графит	C	395 000
»	Кокс	C	406 000
Окись углерода	г	CO	285 500
Водород	г	H ₂	286 000
Сероводород	г	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
изо-Бутан	»	C ₄ H ₁₀	2 879 000
Пентан	»	C ₅ H ₁₂	3 542 000
изо-Пентан	»	C ₅ H ₁₂	3 516 000
»	ж	C ₆ 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	г	C ₃ H ₆ =CH ₂	2 056 000
изо-Бутилен	г	C ₄ H ₈ =CH ₂	3 710 000
Амилен	ж	C ₅ H ₁₀ =CH ₂	3 364 000
Гексилен	г	C ₆ H ₁₂ =CH ₂	3 996 000
Ацетилен	г	CH≡CH	1 308 000
Аллилен	г	CH ₂ —C≡CH	1 946 000
Триметилен (циклопропан)	г	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{CH}_2 \end{array}$	2 080 000

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания, кДж/моль
Циклопентан	ж		3 284 000
Циклогексан	»		3 940 000
Циклогептан	»		4 550 000
Бензол	л	C_6H_6	3 300 000
	ж	C_6H_6	3 280 000
Толуол	»	$C_6H_5CH_3$	3 922 000
Ксиол, орто-	»	$C_6H_4(CH_3)_2$	4 580 000
мета-	»	$C_6H_4(CH_3)_2$	4 560 000
пара-	»	$C_6H_4(CH_3)_2$	4 555 000
Мезитилен	ж	$C_6H_2(CH_3)_3$	5 210 000
Нафталин	тв.	$C_{10}H_8$	5 155 000
Дифенил	»	$C_6H_5-C_6H_5$	6 255 000
Антрацен	»	$C_{14}H_{10}$	7 108 000
Фенантрен	»	$C_{14}H_{10}$	7 100 000
Камфен	»	$C_{10}H_{16}$	6 150 000
<i>Спирты</i>			
Метилловый	ж	CH_3OH	712 600
Этиловый	»	C_2H_5OH	1 373 000
Пропиловый	»	C_3H_7OH	1 793 000
изо-Пропиловый	»	C_3H_7OH	1 990 000
Бутиловый	»	C_4H_9OH	2 678 000
Амиловый	»	$C_5H_{11}OH$	3 298 000
Этиленгликоль	»	CH_2OH-CH_2OH	1 177 000
Глицерин	»	$CH_2OH-CH_2OH-CH_2OH$	1 588 000
Аллиловый	»	$CH_2=CH-CH_2OH$	1 855 000

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания, кДж/кмоль
<i>Кислоты</i>			
Муравьиная	ж	НСООН	263 200
Уксусная	»	С ₂ Н ₃ СООН	872 000
Пропионовая	»	С ₃ Н ₅ СООН	1 529 000
Масляная	»	С ₃ Н ₇ СООН	2 180 000
Щавелевая	тв.	СООН — СООН	252 000
Пальмитиновая	»	С ₁₅ О ₃₁ СООН	9 976 000
Олеиновая	»	С ₁₇ Н ₃₃ СООН	10 920 000
Стеариновая	ж	С ₁₇ Н ₃₅ СООН	11 280 000
Гликолевая	тв.	СН ₂ (ОН) — СООН	698 000
Молочная	»	С ₂ Н ₄ (ОН) — СООН	1 365 000
D-Винная	»	СООН — (СНОН) ₂ — — СООН	1 151 000
Лимонная	»	(СН ₂ СООН) ₂ — — С(ОН) СООН	1 985 000
Бензойная	»	С ₆ Н ₅ СООН	3 236 000
o-Фталевая	»	С ₆ Н ₄ (СООН) ₂	3 232 000
o-Толуидиновая	»	С ₆ Н ₄ (СН ₃) СООН	3 892 000

Углеводы

Глюкоза (декстроза)	тв.	С ₆ Н ₁₂ О ₆	2 820 000
L-Фруктоза	»	С ₆ Н ₁₂ О ₆	2 830 000
Лактоза	»	С ₁₂ Н ₂₂ О ₁₁	5 670 000
Сахароза	»	С ₁₂ Н ₂₂ О ₁₁	5 650 000
Ацетилцеллюлоза	»	—	18 830*
Декстрин	»	—	17 200*
Крахмал	»	—	17 520*
Целлюлоза	»	—	17 530*

* Удельная теплота сгорания, кДж/кг.

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания, кДж/кмоль
------------	-----------	---------	--------------------------------

Другие кислородные соединения

Формальдегид	г	CH_2O	561 000
Ацетальдегид	»	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	1 171 000
Ацетон	ж	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	1 790 000
Метилацетат	г	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	1 665 000
Этилацетат	»	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	2 280 000
	ж	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	2 255 000
Серный эфир	»	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2 730 000
Фенол	тв.	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	3 068 000
Пирогаллол	»	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3$	2 680 000
Амилацетат	ж	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	4 360 000
Камфора	тв.	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	5 890 000

Соединения, содержащие азот

Мочевина	тв.	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	637 000
Триметиламин	ж	$\text{N}(\text{CH}_3)_3$	2 422 000
Пиридин	»	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	2 764 000
1,3,5-Тринитробензол	тв.	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_3$	2 780 000
1,4,6-Тринитрофенол	»	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})(\text{NO}_2)_3$	2 600 000
Нитробензол	ж	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	3 096 000
о-Нитрофенол	тв.	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{NO}_2$	2 804 000
о-Динитробензол	»	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{NO}_2)_2$	2 946 000
Анилин	ж	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	3 402 000
2,4,6-Тринитротолуол	тв.	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{CH}_3)(\text{NO}_2)_3$	3 440 000
Никотин	ж	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2$	5 930 000

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания, кДж/к.моль
------------	-----------	---------	------------------------------

Соединения, содержащие серу

Сероводород	г	H_2S	580 000
Сероводород	ж	H_2S	580 000
Сероводород	ж	CS_2	1 032 000
Метилмеркаптан	г	CH_3SH	1 243 000
Диметилсульфид	ж	$(CH_3)_2S$	1 910 000
Этилмеркаптан	ж	C_2H_5SH	1 892 000

Галогенопроизводные

Четыреххлористый углерод	г	CCl_4	186 500
Четыреххлористый углерод	ж	CCl_4	156 200
Хлороформ	г	$CHCl_3$	404 000
	ж	$CHCl_3$	474 000
Хлористый метил	ж	CH_3Cl	687 000
	г	C_2H_5Cl	1 348 000
Хлоруксусная кислота	тв	$CH_2ClCOOH$	716 000

Температурная зависимость теплового эффекта и константы равновесия важнейших химических реакций при нормальном давлении

№ п.п.	Реакция и ее тепловой эффект при 20° в кдж*	Константа равновесия	$q = q_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 = (-4,574 q_0 + 1,98' \alpha' T + 4,574\beta' T^2 + 4,574\gamma' T^3) \cdot 4,1868 \text{ кдж}^{**}$ $\lg K_p = \frac{-q_0}{T} + \alpha' \lg T + \beta' T + \gamma' T^2 + C$
1	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 =$ $= 2\text{H}_2\text{O} + 48440$	$K_p = \frac{P_{\text{H}_2}^2 \cdot P_{\text{O}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^2}$	$q = 114025 + 6,24 T - 0,001844 T^2 + 0,158 \cdot 10^{-6} T^3) 4,1868$ $\lg K_p = \frac{-25116,1}{T} + 0,9468 \lg T + 0,00072167 - 0,1618 \cdot 10^{-6} T^2 + 1,714$
2	$\text{H}_2 + \text{Cl}_2 =$ $= 2\text{HCl} + 18440$	$K_p = \frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{Cl}_2}}{P_{\text{HCl}}^2}$	$q = (43738 + 0,9 T + 0,5 \cdot 10^{-6} T^2) 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{9586}{T} + 0,44 \lg T - 2,16$
3	$2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} =$ $= 4\text{HCl} + \text{O}_2 - 116000$	$K_p = \frac{P_{\text{HCl}}^4 \cdot P_{\text{O}_2}}{P_{\text{Cl}_2}^2 \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}^2}$	$q = (-26550 - 4,44 T + 0,001854 T^2 - 0,158 \cdot 10^{-6} T^3) 4,1868$ а) $\lg K_p = -\frac{5750}{T} + 2,136 \lg T + 0,000357 T - 0,0683 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,296$ б) $\lg K_p = -\frac{6010}{T} + 1,02 \lg T - 0,0024 T - 5,83$
4	$\text{Cl}_2 + \text{CO} =$ $= \text{COCl}_2 + 109700$	$K_p = \frac{P_{\text{Cl}_2} \cdot P_{\text{CO}}}{P_{\text{COCl}_2}}$	значение q см. примечание 1 (стр. 506) $K_p = -\frac{5020}{T} + 1,75 \lg T - 1,158$

5	$C + O_2 = CO_2 + 409500$	$K_p = \frac{p_{O_2}}{p_{CO_2}}$	$q = (97853 - 0,469 T + 0,000879 T^2 + 0,62 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{20582,8}{T} + 0,302 \lg T - 0,000143 T +$ $+ 0,0196 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,62$
6	$2C + O_2 = 2CO + 248700$	$K_p = \frac{p_{O_2}}{p_{CO}^2}$	$q = (60320 - 4,2987 T + 0,003594 T^2 + 1,25 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{11635,1}{T} - 2,1656 \lg T + 0,0009394 T -$ $- 0,1064 \cdot 10^{-6} T^2 - 3,394$
7	$C + 2H_2 = CH_4 + 77870$	$K_p = \frac{p_{H_2}^2}{p_{CH_4}}$	$q = (15713 + 11,3517 T - 0,00673 T^2 + 2,182 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{3140}{T} + 5,58 \lg T - 0,001777 T -$ $- 13,1 \cdot 10^{-6} T^2 - 11,3$
8	$2C + 2H_2 = C_2H_2 - 87510$	$K_p = \frac{p_{C_2H_2}}{p_{H_2}^2}$	$q = (-18000 - 11,1 T + 0,00465 T^2 + 0,8 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{3540}{T} - 5,589 \lg T + 0,001025 T +$ $+ 0,175 \cdot 10^{-6} T^2 + 13,04$
9	$2C + H_2 = C_2H_2 - 229400$	$K_p = \frac{p_{C_2H_2}}{p_{H_2}}$	$\lg K_p = -\frac{1190}{T} + 2,37$ (приближенно)

№ п.п.	Реакция и ее тепловой эффект при 20° в кдж	Константа равновесия	$q = q_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 = (-4,574 q_0' + 1,98\alpha' T + 4,574 \beta' T^2 + 4,574 \gamma' T^3) \cdot 4,1868 \text{ кдж}^{**}$ $\lg K_p = -\frac{q_0'}{T} + \alpha' \lg T + \beta' T + \gamma' T^2 + C$
10	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{CO} + \text{H}_2 - 118000$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$q = (-26853 - 5,269 T + 0,002719 T^2 + 0,546 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{6740,5}{T} + 1,5561 \lg T - 1,092 \cdot 10^{-4} T -$ $-0,028 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,554$
11	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} =$ $= \text{CO}_2 + 2\text{H}_2 - 74940$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}$	$q = (16172 - 6,709 T + 0,002723 T^2 + 0,462 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{4533,3}{T} + 0,6446 \lg T + 0,0008646 T +$ $+ 0,1814 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,336$
12	$\text{C} + \text{CO}_2 =$ $= 2\text{CO} - 161000$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}}^2}{p_{\text{CO}_2}}$	$q = (-37533 - 3,829 T + 0,002715 T^2 + 0,63 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\text{a) } \lg K_p = -\frac{8947,7}{T} + 2,4673 \lg T - 0,0010824 T +$ $+ 0,116 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,772$ $\text{б) } \lg K_p = -\frac{8200}{T} + 1,75 \lg T - 0,006 T + 3,8$ <p style="text-align: center;">(приближенно)</p>
13	$\text{C} + \text{S}_2_{\text{газ}} = \text{CS}_2 + 52400$	$K_p = \frac{[\text{S}_2]}{[\text{CS}_2]}$	$\lg K_p = -\frac{1890}{T} + 1,75 \lg T - 1,56$ <p style="text-align: center;">(приближенно)</p>

14	$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 571000$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}^2 \cdot p_{\text{O}_2}}{p_{\text{CO}}^2}$	$q = (135386 + 3,36 T - 0,001836 T^2 - 0,01 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = - \frac{29530,5}{T} + 2,769 \lg T - 0,001225 T + 0,1356 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,150$
15	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2 + 43000$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{CO}_2}}$	$q = (10681 - 1,44 T - 0,4 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,084 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ <p>a) $\lg K_p = - \frac{2203,24}{T} - 5,1588 \cdot 10^{-5} T - 2,5426 \cdot 10^{-7} T^2 + 7,461 \cdot 10^{-11} T^3 + 2,3$</p> <p>б) $\lg K_p = - \frac{2059}{T} + 1,5904 \lg T - 1,817 \cdot 10^{-3} T + 5,65 \cdot 10^{-7} T^2 - 8,24 \cdot 10^{-11} T^3 - 1,5313$</p>
16	$\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}_{г\text{аз}} + 90690$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_3\text{OH}}}$	$\lg K_p = - \frac{3724}{T} + 9,1293 \lg T - 0,00308 T - 13,412$
17	$\text{CO} + \text{H}_2 = \text{HCHO}_{г\text{аз}} + 3640$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2}}{p_{\text{HCHO}}}$	$\lg K_p = - \frac{374}{T} + 5,431 \text{ (приближенно)}$

№ п.п.	Реакция и ее тепловой эффект при 20° в кДж	Константа равновесия	$q_0 = q_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 = (-4,574\alpha' + 1,98\alpha' T + 4,574\beta'T^2 + 4,574\gamma'T^3) \cdot 4,1868 \text{ кДж}$ $\lg K_p = -\frac{q_0'}{T} + \alpha' \lg T + \beta'T + \gamma'T^3 + C$
18.	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2 - 19570\text{J}$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2}^3}{p_{\text{CH}_4} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$q = (-42566 - 16,62 T + 0,00945 T^2 - 1,636 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{9874}{T} + 7,14 \lg T - 0,00188 T + 0,094 \cdot 10^{-5} T^2 - 8,64$
19	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2 - 152820$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2}^4}{p_{\text{CH}_4} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^2}$	$q = (-31885 - 18,060 T + 0,009453 T^2 - 1,72 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{7674}{T} + 6,23 \lg T - 0,000906 T - 0,0546 \cdot 10^{-6} T^2 - 8,72$
20	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2 - 238650$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}}^2 \cdot p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_4} \cdot p_{\text{CO}_2}}$	$q = (-53246 - 15,18 T + 0,008445 T^2 - 1,552 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{11087,7}{T} + 3,1127 \lg T - 0,0028524 T + 13,216 \cdot 10^{-6} T^2 - 8,528$
21	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 59700$	$K_p = \frac{p_{\text{C}_2\text{H}_4} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}$	$\lg K_p = -\frac{1090}{T} + 4,71 \lg T - 0,00235 T - 7,05$
22	$\text{C}_6\text{H}_6 + 3\text{H}_2 = \text{C}_6\text{H}_{12} + 348\,560 \text{ теплота испарения циклогексана}$	$K_p = \frac{p_{\text{C}_6\text{H}_6} \cdot p_{\text{H}_2}^3}{p_{\text{C}_6\text{H}_{12}}}$	$\lg K_p = -\frac{9590}{T} + 9,9194 \lg T - 0,002285 T - 8,565$

23	$\begin{aligned} & \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = \\ & = \text{CH}_3\text{CHO} + \text{H}_2 - 29730 \end{aligned}$	$K_p = \frac{p_{\text{CH}_3\text{CHO}} p_{\text{H}_2}}{p_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}$	$\lg K_p = -\frac{2492}{T} + 2,0132 \lg T - 2,186$
24	$\begin{aligned} & 2\text{S} = \text{S}_2 + 502420 \\ & (\text{см. примечание 2,} \\ & \text{стр. 506}) \end{aligned}$	$K_c = \frac{[\text{S}]^2}{[\text{S}_2]}$	$\lg K_c = -\frac{26250}{T} + 8,58$
25	$\begin{aligned} & 3\text{S}_2 = \text{S}_6 + 268000 \\ & (\text{см. примечание 2,} \\ & \text{стр. 505}) \end{aligned}$	$K_p = \frac{p_{\text{S}_2}^3}{p_{\text{S}_6}}$	$\lg K_p = -\frac{14000}{T} + 3,5 \lg T + 5,325$
26	$\begin{aligned} & 4\text{S}_6 = 3\text{S}_8 + 121500 \\ & (\text{см. примечание 2,} \\ & \text{стр. 506}) \end{aligned}$	$K_p = \frac{p_{\text{S}_6}^4}{p_{\text{S}_8}^3}$	$\lg K_p = -\frac{6340}{T} + 1,75 \lg T + 3,86$
27	$\frac{1}{2} \text{S}_2 + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{S} + 82600$	$K_p = \frac{p_{\text{H}_2} \sqrt{p_{\text{S}_2}}}{p_{\text{H}_2\text{S}}}$	$\begin{aligned} \lg K_p = & -\frac{4200}{T} + 0,474 \lg T + 0,000361T + \\ & + 0,081 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,36 \end{aligned}$

№ п.п.	Реакция и ее тепловой эффект при 20° С в кДж*	Константа равновесия	$q_0 = q_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 = (-4,574 q_0' + 1,98 \alpha' T + 4,574 \beta' T^2 + 4,574 \gamma' T^3) \cdot 4,1868 \text{ кДж}$ $\lg K_p = -\frac{q_0}{T} + \alpha' \lg T + \beta' T + \gamma' T^2 + C$
28	$2\text{SO}_2 + \text{O}_2 =$ $= 2\text{SO}_3 + 191760$	$K_p = \frac{p_{\text{SO}_2}^2 \cdot p_{\text{O}_2}}{p_{\text{SO}_3}^2}$	а) $\lg K_p = -\frac{9480}{T} + 6,38 \lg T - 0,0049T - 5,41$ б) $\lg K_p = -\frac{9230}{T} + 1,75 \lg T + 3,4$ (приближенно) в) $\lg K_p = -\frac{10373}{T} - 1,222 \lg T + 13,80$ (приближенно)
29	$2\text{SO}_2 + 4\text{H}_2 =$ $= \text{S}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 267000$	$K_p = \frac{p_{\text{SO}_2}^2 \cdot p_{\text{H}_2}^4}{p_{\text{H}_2\text{O}}^4 \cdot p_{\text{S}_2}}$	$\lg K_p = -\frac{13810}{T} - 0,877 \lg T + 0,0026T -$ $-0,46 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,38$
30	$2\text{SO}_2 + 4\text{CO} =$ $= \text{S}_2 + 4\text{CO}_2 + 439000$	$K_p = \frac{p_{\text{SO}_2}^2 \cdot p_{\text{CO}}^4}{p_{\text{CO}_2}^4 \cdot p_{\text{S}_2}}$	$\lg K_p = -\frac{23000}{T} + 4,34 \lg T - 1,62 \cdot 10^{-3} T +$ $+ 0,23 \cdot 10^{-6} T^2 - 2,43$
31	$\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{H}_2\text{SO}_4 + 89300$	$K_c = \frac{[\text{H}_2\text{O}] \cdot [\text{SO}_3]}{[\text{H}_2\text{SO}_4]}$	значение q см. примечание 1, стр. 506 $\lg K_c = -\frac{5000}{T} + 0,75 \lg T - 0,00057 T + 4,086$

32	$\text{N}_2 + \text{O}_2 =$ $= 2\text{NO} - 180\,900$	$K_p = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{N}_2} \cdot p_{\text{O}_2}}$	$\text{a) } \lg K_p = -\frac{9397}{T} - 1,75 \lg T + 0,0068 T -$ $- 2,97 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,442 \cdot 10^{-9} T^3 - 1,6$ $\text{б) } \lg K_p = -\frac{10900}{T} + 1,26 \text{ (приближенно)}$
33	$\frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{3}{2} \text{H}_2 =$ $= \text{NH}_3 + 46100$	$K_p = \frac{V \sqrt{p_{\text{N}_2} \cdot p_{\text{H}_2}^3}}{p_{\text{NH}_3}}$	$q = (9110 + 7,55T - 0,003975T^2 + 0,67 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $q' = \left[9840 + \left(2,4 \cdot 10^{-3} + \frac{3,48}{T} + \frac{1,89 \cdot 10^6}{T^3} \right) P^{***} + 2,24T + \right.$ $\left. + 10,57 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,17 \cdot 10^{-6} T^3 \right] \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{2074,8}{T} + 2,4943 \lg T + \beta T -$ $- 0,18564 \cdot 10^{-6} T^2 + J \text{ (значения } \beta \text{ и } J \text{ см. примечание 3,}$ стр. 506)
34	$2\text{NO} + \text{O}_2 =$ $= 2\text{NO}_2 + 109040$	$K_p = \frac{p_{\text{NO}_2}^2 \cdot p_{\text{O}_2}}{p_{\text{NO}}^2}$	<p>значение q см. примечание 1, стр. 506</p> $\lg K_p = -\frac{5749}{T} + 1,75 \lg T - 0,0005T + 2,839$
35	$2\text{NO}_2 = \text{N}_2\text{O}_4 + 56940$	$K_p = \frac{p_{\text{N}_2\text{O}_4}^2}{p_{\text{NO}_2}}$	<p>значение q см. примечание 1, стр. 506</p> $\lg K_p = -\frac{2692}{T} = 1,75 \lg T + 0,00483 T -$ $- 7,144 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,062$

№ п.п.	Реакция и ее тепловой эффект при 20° С в кдж*	Константа равновесия	$a = a_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 = (-4,574 a_0) + 1,98 \alpha' T + 4,574 \beta' T^2 + 4,574 \gamma' T^3 \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{q_0}{T} + \alpha' \lg T + \beta' T + \gamma' T^2 + C$
36.	$4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 = 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O} + 907300$	$K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}^4 \cdot p_{\text{O}_2}^5}{p_{\text{NO}}^4 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^6}$	$q = (219180 - 11,20 T + 0,01007 T^2 - 2,13 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{47500}{T} - 1,75 \lg T - 8,4$
37	$4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 = 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 126920$	$K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}^4 \cdot p_{\text{O}_2}^3}{p_{\text{N}_2}^2 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^6}$	$q = (305495 - 11,30 T + 0,011327 T^2 - 2,173 \cdot 10^{-6} T^3) \cdot 4,1868$ $\lg K_p = -\frac{66250}{T} - 1,75 \lg T - 5,2$
38	$2\text{Me} + \text{O}_2 = 2\text{MeO} + q$ (см. примечание 4, стр. 507)	$K_p = p_{\text{O}_2}$	$\lg K_p = -\frac{q}{4,573 T} + 1,75 \lg T + 2,8$
39	$\text{MeCO}_3 = \text{MeO} + \text{CO}_2 - q$ (см. примечание 4, стр. 506)	$K_p = p_{\text{CO}_2}$	$\lg K_p = -\frac{q}{4,573 T} + 1,75 \lg T + 3,2$
40	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2 - 22400$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}}$	$\lg K_p = -\frac{1373}{T} - 0,341 \lg T + 0,41 \cdot 10^{-3} T + 2,303$
41	$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2 + 13190$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K_p = -\frac{381}{T} + 2,110 \lg T - 0,395 \cdot 10^{-3} T - 5,357$

42	$\begin{aligned} \text{PbO} + \text{CO} &= \\ &= \text{Pb} + \text{CO}_2 + 65100 \end{aligned}$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K_p = -\frac{3250}{T} + 0,417 \cdot 10^{-3} T + 0,3$
43	$\begin{aligned} \text{Cu}_2\text{O} + \text{CO} &= \\ &= 2\text{Cu} + \text{CO}_2 + 119880 \end{aligned}$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\begin{aligned} \lg K_p &= -\frac{5980}{T} + 0,74 \lg T - 0,306 \cdot 10^{-3} T + \\ &+ 0,11 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,53 \end{aligned}$
44	$\begin{aligned} \text{ZnO} + \text{CO} &= \\ &= \text{Zn}_{\text{газ}} + \text{CO}_2 - 193850 \end{aligned}$	$K_p = \frac{p_{\text{Zn}} \cdot p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}}$	$\begin{aligned} \lg K_p &= -\frac{10360}{T} - 0,348 \lg T - 0,72 \cdot 10^{-3} T + \\ &+ 0,137 \cdot 10^{-6} T^2 + 8,36 \end{aligned}$
45	$\begin{aligned} \text{MgO} + \text{C} &= \text{Mg}_{\text{газ}} + \\ &+ \text{CO} - 680360 \end{aligned}$	$K_p = p_{\text{Mg}} \cdot p_{\text{CO}}$	$\lg K_p = -\frac{35520}{T} + 10,33 \text{ (приближенно)}$

* При значении Δ в кДж исходные вещества и продукты реакции должны быть выражены в к.моль.
 ** В расчетной практике коэффициент перевода ккал в кДж принимается обычно равным 4,2.
 *** R в кДж/м³.

Содержание

Введение	3
Глава 1	
Понятия и расчет основных технологических показателей.	
Материальный баланс необратимых химико-технологических процессов	4
Глава 2	
Понятие равновесия в ХТП. Значение K_p .	
Материальный баланс для обратимых процессов	34
Глава 3	
Газовые законы и использование их в технологических расчетах	47
Глава 4	
Основные понятия, принцип составления теплового баланса химико-технологического процесса	68
Глава 5	
Расчеты производственных процессов и задачи, решаемые на их основе	99
Заключение	148
Литература	149
Приложения	150

Учебное издание

АНДРЕЕВА Раиса Александровна
ЕЛЬШИНА Инна Александровна

ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Сборник задач
для студентов специальности 1-36 07 01
«Машины и аппараты химических производств
и предприятий строительных материалов»

Редактор *Т. А. Дарьянова*
Дизайн обложки *Е. Н. Бурцевой*

Подписано в печать 08.10.15. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 11,83. Уч.-изд. л. 11,52. Тираж 50 экз. Заказ 1272.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.14.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.