

Федеральное агентство по образованию  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого  
Факультет естественных наук и природных ресурсов  
Кафедра химии и экологии.

**ПРИНЦИП СОСТАВЛЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО (ТЕПЛОВОГО) БАЛАНСА  
И ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ХИМИКО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Учебное пособие*

**В. Новгород  
2006г**

Составитель: Грошева Л. П.

Учебное пособие «Принципы составления энергетического (теплового) баланса и тепловые расчеты химико-технологических процессов» подготовлено в соответствии с общей программой обучения студентов по группе специальностей 240301 – «Химическая технология неорганических веществ».

Пособие содержит теоретические обоснования, примеры тепловых расчетов и принципы составления энергетического баланса при получении минеральных удобрений и других неорганических веществ.

Пособие также включает контрольные задания для студентов.

УДК (661.2 +661.5 +661.63+661.9:66 –971(042.4)

© Новгородский государственный университет, 2006

© Грошева Л.П., 2006

**Содержание**

Введение .....	4
1 Принцип составления энергетического (теплового) баланса .....	5
2 Расчет теплот химических и физических превращений .....	8
3 Расчет теплового баланса промышленных процессов .....	10
4 Контрольные задания .....	13

## Введение

Учебное пособие предназначено для студентов при выполнении расчетных работ по курсу «Химическая технология неорганических веществ».

Прежде чем приступить к конструированию какого-либо аппарата химического производства необходимо произвести подробный теххимический расчет всего процесса производства или той его части, которая непосредственно связана с конструируемым аппаратом. В основу любого теххимического расчета положены два основных закона: закон сохранения массы вещества и закон сохранения энергии. На первом из этих законов базируется всякий материальный, на втором – всякий энергетический, в том числе и тепловой, балансы.

Закон сохранения энергии формулируется так: в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна; энергия не может ни исчезнуть бесследно, ни возникнуть из ничего; она может только перейти в строго эквивалентное количество другого вида энергии. Так как теплота представляет собой один из видов энергии, то в случае, если она в данном аппарате не превращается в другой вид энергии, этот закон может быть сформулирован следующим образом: приход теплоты в данном цикле производства должен быть точно равен расходу ее в этом же цикле. При этом должно быть учтено теплосодержание каждого компонента, как входящего, так и выходящего из процесса или аппарата, а также теплообмен с окружающей средой.

Изменение, которое претерпевает в процессе производства вещество, может быть или физическим, в результате которого вещество меняет только свои физические свойства или же химическим, в результате которого вещество претерпевает изменения химического состава. Таким образом, прежде чем приступить к составлению материального и теплового баланса того или иного технологического процесса, необходимо ясно и четко представлять себе закономерности этого процесса.

## 1 Принцип составления энергетического (теплового) баланса

Энергетический (тепловой) баланс любого аппарата может быть представлен в виде уравнения, связывающего приход и расход энергии (тепла) процесса (аппарата). Энергетический баланс составляется на основе закона сохранения энергии, в соответствии с которым в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна. Обычно для химических процессов составляется тепловой баланс. Уравнение теплового баланса:

$$\Sigma Q_{\text{пр}} = \Sigma Q_{\text{расх}} \quad (1.1)$$

или 
$$\Sigma Q_{\text{пр}} - \Sigma Q_{\text{расх}} = 0 \quad (1.2)$$

Применительно к тепловому балансу закон сохранения энергии формулируется следующим образом: приход теплоты в данном аппарате (или производственной операции) должен быть равен расходу теплоты в том же аппарате (или операции).

Для аппаратов (процессов) непрерывного действия тепловой баланс, как правило, составляют на единицу времени, а для аппаратов (процессов) периодического действия – на время цикла (или отдельного перехода) обработки.

Тепловой баланс рассчитывают по данным материального баланса с учетом тепловых эффектов (экзотермических и эндотермических) химических реакций и физических превращений (испарение, конденсация и т.п.), происходящих в аппарате с учетом подвода теплоты извне и отвода ее с продуктами реакции, а также через стенки аппарата.

Тепловой баланс подобно материальному выражают в виде таблиц, диаграмм, а для расчета используют следующее уравнение

$$Q_{\text{т}} + Q_{\text{ж}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{р}} + Q_{\text{п}} = Q'_{\text{т}} + Q'_{\text{ж}} + Q'_{\text{г}} + Q'_{\text{ф}} + Q'_{\text{р}} + Q'_{\text{п}} \quad (1.3)$$

где  $Q_{\text{т}}$ ,  $Q_{\text{ж}}$ ,  $Q_{\text{г}}$  – количество теплоты, вносимое в аппарат твердыми, жидкими и газообразными веществами соответственно;  $Q'_{\text{т}}$ ,  $Q'_{\text{ж}}$ ,  $Q'_{\text{г}}$  – количество теплоты, уносимое из аппарата выходящими продуктами и полупродуктами реакции и не прореагировавшими исходными веществами в твердом, жидком и газообразном виде;  $Q_{\text{ф}}$  и  $Q'_{\text{ф}}$  – теплота физических процессов, происходящих с выделением и поглощением ( $Q'_{\text{ф}}$ ) теплоты;  $Q_{\text{р}}$  и  $Q'_{\text{р}}$  – количество теплоты, выделяющееся в результате экзо- и эндотермических реакций ( $Q'_{\text{р}}$ );  $Q_{\text{п}}$  – количество теплоты, подводимое в аппарат извне (в виде дымовых газов, нагретого воздуха, сжигания топлива, электроэнергии и т.п.);  $Q'_{\text{п}}$  – потери тепла в окружающую среду, а также отвод тепла через холодильники, помещенные внутри аппарата.

Величины  $Q_{\text{т}}$ ,  $Q_{\text{ж}}$ ,  $Q_{\text{г}}$ ,  $Q'_{\text{т}}$ ,  $Q'_{\text{ж}}$ ,  $Q'_{\text{г}}$  рассчитывают для каждого вещества, поступающего в аппарат и выходящего из него по формуле:

$$Q = Gct \quad (1.4)$$

где  $G$  – количество вещества,  $c$  – средняя теплоемкость этого вещества;  $t$  – температура, отсчитанная от какой-либо точки (обычно от  $0^{\circ}\text{C}$ ).

Теплоемкости газов в Дж/(кмоль·К), участвующих в процессе, для данной температуры в  $^{\circ}\text{C}$  (или  $T$ , К) можно подсчитать, пользуясь формулой:

$$C = a_0 + a_1T + a_2T^2 \quad (1.5)$$

Коэффициенты  $a_0, a_1, a_2$  – приведены в справочниках.

Чаще всего приходится иметь дело со смесями веществ. Поэтому в формулу (1.4) подставляют теплоемкость смеси  $C_{\text{см}}$ , которая может быть вычислена по закону аддитивности. Так, для смеси трех веществ в количестве  $G_1, G_2$  и  $G_3$ , имеющих теплоемкости  $c_1, c_2$  и  $c_3$

$$c_{\text{см}} = G_1c_1 + G_2c_2 + G_3c_3 / G_1 + G_2 + G_3 \quad (1.6)$$

Суммарная теплота физических процессов, происходящих в аппаратах, может быть рассчитана по уравнению:

$$Q_{\phi} = G_1r_1 + G_2r_2 + G_3r_3 \quad (1.7)$$

где  $r_1, r_2$  и  $r_3$  – теплота фазовых переходов;  $G_1, G_2$  и  $G_3$  – количества компонентов смеси, претерпевших фазовые переходы в данном аппарате.

Количество членов в правой части уравнения (1.7) должно соответствовать числу индивидуальных компонентов, изменивших в аппарате свое фазовое состояние.

Аналогично рассчитывается расход теплоты на те физические процессы, которые идут с поглощением теплоты ( $Q'_{\phi}$ ): десорбция газов, парообразование, плавление, растворение и т.п. Тепловые эффекты химических реакций могут быть рассчитаны на основе теплот образования или теплот сгорания веществ, участвующих в реакции. Так, по закону Гесса тепловой эффект реакции определяется как разность между теплотами образования всех веществ в правой части уравнения и теплотами образования всех веществ, входящих в левую часть уравнения.

Например, для модельной реакции:  $A + B = D + F + q_p$  изобарный тепловой эффект будет:

$$q_p^- = Q_{\text{обр}D} + Q_{\text{обр}F} - (Q_{\text{обр}A} + Q_{\text{обр}B}) \quad (1.8)$$

Изобарные теплоты образования из элементов различных веществ  $q_{\text{обр}}^-$  (или  $-\Delta H^0$ ) приведены в справочниках физико-химических, термохимических или термодинамических величин. При этом в качестве стандартных условий приняты: температура  $25^{\circ}\text{C}$ , давление  $1.01 \cdot 10^5 \text{Па}$  и для растворенных веществ концентрация 1 моль на 1 кг растворителя. Газы и растворы предполагаются идеальными.

Тепловой эффект реакции также равен сумме теплот образования исходных веществ за вычетом суммы теплот образования продуктов реакции:

$$\Delta H = \Sigma(\Delta H_{\text{обр}})_{\text{исх}} - (\Delta H_{\text{обр}})_{\text{прод}} \quad (1.9)$$

Для определения зависимости теплового эффекта реакции от температуры применяется уравнение Нернста:

$$q_p = q_p^- + \Delta a_0 T + -\frac{1}{2} \Delta a_1 T^2 + -\frac{1}{3} \Delta a_2 T^3 \quad (1.10)$$

где  $\Delta a_0$ ,  $\Delta a_1$ ,  $\Delta a_2$  – разности соответственных коэффициентов уравнения (1.5) для продуктов реакции и исходных веществ. Значения этих коэффициентов для отдельных реакций приведены в справочниках.

Подвод теплоты в аппарат  $Q_{\text{п}}$  можно учитывать по потере количества теплоты теплоносителя, например, греющей воды ( $G_{\text{в}}$  и  $c_{\text{в}}$ )

$$Q_{\text{п}} = G_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) \quad (1.11)$$

пара  $Q_{\text{п}} = Gr \quad (1.12)$

или же по формуле теплопередачи через греющую стенку:

$$Q_{\text{п}} = k_{\text{T}} F ((t_{\text{r}} - t_{\text{x}}) \tau \quad (1.13)$$

где  $k_{\text{T}}$  – коэффициент теплопередачи;  $F$  – поверхность теплообмена;  $t_{\text{r}}$  – средняя температура греющего вещества (воды, пара);  $t_{\text{x}}$  – средняя температура нагреваемого вещества в аппарате;  $r$  – теплота испарения;  $\tau$  – время.

По этой и другим формулам теплопередачи можно также рассчитать отвод теплоты от реагирующей смеси в аппарате или потерю теплоты в окружающую среду  $Q'_{\text{п}}$ . Эту статью расхода теплоты часто вычисляют по изменению количества теплоты хладагента, например, охлаждающей воды или воздуха.

Теплоту, получаемая при сжигании топлива или при превращении электрической энергии в тепловую, подсчитывают по формулам:

для пламенных печей  $Q_{\text{п}} = B Q_{\text{н}}^{\text{п}} \quad (1.14)$

для электрических печей  $Q_{\text{п}} = NB \quad (1.15)$

где  $B$  – расход топлива,  $\text{м}^3/\text{с}$  или  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\text{дж}/\text{м}^3$  или  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $N$  – мощность печи, Вт;  $\beta$  – размерный коэффициент.

При подсчетах теплоты сгорания топлива по его элементарному составу в технических расчетах чаще всего используют формулу Менделеева

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 339.3C + 1256H - 109(O - S) - 25.2(9H + W) \quad (1.16)$$

Где  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$  – соответственно содержание углерода, водорода, кислорода и серы, % масс.;  $W$  – содержание влаги в рабочем топливе (с учетом содержания в нем  $A\%$  золы,  $N\%$  азота), % масс.

Высшая теплота сгорания  $Q_{\text{в}}^{\text{п}}$  вычисляется при условии, что вся вода, образовавшаяся при сгорании, влага, первоначально содержащаяся в топливе, конденсируется из отходящих газов в жидкость и охлаждается до первоначальной температуры, с которой поступает топливо в топку; определяется по формуле:

$$Q_{\text{в}}^{\text{п}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 25.2 (9H + W) \quad (1.17)$$

На основе элементарного состава топлива, теоретический расход воздуха  $G$  (в кг на 1 кг топлива) рассчитывается по уравнению

$$G_{\text{теор.}} = 0.116c + 0.348H + 0.0135(S - O) \quad (1.18)$$

Количество тепла, вносимого влажным воздухом,  $I_{\text{возд.}}$ , можно подсчитать по формуле:

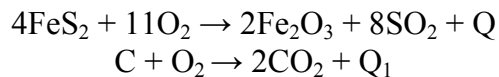
$$I_{\text{возд.}} = \alpha G_{\text{теор.}}(1.02 + 1.95x)t_{\text{возд.}}$$

где  $G_{\text{теор.}}$  – теоретический расход воздуха (в кг), идущего на сжигание 1 кг рабочего топлива;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха (практически обычно для твердого топлива  $\alpha$  берется от 1.3 до 1.7); 1.02 – удельная теплоемкость воздуха; 1.95 – удельная теплоемкость водяных паров;  $x$  – влагосодержание воздуха (в кг) на 1 кг сухого воздуха;  $t_{\text{возд.}}$  – температура воздуха, поступающего на сгорание.

## 2 Расчет теплот химических и физических превращений

### Пример №1.

Определить теоретическую теплотворную способность углистого колчедана, содержащего 45%S и 5%С в кДж/кг, зная, что 1 кг чистого колчедана при сгорании дает 7060кДж/кг, а 1 кг чистого углерода – 32700 кДж/кг.



Решение.

Чистый колчедан (пирит) содержит  $64 \cdot 100/120 = 53.35\%$  S (120 – мол. масса  $\text{FeS}_2$ ). Следовательно, рассматриваемая руда содержит:

Колчедан  $45/53.35 = 0.842$  кг, углерод 0.05 кг, пустая порода 0.108 кг.

Итого: 1 кг.

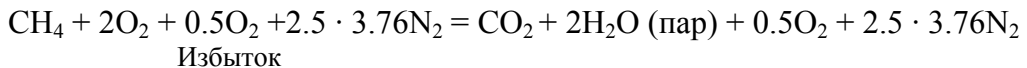
$$Q = 7060 \cdot 0.842 + 32700 \cdot 0.05 = 5940 + 1635 = 7575 \text{ кДж/кг}$$

### Пример №2.

Рассчитать теоретическую температуру горения метана природного газа (теплота сгорания 890319 кДж/моль) при избытке воздуха 25% ( $\alpha = 1.25$ ).

Решение.

Реакция горения метана



Избыток

При начальной температуре метана и воздуха, равной  $0^\circ\text{C}$ , и заданной температуре горения, тепловой баланс выражается следующим уравнением:

$$Q = 890310 = (c_{\text{CO}_2} + 2c_{\text{H}_2\text{O}} + 0.5c_{\text{O}_2} + 2.5 \cdot 3.76c_{\text{N}_2}) t$$



Средняя мольная теплоемкость газов и паров  $c$  в кДж/(кмоль·град):

	1800 <sup>0</sup> С	1900 <sup>0</sup> С
O <sub>2</sub>	34.9	35.1
CO <sub>2</sub>	53.9	54.2
N <sub>2</sub>	33.1	33.2
H <sub>2</sub> O (пар)	42.8	43.2
Следовательно, при 1800 <sup>0</sup> С		

$$Q' = (53.9 + 2 \cdot 42.8 + 0.5 \cdot 34.9 + 2.5 \cdot 3.76 \cdot 33.1) \cdot 1800 = (53.9 + 85.6 + 17.45 + 311) \cdot 1800 = 467.95 \cdot 1800 = 842000 \text{ кДж}$$

$$Q' = 842000 \text{ кДж} < Q = 890310 \text{ кДж}$$

Возьмем при 1900<sup>0</sup>С

$$Q'' = (54.2 + 2 \cdot 43.2 + 0.5 \cdot 35.1 + 2.5 \cdot 3.76 \cdot 33.2) \cdot 1900 = (54.2 + 86.4 + 17.55 + 312.44) \cdot 1900 = 470.6 \cdot 1900 = 906000 \text{ кДж}$$

$$Q'' = 906000 \text{ кДж} > Q = 890310 \text{ кДж}$$

$$\Delta t_1 = 1999 - 18800 = 100^0\text{С}$$

$$Q'' - Q = 906000 - 890310 = 15690 \text{ кДж}$$

$$Q - Q' = 890310 - 842000 = 58310 \text{ кДж}$$

$$\Delta t = t - 1800$$

$$\Delta t = 15690 \cdot 100 / 58310 = 26.8^0\text{С}$$

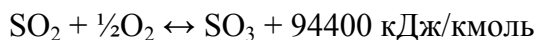
$$t = 1800 + 26.8 = 1826^0\text{С.}$$

Пример № 3.

Степень окисления SO<sub>2</sub> в SO<sub>3</sub> составляет:  $x_1 = 0.55$  и  $x_2 = 0.96$ . Рассчитать изменение температуры в зоне реакции, если средняя теплоемкость газовой смеси, содержащей SO<sub>2</sub> – 8%, O<sub>2</sub> – 11% и N<sub>2</sub> – 81%, условно принимается неизменной и составляет 1.382 кДж/(м<sup>3</sup>·<sup>0</sup>С)

Решение.

Расчет ведется на 100м<sup>3</sup> газовой смеси:



Тогда  $Q_1 = (8/22.4) \cdot 0.55 \cdot 94400 = 18480 \text{ кДж,}$

$$Q_2 = (8/22.4) \cdot 0.96 \cdot 94400 = 32200 \text{ кДж}$$

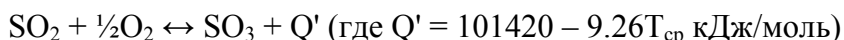
$$V_1 = 100 - (8 \cdot 0.55 \cdot 0.5) = 97.8 \text{ м}^3$$

$$V_2 = 100 - (8 \cdot 0.96 \cdot 0.5) = 96.16 \text{ м}^3$$

$$\Delta t_1 = 18480 / (1.382 \cdot 97.8) = 138^0\text{С}, \Delta t_2 = 32200 / (1.382 \cdot 96.16) = 244^0\text{С}$$

Пример №4.

На 1-ый слой контактного аппарата при  $4500^{\circ}\text{C}$  подается  $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$  исходной газовой смеси, содержащей (в %об.):  $\text{SO}_2 - 10.0\%$ ,  $\text{O}_2 - 11.0\%$ ,  $\text{N}_2 - 79.0\%$ . В результате экзотермической реакции



$T_{\text{ср}}$  рассчитывают по формуле:

$$T_{\text{ср}} = (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}})/2.3 \lg T_{\text{кон}}/T_{\text{нач}}$$

Температура газа повысилась до  $580^{\circ}\text{C}$ . Определить степень окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$ , если принять теплоемкость газа неизменной и равной  $c = 1.38 \text{ кДж/м}^3$  (изменением объема в результате реакции пренебрегаем).

Решение.

$$Q = ncV(t_2 - t_1); \Delta t = t_2 - t_1 = 580 - 450 = 130^{\circ}\text{C};$$

$$Q = 1.38 \cdot 10000 \cdot 130 = 1794000 \text{ кДж}$$

$$T_{\text{ср}} = (853 - 723)/2.3 \lg(853/723) = 130/2.3 \cdot 0.072 = 130/0.1655 = 785 \text{ К}$$

$$Q' = 101420 - 9.26 \cdot 785 = 94150 \text{ кДж/кмоль}$$

$$V_{\text{SO}_3} = 1794000 \cdot 22.4/94150 = 426 \text{ м}^3$$

Следовательно, степень превращения  $426/1000 = 0.426$

### 3 Расчет теплового баланса промышленных процессов

Пример №1.

Подсчитать тепловой баланс контактного аппарата для частичного окисления  $\text{SO}_2$  производительностью  $25000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , если состав газовой смеси:  $\text{SO}_2 - 9\%$ (об),  $\text{O}_2 - 11\%$ (об),  $\text{N}_2 - 80\%$ (об). Степень окисления  $88\%$ . Температура входящего газа  $460^{\circ}\text{C}$ ; выходящего –  $580^{\circ}\text{C}$ . Средняя теплоемкость смеси (условно считаем ее неизменной)  $c = 2.052 \text{ кДж/(м}^3 \text{ /град)}$ . Потери тепла в окружающую среду принимаем  $5\%$  от прихода теплоты.

Решение.



Состав газа приведен в таблице

Исходный		После аппарата		
газ	м <sup>3</sup>	газ		м <sup>3</sup>
$\text{SO}_2$	2250	$\text{SO}_2$	$2250 \cdot 0.88 = 1980$	270
$\text{SO}_3$	-	$\text{SO}_3$	$2250 - 1980 = 270$	1980
$\text{N}_2$	20000	$\text{N}_2$		20000
$\text{O}_2$	2750	$\text{O}_2$	$2750 - (1980/2) = 1760$	1760
итого	25000			24010

Приход теплоты. Физическая теплота газа:

$$Q_1 = 25000 \cdot 2.052 \cdot 460 = 23598000 \text{ кДж}$$

Теплоты реакции:

$$Q_2 = 94207 \cdot (22650/22.4) \cdot 0.83 = 8290216 \text{ кДж}$$

Всего  $\Sigma Q_{\text{пр}} = 31888216 \text{ кДж}$

Расход теплоты. Теплота, уносимая отходящими газами

$$Q_3 = 24010 \cdot 2.052 \cdot 580 = 28564000 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{пот}} = 31888 \cdot 10^3 \cdot 0.05 = 1594400 \text{ кДж}$$

Всего  $\Sigma Q_{\text{расх}} = 30158400 \text{ кДж}$

Следовательно, необходимо отвести теплоты:

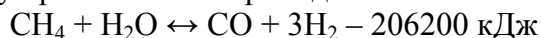
$$\Sigma Q_{\text{пр}} - \Sigma Q_{\text{расх}} = 31888216 - 30158400 = 1729816 \text{ кДж}$$

Данные теплового баланса сведены в таблицу

Приход			Расход		
Исходные данные	кДж	%	Конечные данные	кДж	%
$Q_1$	23598000	73.9	$Q_3$	28564000	89.6
$Q_2$	8290216	26.1	$Q_{\text{пот}}$	1594400	5
			$Q_{\text{отв}}$	1729816	5
итого	31888216	100	итого	31888216	100

Пример №2.

Составить тепловой баланс реактора для получения водорода каталитической конверсией метана. Расчет ведем на  $1000\text{ м}^3 \text{ H}_2$ . Потери теплоты в окружающую среду примем 6% от прихода теплоты. Расчет ведем по реакции



Исходные данные:

$\text{CH}_4 : \text{H}_2\text{O} = 1:2$ . Температура поступающих в реактор реагентов  $105^\circ\text{C}$ ; температура в зоне реакции  $900^\circ\text{C}$ . теплоемкости в кДж/(кмоль  $^\circ\text{C}$ ):

	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$
$100^\circ\text{C}$	36.72	33.29	28.97	29.10
$900^\circ\text{C}$	-	38.14	31.36	29.90

Решение.

В соответствии с условием задачи на  $1000\text{ м}^3 \text{ H}_2$  объем исходных реагентов и полученных продуктов будет составлять:

Приход		Расход	
Исходное вещество	м <sup>3</sup>	продукт	м <sup>3</sup>
CH <sub>4</sub>	333	CO	333
H <sub>2</sub> O	667	H <sub>2</sub> O	334
		H <sub>2</sub>	1000
итого	1000	итого	1667

Приход теплоты:

$$Q_{\text{физ. CH}_4} = (334/22.4) \cdot 36.72 \cdot 105 = 58180 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{физ. H}_2\text{O}} = (667/22.4) \cdot 33.29 \cdot 105 = 104130 \text{ кДж}$$

$$\Sigma Q_{\text{физ}} = 162310 \text{ кДж}$$

Расход теплоты:

Теплота, уносимая продуктами реакции из реактора при 900<sup>0</sup>С:

$$Q_{\text{CO}} = (333/22.4) \cdot 37.36 \cdot 900 = 419500 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{H}_2} = (1000/22.4) \cdot 29.90 \cdot 900 = 1202700 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = (334/22.4) \cdot 38.14 \cdot 900 = 511825 \text{ кДж}$$

$$\Sigma Q_{\text{физ ун.}} = 2133025 \text{ кДж}$$

$$Q_p = (333/22.4) \cdot 206200 = 3065400 \text{ кДж}$$

Всего: 5198425 кДж

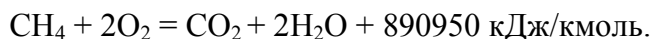
$$Q_{\text{п}} = 162310 \cdot 0.06 = 9738 \text{ кДж}$$

Тепловой баланс конверсии метана приведен в таблице:

приход	кДж	Расход	кДж
Q <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	104130	Q <sub>CO</sub>	419500
Q <sub>CH<sub>4</sub></sub>	58180	Q <sub>H<sub>2</sub></sub>	1201700
		Q <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	511805
		Q <sub>п</sub>	9738
		Q <sub>р</sub>	3065400
итого	162130	итого	5208160

$$\Delta Q = 5208160 - 162130 = 5040030 \text{ кДж}$$

Подвод теплоты в зону реакции осуществляется за счет сжигания части метана природного газа (98% CH<sub>4</sub> и 2% N<sub>2</sub>):



Для покрытия образовавшегося дефицита теплоты ΔQ необходимо сжечь метана

$$5046030/890950 = 5.66 \text{ кмоль или } 5.66 \cdot 22.4 = 127 \text{ м}^3 \text{ CH}_4,$$

т.е. 129.5 м<sup>3</sup> природного газа.

### Контрольные задания

#### Задание №1.

Рассчитать теоретическую температуру горения этана (теплота сгорания  $1.65 \cdot 10^6$  кДж/моль) при избытке воздуха 20%.

#### Задание №2.

Определить количество теплоты, выделяющейся при обжиге 1 т  $\text{FeS}_2$ , содержащего 38% серы, если степень выгорания серы из колчедана  $x=0.96$ . Процесс горения колчедана описывается следующим суммарным уравнением



Теплоты образования в кДж/моль:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 821.3$ ;  $\text{SO}_2 - 296.90$ ;  $\text{FeS}_2 - 177.4$ . Чистый  $\text{FeS}_2$  содержит 53.35% серы и 46.65% железа.

#### Задание №3.

Составить тепловой баланс генератора водяного газа при газификации 1 т кокса, содержащего 93% (масс.) С; 4% (масс.) золы и 3% (масс.)  $\text{H}_2\text{O}$  и подаче 1575 кг водяного газа на 1 т кокса. При этом образуется 2190 кг водяного газа, содержащего 89.9% (масс.)  $\text{CO}$ , 1.94% (масс.)  $\text{CO}_2$  и 8.16% (масс.)  $\text{H}_2$ . Температура водяного газа на выходе из генератора  $1000^\circ\text{C}$ , температура подаваемого кокса  $25^\circ\text{C}$  и водяного пара  $100^\circ\text{C}$ .

#### Задание №4.

Составить тепловой расчет кристаллизации плава аммиачной селитры в грануляционной башне.

Исходные данные:

Температура воздуха на входе в гранбашню  $30^\circ\text{C}$ , на выходе  $60^\circ\text{C}$ ; в башню поступает на 1000 кг аммиачной селитры 1015.21 кг плава, содержащего 98.5%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ; температура плава, поступающего в башню,  $150^\circ\text{C}$ ; температура гранул, выходящих из башни,  $80^\circ\text{C}$ . Расчет ведется на 1000кг аммиачной селитры.

#### Задание №5

Составить тепловой расчет колонны синтеза мочевины.

Исходные данные:

Температура реагентов, поступающих в колонну синтеза,  $^\circ\text{C}$ : жидкого аммиака 105, диоксида углерода 35; температура в колонне синтеза  $200^\circ\text{C}$ , критическая температура аммиака  $132.9^\circ\text{C}$ .

Энтальпия жидкого аммиака, кДж/кг: 939.9 при  $132.9^\circ\text{C}$  и 553.12 при  $105^\circ\text{C}$ .

Зависимость теплового эффекта реакции конверсии карбамата аммония от избытка аммиака при  $155 - 200^\circ\text{C}$

Избыток аммиака от  
стехиометрического

0 50 100 200 300

Тепловой эффект, кДж/кмоль 14235 13308 18422 20515 22609

Количество исходных реагентов и продуктов реакции принимаем согласно  
материального баланса. Расчет ведется на 1000 кг готового продукта

Материальный баланс получения мочевины (на 1000кг продукта)

Приход	кг	Расход	кг	%
аммиак	1949	мочевина	1070.0	34.33
диоксид углерода	1121	карбамат аммония	596.2	19.13
инертные газы	46.7	вода	321.0	10.30
		избыточный аммиак	1082.8	34.74
		в том числе		
		в виде аммиака	303.2	
		в газообразном виде	779.6	
		инертные газы	46.7	1.50
Всего	3116.7	Всего	3116.7	100