

Министерство образования и науки Украины
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе
**«СТАТИКА ГОРЕНИЯ И $I - t$ ДИАГРАММА ПРОДУКТОВ
СГОРАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА»**
по курсу
«ТОПЛИВО И ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА»

для студентов заочного обучения специальностей
7.090510 «Теплоэнергетика»,
7.000008 «Энергетический менеджмент»

Харьков 2005

Министерство образования и науки Украины
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе
**«СТАТИКА ГОРЕНИЯ И $I - t$ ДИАГРАММА ПРОДУКТОВ
СГОРАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА»**
по курсу
«ТОПЛИВО И ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА»

для студентов заочного обучения специальностей
7.090510 «Теплоэнергетика»,
7.000008 «Энергетический менеджмент»

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета
протокол № 2 от 02.06. 2004г

Методические указания к курсовой работе «Статика горения и $I - t$ диаграмма продуктов сгорания органического топлива» по курсу «Топливо и топочные устройства» для студентов заочного обучения специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент» /Сост. Р.Г. Акмен. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 18с. Рус. яз.

Составитель Р.Г. Акмен

Рецензент В.М. Кошельник

Кафедра теплотехники

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курсовая работа выполняется параллельно с изучением курса «Топливо и топочные устройства» на 6 учебном семестре.

Целью работы является получение практических навыков в расчете статике процесса горения твердого и газообразного топлива, определение количества воздуха горения, объема продуктов сгорания, построение и использование в расчетах $I - t$ диаграммы продуктов сгорания различных топлив.

В работе рассматриваются специальные условия сжигания природного газа, широко использующиеся в промышленных нагревательных печах, и которые должен уметь рассчитывать инженер теплоэнергетик.

Работа должна выполняться после изучения тем курса: Введение; тема 1 «Статика горения топлива»; тема 2 «Основы химического равновесия». Одновременно с выполнением курсовой работы студент должен ответить на контрольные вопросы к курсовой работе, приведенные в методическом пособии к курсу.

Исходные данные к курсовой работе приведены в приложении, а **вариант исходных данных принимается по порядковому номеру студента в академическом журнале группы.**

Работа выполняется на стандартных листах формата А4. На титульном листе указывается полное название университета, кафедра, тема работы, группа и курс, фамилия и инициалы студента, **номер варианта исходных данных.**

Внимание! Работа возвращается без рассмотрения, если при выполнении работы использовались данные, не соответствующие заданному варианту.

При оформлении работы следует отделять разделы работы, пояснять выполняемые расчеты. Все используемые формулы должны иметь порядковый номер, результат расчета должен сопровождаться размерностью.

Если работа была возвращена для исправления замечаний, то к исправленному варианту должны быть приложены листы, которые имели замечания преподавателя.

Выполненная работа защищается у преподавателя.

1. СТАТИКА ГОРЕНИЯ И $I-t$ ДИАГРАММА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Задание 1.

Для заданного твердого топлива определить:

- рабочую массу топлива;
- теоретически необходимый объем воздуха горения;
- стехиометрический объем продуктов сгорания топлива;
- построить $I-t$ диаграмму продуктов сгорания в диапазоне температуры $700 \div 2200^\circ\text{C}$;
- с помощью $I-t$ диаграммы продуктов сгорания определить жаропроизводительность топлива, изменение температуры продуктов сгорания при отводе от них Q [кДж/(кг т.)] теплоты и одновременном изменении коэффициента избытка воздуха.

Методические указания по выполнению

Выбрать исходное твердое топливо из табл. П.1 приложения для заданного варианта работы. Элементарный состав топлива приводится в расчете на горючую массу топлива, зольность указывается для сухой массы топлива, а влажность – рабочей массы топлива.

1.1. Расчет состава горючей массы топлива

Для расчета рабочей массы топлива необходимо определить балласт рабочей массы, состоящей из золы и влаги.

Зольность рабочей массы определяется из баланса массы золы

$$A^p = A^c(1 - W^p), \quad (1)$$

тогда балласт рабочей массы составит

$$B^p = A^p + W^p. \quad (2)$$

Рабочая масса топлива отличается от горючей наличием балласта, тогда из баланса массы следует соотношение для пересчета содержания горючих компонентов в рабочей массе топлива

$$X^p = X^r(1 - B^p), \quad (3)$$

т.е. $C^p = C^r(1 - B^p)$; $H^p = H^r(1 - B^p)$ и т.д.

Учтите, что в (1) – (3) содержание компонент дается в долях от единицы.

После расчета рабочей массы топлива проверьте баланс массы

$$C^p + H^p + S^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 1, \quad (4)$$

который должен иметь расхождение не более 0,001.

1.2. Расчет воздуха горения и состава продуктов сгорания

Теоретически необходимый объем воздуха для полного сгорания единицы массы твердого топлива

$$V^0 = 8,89C^p + 26,7H^p + 3,3(S^p - O^p) \text{ [нм}^3\text{/кг т.]}. \quad (5)$$

При стехиометрическом сжигании топлива состав продуктов сгорания включает объем трехатомных газов, водяного пара и азота

$$V_{\text{п.с.}}^0 = V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \text{ [нм}^3\text{/кг т.]}. \quad (6)$$

Объем трехатомных газов V_{RO_2} зависит только от состава рабочей массы и определяется как результат полного окисления углерода и серы топлива

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 1,868(C^{\text{P}} + 0,375S^{\text{P}}) \quad [\text{нм}^3/\text{кг т.}] \quad (7)$$

Теоретический объем водяного пара $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ включает испарившуюся влагу топлива, результат окисления водорода рабочей массы топлива и влагу, внесенную с воздухом горения, т.е.

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 1,242 \cdot (9\text{H}^{\text{P}} + W^{\text{P}}) + 0,0161 \cdot V^0 \quad [\text{нм}^3/\text{кг т.}] \quad (8)$$

Теоретический объем азота $V_{\text{N}_2}^0$ складывается из азота воздуха горения и азота рабочей массы топлива

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8\text{N}^{\text{P}} \quad [\text{нм}^3/\text{кг т.}] \quad (9)$$

1.3. Расчет энтальпии продуктов сгорания, построение $I - t$ диаграммы и работа с $I - t$ диаграммой

Для построения $I - t$ диаграммы продуктов сгорания следует воспользоваться таблицей объемных теплоемкостей (см. табл.П.5) и, задаваясь последовательно температурой продуктов сгорания от 700°C до 2200°C с интервалом 100°C , рассчитать энтальпию продуктов стехиометрического горения

$$I_{\text{п.с.}}^0 = t \cdot (V_{\text{RO}_2} c'_{\text{pCO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 c'_{\text{pH}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 c'_{\text{pN}_2}) \quad [\text{кДж}/\text{кг т.}], \quad (10)$$

и энтальпию теоретически необходимого воздуха горения

$$I_{\text{в}}^0 = V^0 c'_{\text{п.в}} t \quad [\text{кДж}/\text{кг т.}] \quad (11)$$

В табл. П.3 заданы коэффициенты избытка воздуха, для которых следует построить $I - t$ диаграмму продуктов сгорания. Воспользовавшись тем, что действительный объем продуктов сгорания можно представить как теоретический объем продуктов сгорания и избыточный воздух горения, т.е.

$$V_{\text{п.с.}} = V_{\text{п.с.}}^0 + \Delta V_{\text{в}} = V_{\text{п.с.}}^0 + (\alpha - 1)V^0, \quad (12)$$

энтальпию продуктов сгорания при заданном коэффициенте избытка воздуха α можно рассчитать как

$$I_{\text{п.с.}} = I_{\text{п.с.}}^0 + (\alpha - 1)I_{\text{в}}^0 \quad (13)$$

Результаты расчета энтальпии сведите в таблицу, образец которой приведен ниже.

Образец таблицы

| t $^\circ\text{C}$ | Энтальпия, кДж/кг т. | | | | |
|-------------------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $I_{\text{п.с.}}^0$ | $I_{\text{в}}^0$ | $I_{\text{п.с.1}}$ | $I_{\text{п.с.2}}$ | $I_{\text{п.с.3}}$ |
| 700 | | | | | |
| 800 | | | | | |
| ... | | | | | |
| 2100 | | | | | |
| 2200 | | | | | |

На основании таблицы постройте $I - t$ диаграмму продуктов сгорания, приняв по оси абсцисс температуру, начиная с 700°C , а по оси ординат –

энтальпию, начиная с круглого значения, ближайшего к наименьшему значению из таблицы (обычно – энтальпия воздуха при 700°С). Масштаб по оси t должен быть не менее 10мм/100°С, по оси I – порядка 10мм/1000 кДж/кг т.

С помощью $I - t$ диаграммы определите жаропроизводительность топлива, учтя, что жаропроизводительностью называют температуру адиабатного горения без подогрева топлива и воздуха и при стехиометрическом горении, т.е.

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = t_{\text{ж}} (V_{\text{RO}_2} c'_{\text{pCO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 c'_{\text{pH}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 c'_{\text{pN}_2}). \quad (14)$$

В табл. П.3 заданы температура продуктов сгорания и количество отведенной от них теплоты. В последнем столбце таблицы указан диапазон изменения коэффициента избытка воздуха при отводе от продуктов сгорания теплоты. Требуется определить, какую температуру будут иметь продукты сгорания после отвода заданного количества теплоты и при одновременном изменении коэффициента избытка воздуха.

Из $I - t$ диаграммы по заданной температуре и первому из указанных в последнем столбце коэффициенту избытка воздуха определите начальную энтальпию продуктов сгорания $I_{\text{н.с.}}$. Конечная энтальпия находится из баланса теплоты

$$I_{2\text{п.с.}} = I_{\text{н.с.}} - Q. \quad (15)$$

По этой энтальпии и второму из приведенных в последнем столбце табл. П.3 коэффициенту избытка воздуха с помощью $I - t$ диаграммы определите искомую температуру.

2. СТАТИКА ГОРЕНИЯ И $I - t$ ДИАГРАММА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Задание 2

Для заданного природного газа определить:

- теоретический расход воздуха горения, стехиометрический состав продуктов сгорания;
- построить $I - t$ диаграмму продуктов сгорания в диапазоне изменения температуры 800÷2300°С при заданных коэффициентах избытка воздуха;
- с помощью $I - t$ диаграммы определить жаропроизводительность топлива и температуру продуктов сгорания при отводе от них Q [кДж/нм³ г.] теплоты с одновременным изменением коэффициента избытка воздуха.

Методические указания.

Выбрать исходное газообразное топливо из табл. П.2 приложения для заданного варианта работы.

2.1. Определение теоретического объема воздуха горения и состава продуктов сгорания

В связи с тем, что в сухом природном газе присутствуют только предельные углеводороды метанового ряда и балласт, состоящий из азота и углекислого газа, теоретический объем воздуха горения определяется как

$$V^0 = 4,76[2\text{CH}_4 + \sum (m + n/4)\text{C}_m\text{H}_n] \text{ [нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.}], \quad (16)$$

или в развернутом виде

$$V^0 = 4,76(2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 7\text{C}_5\text{H}_{12}), \quad (17)$$

где объемное содержание компонентов газа должно быть в долях от единицы.

Продукты сгорания любого органического топлива при стехиометрическом горении одни и те же

$$V_{\text{п.с.}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \quad [\text{нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.}], \quad (18)$$

однако при сжигании природного газа объем трехатомных газов будет

$$V_{\text{RO}_2} = \text{CH}_4 + \sum m\text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 \quad [\text{нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.}], \quad (19)$$

где CO_2 – содержание углекислого газа в исходном газе (в долях).

Объем водяного пара

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 2\text{CH}_4 + \sum n\text{C}_m\text{H}_n/2 + 0,0161V^0 \quad [\text{нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.}]. \quad (20)$$

Объем азота

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + \text{N}_2 \quad [\text{нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.}]. \quad (21)$$

2.2. Расчет энтальпии продуктов сгорания, построение $I - t$ диаграммы и работа с $I - t$ диаграммой

Расчет, построение $I - t$ диаграммы продуктов сгорания и работа с диаграммой производится в той же последовательности, как и для твердого топлива.

3. КИНЕТИКА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Задание 3

Для природного газа (данные задания 2) рассчитать реформацию с сажеобразованием. Исходные данные для реформации принять из таб. П.4 по номеру своего варианта.

В расчете найти:

- состав реформированного газа;
- количество образовавшегося сажистого углерода;
- химически связанное тепло реформированного газа;
- температуру воздуха горения, обеспечивающую заданную температуру реформации;
- количество воздуха горения, необходимое для дожигания продуктов реформации природного газа.

Методические указания.

При горении природного газа факел пламени имеет низкую излучательную способность, что ухудшает перенос теплоты от факела к нагреваемым изделиям. Для увеличения радиационных свойств факела используют либо параллельное сжигание газа и мазута с помощью специальных форсунок, либо газ перед сжиганием реформируют с выделением сажистого углерода, который при дожигании обеспечивает хорошие радиационные свойства факела пламени.

Реформирование природного газа с сажеобразованием происходит при выполнении условий:

- коэффициент избытка первичного воздуха $\alpha < 1$ ($0,45 \div 0,55$);
- плохое перемешивание газа и первичного воздуха горения;

- температура процесса реформации не ниже 900°C.

Второе условие позволяет предположить, что количество газа, пропорциональное первичному воздуху горения, прореагировало полностью (до образования конечных продуктов окисления), а оставшаяся часть разложилась по реакции



где C_T – сажистый углерод.

При температуре выше 900°C все не сгоревшие гомологи метана (включая этан) полностью разлагаются по реакции (22), однако, метан, разлагающийся по реакции



разлагается не полностью.

Наличие в продуктах реформации такого хорошего восстановителя как атомарный твердый углерод приводит к возникновению восстановительной эндотермической реакции



Таким образом, состав продуктов реформации будет:

$$V_{\text{п.р.}} = V_{N_2} + V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2O} + V_{H_2} + V_{CH_4}. \quad (25)$$

Объем азота находится достаточно просто

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V^0 + N_2, \quad (26)$$

где теоретический объем воздуха горения определен выше по (16).

Водяной пар образуется только в результате полного окисления углеводородов газа. Поэтому, как указывалось выше, полагая, что полностью сгорела часть газа, пропорциональная коэффициенту избытка воздуха, объем водяного пара найдем как

$$V_{H_2O} = \alpha \cdot [2CH_4 + \sum nC_m H_n / 2] + 0,0161\alpha V^0. \quad (27)$$

Водород образуется при разложении гомологов метана по реакции (22) и самого метана по (23). Тогда, полагая, что не догоревшие гомологи метана разложились полностью по (22), объем образовавшегося водорода

$$V'_{H_2} = (1 - \alpha) \sum nC_m H_n / 2. \quad (28)$$

Обозначим Y количество метана, которое разложилось по реакции (23), тогда количество не разложившегося метана будет

$$V_{CH_4} = (1 - \alpha)CH_4 - Y, \quad (29)$$

а водорода образуется $V''_{H_2} = 2Y$.

Считаем, что продукты реформации контактируют достаточно долго и можно воспользоваться константами равновесия обратимых химических реакций, а также примем давление продуктов реформации $P=1$ бар. Тогда соотношение между объемом метана и водорода в продуктах реформации должно соответствовать константе равновесия по концентрации реакции (23).

Приняв в качестве аргумента $b = 1000/t$, где t – заданная температура реформации, константу равновесия реакции



можно вычислить по уравнению:

$$K_c^{(1)} = b(0,14956 + b(-0,78191 + b(1,52225 + b(-1,31575 + 0,43538 \cdot b))))). \quad (31)$$

Внимание! При расчете констант равновесия не изменять число знаков в коэффициентах.

Заметим, что реакция (30) записана как обратная (23), тогда

$$K_c^{(1)} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{(V'_{\text{H}_2} + V''_{\text{H}_2})^2}, \quad (32)$$

и, подставив значения объемов метана и водорода, получаем квадратное уравнение относительно Y . Решив уравнение, определим Y и количество метана и водорода в продуктах реформации.

Обозначим количество CO_2 , восстановившееся до CO по реакции (24), как X . Тогда объем CO в продуктах реформации будет

$$V_{\text{CO}} = 2X, \quad (33)$$

а оставшийся объем CO_2 , учитывая, что CO_2 образовался при полном окислении части исходного газа пропорциональной коэффициенту избытка воздуха,

$$V_{\text{CO}_2} = \alpha \cdot [\text{CH}_4 + \sum mC_m H_n] + \text{CO}_2 - X, \quad (34)$$

где CO_2 – содержание углекислого газа в исходном топливе.

Наличие в продуктах реформации CO , CO_2 , H_2 и H_2O приводит к появлению обратимой реакции



константа равновесия которой может быть определена как

$$K_c^{(2)} = b \cdot (45,65254 + b \cdot (-236,35218 + b \cdot (453,82659 + b \cdot (-379,91983 + 117,25531 \cdot b))))), \quad (36)$$

где $b = 1000/t$.

Учитывая, что константа равновесия по концентрации реакции (35) записывается как

$$K_c^{(2)} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{H}_2}}{V_{\text{CO}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (37)$$

а объемы водорода и водяного пара определены выше, из (37) получаем уравнение относительно X , решив которое определим объемы окиси углерода и углекислого газа в продуктах реформации.

Таким образом, газовый состав продуктов реформации определен. Количество образовавшегося сажистого углерода можно определить из следующих посылок. Углерод образовался при разложении не догоревших гомологов метана по реакции (22) и самого метана по (23), которое было обозначено как Y . Кроме того, на реакцию восстановления (24) затрачено углерода столько же, сколько восстановлено углекислого газа, что было обозначено, как X . В итоге получим

$$C_T = [Y - X + (1 - \alpha) \sum mC_m H_n] \cdot 12 / 22,4 \text{ [кг/нм}^3 \text{ г.]}, \quad (38)$$

где 12 – молекулярная масса углерода; 22,4 – объем моля газа при нормальных условиях.

В процессе реформации в топочное пространство вносится химическое тепло исходного газа Q_H^c и тепло подогретого воздуха горения $I_B = \alpha V^0 c'_{pB} t_B$. Считая процесс адиабатным, т.е. все подведенное тепло расходуется на нагрев продуктов сгорания, определим расходные статьи баланса тепла.

Энтальпия продуктов реформации:

$$I_{п.р} = t_p (V_{N_2} c'_{pN_2} + V_{CO_2} c'_{pCO_2} + V_{CO} c'_{pCO} + V_{H_2} c'_{pH_2} + V_{H_2O} c'_{pH_2O} + V_{CH_4} c'_{pCH_4}),$$

где t_p – температура реформации газа, а c'_p – теплоемкости компонентов продуктов реформации, определяемые по таблице теплоемкостей (таб. П.5).

Продукты реформации содержат горючие компоненты: CO, H₂, CH₄ и сажистый углерод C_T, поэтому они уносят химически связанное тепло, которое может быть определено как

$$Q_x = 33,9C_T + 10,8V_{H_2} + 12,6V_{CO} + 35,9V_{CH_4} \text{ [МДж/нм}^3 \text{ г.]}. \quad (39)$$

Кроме того, на эндотермическую реакцию восстановления (24) затрачивается тепло в количестве

$$Q_{энд.} = q_{энд.} X = 7,85 \cdot X \text{ [МДж/нм}^3 \text{ г.]}. \quad (40)$$

Из баланса тепла процесса реформации

$$Q_H^c + I_B = I_{п.р.} + Q_x + Q_{энд.} \quad (41)$$

можно определить энтальпию воздуха I_B и температуру его подогрева, если воспользоваться таблицей теплоемкостей (таб. П.5). Учтем, что

$I_B = \alpha V^0 c'_{pB} t_B$, тогда $c'_{pB} t_B = I_B / (\alpha V^0)$. По таб. П.5 следует найти два значения ($c'_{pB} t_1$) при t_1 и ($c'_{pB} t_2$) при t_2 ($t_2 - t_1 = 100^\circ\text{C}$) такие, что выполняется неравенство ($c'_{pB} t_1$) \leq $c'_{pB} t_B$ \leq ($c'_{pB} t_2$). Тогда температура нагрева воздуха находится линейной интерполяцией, т.е.

$$t_B = t_1 + \frac{c'_{pB} t_B - (c'_{pB} t_1)}{(c'_{pB} t_2) - (c'_{pB} t_1)} \cdot 100$$

В связи с тем, что продукты реформации уносят химически связанное тепло, их необходимо дожигать. При этом получают факел пламени, обладающий достаточными радиационными свойствами из-за наличия в продуктах реформации сажистого углерода. Теоретическое количество воздуха для дожигания продуктов реформации найдем как

$$V_{вт.в}^0 = 8,89C_T + 4,76 \cdot [0,5(V_{H_2} + V_{CO}) + 2V_{CH_4}] \text{ [нм}^3 \text{/нм}^3 \text{ г.]}. \quad (42)$$

Таким образом, процесс реформации природного газа с сажеобразованием полностью рассчитан.

Задание 4

Для природного газа (данные задания 2) рассчитать реформацию без сажеобразования. Исходные данные для реформации принять такие же, как и в процессе с сажеобразованием, но температуру реформации принять выше на 50°C .

В расчете найти:

- состав реформированного газа;
- химически связанное тепло реформированного газа;
- температуру воздуха горения, обеспечивающую заданную температуру реформации;
- количество воздуха горения, необходимое для дожигания продуктов реформации природного газа.

Методические указания

В процессе полного горения топлива в продуктах сгорания содержатся CO_2 и H_2O , которые при высоких температурах в рабочем пространстве пламенных печей являются хорошими окислителями. Это приводит к окислению поверхностного слоя металла (угару металла), что не желательно при тепловой обработке готовых изделий. Опытные данные по поведению металла в продуктах сгорания органического топлива показали, что при содержании в атмосфере печи, наряду с окислителями CO_2 и H_2O , восстановителей CO и H_2 при соотношении $\text{CO}/\text{CO}_2 > 3,5$ и $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O} > 1,5$ окисления металла практически не происходит. Подобная среда в печи называется «безокислительной» и для ее получения используется реформация природного газа без сажеобразования.

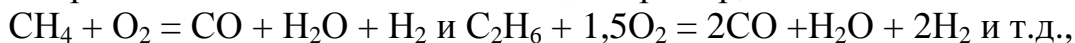
Условия протекания реформации природного газа без сажеобразования:

- коэффициент избытка воздуха < 1 ($0,45 \div 0,55$);
- хорошее перемешивание газа и первичного воздуха;
- температура процесса $> 1000^\circ\text{C}$.

При расчете этого процесса реформации природного газа второе условие протекания процесса позволяет предположить, что наряду с процессами полного окисления углеводородов топлива



проходят реакции частичного окисления, например,



которые требуют меньшего количества кислорода.

Второе и третье условия процесса позволяют считать, что углеводороды газа окислились, и в продуктах реформации их нет.

Тогда состав продуктов реформации будет

$$V_{\text{п.р.}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{H}_2} \text{ [нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.]}. \quad (43)$$

Объем азота можно найти так же как в предыдущем случае, используя (26). Тогда в (43) остались 4 неизвестные величины, которые обозначим: $V_{\text{CO}_2} = X$, $V_{\text{CO}} = Y$, $V_{\text{H}_2\text{O}} = U$, $V_{\text{H}_2} = Z$.

Учитывая, что массы элементов в исходных продуктах (топливо и воздух) и в конечных продуктах реформации должны быть равны по закону сохранения массы, составим следующие балансы, полагая заданным состав топлива в объемных долях

$$\text{CH}_4 + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 1, \quad (44)$$

- баланс углерода

$$\text{CH}_4 + \sum m\text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 = X + Y; \quad (45)$$

- баланс водорода

$$2\text{CH}_4 + \sum n\text{C}_m\text{H}_n / 2 + 0,0161\alpha V^0 = U + Z; \quad (46)$$

- баланс кислорода

$$0,21 \cdot V_{\text{в}} + \text{CO}_2 + 0,5 \cdot 0,0161 \cdot \alpha V^0 = X + 0,5(Y + U). \quad (47)$$

Заметим, что в балансе водорода и кислорода последним слагаемым в левой части равенства стоит содержание данного компонента во влаге воздуха горения.

Для заданного состава топлива и рассчитанного количества воздуха

горения правые части (45) – (47) известны и представляют собою число.

Наличие в продуктах реформации CO_2 , H_2 , CO и H_2O приводит к появлению реакции (35), а равновесный состав продуктов реформации определяется константой равновесия (36) этой реакции, которая в принятых обозначениях будет записана как

$$K_c^{(2)} = \frac{X \cdot Z}{Y \cdot U} . \quad (48)$$

Сама константа равновесия вычисляется по соотношению (36), приведенному в предыдущем задании.

В итоге имеется система 4 уравнений (45)-(48) с 4-мя неизвестными, решение которой позволяет определить искомое содержание компонентов в реформированном газе.

Рассмотрим для примера расчет состава продуктов реформации газа состава

$$\text{CH}_4=0,9; \text{C}_2\text{H}_6=0,05; \text{CO}_2=0,03; \text{N}_2=0,02,$$

при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=0,5$ и $t_p=1400^\circ\text{C}$.

Расход первичного воздуха

$$V_B = \alpha V^0 = 0,5 \cdot 4,76(2 \cdot 0,9 + 3,5 \cdot 0,05) = 4,7 \text{ [нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г]}.$$

Содержание азота в продуктах реформации

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V_B + \text{N}_2 = 0,79 \cdot 4,7 + 0,02 = 3,773 \text{ [нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г]}.$$

Обозначим $V_{\text{CO}_2} = X$, $V_{\text{CO}} = Y$, $V_{\text{H}_2\text{O}} = U$, $V_{\text{H}_2} = Z$ и составим балансы массы компонентов в исходных веществах и продуктах реформации:

- баланс углерода

$$\text{CH}_4 + 2 \text{C}_2\text{H}_6 + \text{CO}_2 = X + Y \text{ или } 0,9 + 2 \cdot 0,05 + 0,03 = X + Y;$$

- баланс водорода

$$2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 0,0161V_B = U + Z \text{ или } 2 \cdot 0,9 + 3 \cdot 0,05 + 0,0161 \cdot 4,7 = U + Z;$$

- баланс кислорода

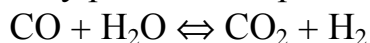
$$0,21V_B + \text{CO}_2 + 0,5 \cdot 0,0161 V_B = X + 0,5(Y + U) \text{ или}$$

$$0,21 \cdot 4,7 + 0,03 + 0,5 \cdot 0,0161 \cdot 4,7 = X + 0,5(Y + U).$$

Окончательно:

$$1,03 = X + Y \text{ (а); } 2,0285 = U + Z \text{ (б); } 1,055 = X + 0,5(Y + U) \text{ (в).}$$

Рассчитаем константу равновесия реакции



по (36) при значении $b = 1000 / t_p = 1000/1400 = 0,7143$.

$$K_c^{(2)} = 0,3154.$$

Используя (а), (б) и (в), выразим все переменные через X . Из (а) получим $Y = 1,03 - X$. Из (в) — $U = 1,08 - X$. Из (б) — $Z = 0,9485 + X$.

Из (48) получим, учитывая найденное значение константы равновесия

$$K_c^{(2)} = \frac{X \cdot Z}{Y \cdot U} = \frac{X(0,9485 + X)}{(1,03 - X)(1,08 - X)} = 0,3154.$$

В итоге имеем квадратное уравнение относительно X :

$$0,6846 X^2 + 1,614 X - 0,351 = 0,$$

решения которого $X_1 = -2,56$; $X_2 = 0,2$. Первое решение, очевидно, не имеет смысла, т.к. содержание компонент в продуктах реакции должно быть

положительным. Из второго решения получаем:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,2; V_{\text{CO}} = 0,83; V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,88; V_{\text{H}_2} = 1,1485 \text{ [нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.]}. \quad (48)$$

Продукты реформации содержат горючие компоненты (CO и H₂), поэтому в балансе тепла процесса учтем химически связанное тепло

$$Q_x = 10,8V_{\text{H}_2} + 12,6V_{\text{CO}} \text{ [МДж/нм}^3 \text{ г.]}. \quad (49)$$

Считая процесс реформации адиабатным, т.е. полагая, что все подведенное тепло передается продуктам реформации, составим баланс тепла процесса, найдя предварительно энтальпию продуктов реформации при заданной температуре

$$I_{\text{п.р.}} = t_p (V_{\text{N}_2} c'_{p\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2} c'_{p\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} c'_{p\text{CO}} + V_{\text{H}_2} c'_{p\text{H}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} c'_{p\text{H}_2\text{O}}). \quad (50)$$

С учетом сказанного в предыдущем задании, баланс тепла процесса реформации без сажеобразования имеет вид

$$Q_{\text{н}} + I_{\text{в}} = I_{\text{п.р.}} + Q_x, \quad (51)$$

откуда можно определить энтальпию воздуха горения и температуру его подогрева, которая обеспечивает заданную температуру реформации. Методика определения температуры подогрева такая же, как в процессе реформации природного газа с сажеобразованием.

В связи с тем, что продукты реформации уносят химически связанное тепло, их необходимо дожигать вне рабочего пространства и использовать тепло, выделяемое при этом. Теоретическое количество воздуха для дожигания продуктов реформации определим, как и в предыдущем задании:

$$V_{\text{вт.в}}^0 = 4,76(0,5V_{\text{CO}} + 0,5V_{\text{H}_2}) \text{ [нм}^3/\text{нм}^3 \text{ г.]}. \quad (52)$$

Таким образом, процесс реформации природного газа без сажеобразования полностью рассчитан.

Приложение

Таблица П.1 – *Технические характеристики твердого топлива*

| № п/п | Месторождение и марка топлива | C ^г % | H ^г % | N ^г % | O ^г % | S ^г % | A ^с % | W ^р % | Q ^р _н МДж/кг |
|-------|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1 | Донецкий Д | 75,5 | 5,5 | 1,6 | 13,2 | 4,2 | 13 | 18 | 21,47 |
| 2 | Донецкий Г | 81 | 5,2 | 2,5 | 7,8 | 3,5 | 7 | 19,5 | 24,15 |
| 3 | Донецкий Т | 89 | 4,2 | 1,5 | 2,2 | 3,1 | 17 | 4,5 | 27,04 |
| 4 | Донецкий А | 93,5 | 2 | 0,8 | 2,3 | 1,4 | 14 | 5,8 | 27,0 |
| 5 | Кузнецкий Д | 78,5 | 5,6 | 2,3 | 13,2 | 0,4 | 9,5 | 10,5 | 24,95 |
| 6 | Кузнецкий Г | 82,4 | 5,8 | 2,2 | 9 | 0,6 | 10 | 8 | 26,45 |
| 7 | Кузнецкий Т | 89 | 4,4 | 2 | 3,8 | 0,8 | 19 | 7 | 25,58 |
| 8 | Минусинский Д1 | 78,3 | 5,8 | 1,7 | 13,6 | 0,6 | 21 | 11 | 21,68 |
| 9 | Минусинский Г | 78,9 | 5,4 | 1,7 | 13,3 | 0,7 | 13,5 | 14,5 | 22,56 |
| 10 | Уральский Б | 66 | 5,2 | 0,8 | 27,5 | 0,5 | 38,5 | 22,5 | 10,13 |
| 11 | Подмосковный Б1 | 68,5 | 5,3 | 1 | 20,1 | 5,1 | 32 | 37 | 10,5 |
| 12 | Подмосковный Б2 | 69,7 | 5,4 | 1 | 21,2 | 2,7 | 32 | 38 | 10,34 |
| 13 | Уральский Г | 80 | 5,7 | 1,3 | 9,2 | 3,8 | 28 | 5 | 21,56 |
| 14 | Уральский А | 89,5 | 3,6 | 1,3 | 5,0 | 0,6 | 22 | 5 | 24,62 |
| 15 | Уральский Б2 | 68 | 4,9 | 1,2 | 25,4 | 0,5 | 27 | 26 | 11,01 |

Таблица П.2 – *Технические характеристики газообразного топлива*

| № п/п | Месторождение | CH ₄ % | C ₂ H ₆ % | C ₃ H ₈ % | C ₄ H ₁₀ % | C ₅ H ₁₂ % | N ₂ % | CO ₂ % | Q ^с _н МДж/нм ³ |
|-------|---------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|--|
| 1 | Саратов 1 | 84,5 | 3,8 | 1,9 | 0,9 | 0,3 | 7,8 | 0,8 | 35,8 |
| 2 | Первомайск | 89,4 | 3,6 | 2,6 | 0,9 | 0,2 | 3,2 | 0,1 | 35,3 |
| 3 | Саратов 2 | 91,9 | 2,1 | 1,3 | 0,4 | 0,1 | 3 | 1,2 | 36,13 |
| 4 | Ставрополь 1 | 93,8 | 2,0 | 0,8 | 0,3 | 0,1 | 2,6 | 0,4 | 36,09 |
| 5 | Ставрополь 2 | 92,8 | 2,8 | 0,9 | 0,4 | 0,1 | 2,5 | 0,5 | 36,55 |
| 6 | Ставрополь 3 | 91,2 | 3,9 | 1,2 | 0,5 | 0,1 | 2,6 | 0,5 | 37,01 |
| 7 | Серпухов | 89,7 | 5,2 | 1,7 | 0,5 | 0,1 | 2,7 | 0,1 | 37,42 |
| 8 | Гоголево | 85,8 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | – | 13,7 | 0,1 | 30,98 |
| 9 | Дашава | 98,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | – | 0,4 | 0,2 | 35,87 |
| 10 | Рудки | 95,6 | 0,7 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 2,8 | 0,1 | 35,5 |
| 11 | Угерско | 98,5 | 0,2 | 0,1 | – | – | 1,0 | 0,2 | 35,5 |
| 12 | Брянск | 92,8 | 3,9 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 1,6 | 0,1 | 37,3 |
| 13 | Шебелинка 1 | 92,8 | 3,9 | 1,0 | 0,4 | 0,3 | 1,5 | 0,1 | 37,3 |
| 14 | Шебелинка 2 | 94,1 | 3,1 | 0,6 | 0,2 | 0,8 | 1,2 | – | 37,86 |
| 15 | Кумертау | 81,7 | 5,3 | 2,9 | 0,9 | 0,3 | 8,8 | 0,1 | 36,8 |

Таблица П. 3 – Исходные данные для I – t диаграммы продуктов сгорания

| № п/п | Для твердого топлива | | | | | Для газообразного топлива | | | | | Диапазон изменения α |
|----------|----------------------|------------|------------|-----------------------|---------------|---------------------------|------------|------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------|
| | α_1 | α_2 | α_3 | $t_1, ^\circ\text{C}$ | Q МДж/кг | α_1 | α_2 | α_3 | $t_1, ^\circ\text{C}$ | Q МДж/нм ³ | |
| 1 | 1,3 | 1,45 | 1,5 | 1800 | 4,0 | 1,05 | 1,15 | 1,2 | 1800 | 11,0 | $\alpha_1 - \alpha_3$ |
| 2 | 1,35 | 1,45 | 1,55 | 1700 | 5,0 | 1,06 | 1,1 | 1,25 | 1700 | 10,0 | $\alpha_2 - \alpha_3$ |
| 3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1800 | 6,0 | 1,04 | 1,12 | 1,2 | 1750 | 9,0 | $\alpha_1 - \alpha_2$ |
| 4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1700 | 7,0 | 1,05 | 1,12 | 1,22 | 1850 | 11,0 | $\alpha_1 - \alpha_3$ |
| 5 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1850 | 8,0 | 1,05 | 1,15 | 1,25 | 1800 | 10,5 | $\alpha_1 - \alpha_2$ |
| 6 | 1,35 | 1,45 | 1,55 | 1800 | 7,0 | 1,06 | 1,16 | 1,26 | 1850 | 11,0 | $\alpha_2 - \alpha_3$ |
| 7 | 1,45 | 1,55 | 1,6 | 1750 | 6,0 | 1,05 | 1,15 | 1,2 | 1800 | 11,5 | $\alpha_1 - \alpha_3$ |
| 8 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1700 | 5,5 | 1,04 | 1,12 | 1,22 | 1750 | 10,0 | $\alpha_1 - \alpha_2$ |
| 9 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1600 | 4,5 | 1,06 | 1,17 | 1,25 | 1700 | 9,5 | $\alpha_2 - \alpha_3$ |
| 10 | 1,3 | 1,45 | 1,6 | 1750 | 6,5 | 1,05 | 1,1 | 1,15 | 1600 | 11,0 | $\alpha_1 - \alpha_3$ |
| 11 | 1,35 | 1,5 | 1,65 | 1600 | 7,0 | 1,07 | 1,18 | 1,26 | 1650 | 10,0 | $\alpha_1 - \alpha_2$ |
| 12 | 1,4 | 1,55 | 1,65 | 1400 | 6,0 | 1,05 | 1,15 | 1,25 | 1750 | 8,5 | $\alpha_1 - \alpha_3$ |
| 13 | 1,45 | 1,65 | 1,75 | 1500 | 5,0 | 1,07 | 1,17 | 1,3 | 1800 | 9,5 | $\alpha_1 - \alpha_2$ |
| 14 | 1,55 | 1,7 | 1,8 | 1600 | 4,5 | 1,05 | 1,1 | 1,15 | 1850 | 10,0 | $\alpha_2 - \alpha_3$ |
| 15 | 1,3 | 1,45 | 1,55 | 1500 | 5,0 | 1,06 | 1,15 | 1,25 | 1650 | 8,0 | $\alpha_1 - \alpha_3$ |

Таблица П.4 – Исходные данные для расчета реформации газообразного топлива

| № п/п | Коэффициент избытка воздуха | Температура процесса реформации t_p |
|----------|-----------------------------------|--|
| 1 | 0,48 | 1300 |
| 2 | 0,49 | 1320 |
| 3 | 0,5 | 1330 |
| 4 | 0,51 | 1350 |
| 5 | 0,52 | 1360 |
| 6 | 0,53 | 1370 |
| 7 | 0,53 | 1380 |
| 8 | 0,52 | 1390 |
| 9 | 0,51 | 1390 |
| 10 | 0,5 | 1380 |
| 11 | 0,49 | 1370 |
| 12 | 0,48 | 1350 |
| 13 | 0,49 | 1360 |
| 14 | 0,5 | 1340 |
| 15 | 0,51 | 1320 |

Таблица П.5 – Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении
[кДж/(нм³К)]

| t °С | c'_p (N ₂) | c'_p (CO ₂) | c'_p (H ₂ O) | c'_p (H ₂) | c'_p (CO) | c'_p (ВЛ.ВОЗ.) |
|--------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|------------------|
| 0 | 1,2946 | 1,5998 | 1,4943 | 1,2766 | 1,2992 | 1,3186 |
| 100 | 1,2958 | 1,7003 | 1,5022 | 1,2908 | 1,3017 | 1,3240 |
| 200 | 1,2996 | 1,7873 | 1,5223 | 1,2971 | 1,3071 | 1,3136 |
| 300 | 1,3067 | 1,8627 | 1,5424 | 1,2992 | 1,3167 | 1,3420 |
| 400 | 1,3163 | 1,9297 | 1,5654 | 1,3021 | 1,3284 | 1,3542 |
| 500 | 1,3276 | 1,9887 | 1,5897 | 1,3050 | 1,3427 | 1,3680 |
| 600 | 1,3402 | 2,0411 | 1,6148 | 1,3080 | 1,3574 | 1,3826 |
| 700 | 1,3536 | 2,0884 | 1,6412 | 1,3121 | 1,3720 | 1,3973 |
| 800 | 1,3670 | 2,1311 | 1,6680 | 1,3167 | 1,3682 | 1,4111 |
| 900 | 1,3796 | 2,1692 | 1,6957 | 1,3226 | 1,3996 | 1,4245 |
| 1000 | 1,3917 | 2,2035 | 1,7229 | 1,3284 | 1,4126 | 1,4371 |
| 1100 | 1,4034 | 2,2349 | 1,7501 | 1,3360 | 1,4248 | 1,4496 |
| 1200 | 1,4143 | 2,2638 | 1,7769 | 1,3431 | 1,4361 | 1,4609 |
| 1300 | 1,4252 | 2,2898 | 1,8028 | 1,3511 | 1,4465 | 1,4722 |
| 1400 | 1,4348 | 2,3136 | 1,8280 | 1,3591 | 1,4566 | 1,4827 |
| 1500 | 1,4440 | 2,3354 | 1,8527 | 1,3674 | 1,4658 | 1,4923 |
| 1600 | 1,4528 | 2,3555 | 1,8761 | 1,3754 | 1,4746 | 1,5015 |
| 1700 | 1,4612 | 2,3743 | 1,8996 | 1,3833 | 1,4825 | 1,5098 |
| 1800 | 1,4687 | 2,3915 | 1,9213 | 1,3917 | 1,4901 | 1,5174 |
| 1900 | 1,4758 | 2,4047 | 1,9423 | 1,3996 | 1,4972 | 1,5254 |
| 2000 | 1,4825 | 2,4221 | 1,9628 | 1,4076 | 1,5039 | 1,5325 |
| 2100 | 1,4892 | 2,4359 | 1,9824 | 1,4551 | 1,5102 | 1,5396 |
| 2200 | 1,4951 | 2,4484 | 2,0009 | 1,4227 | 1,5160 | 1,5467 |
| 2300 | 1,5010 | 2,4602 | 2,0189 | 1,4302 | 1,5215 | 1,5538 |
| 2400 | 1,5064 | 2,4710 | 2,0365 | 1,4373 | 1,5269 | 1,5609 |
| 2500 | 1,5177 | 2,4811 | 2,0528 | 1,4449 | 1,5320 | 1,5680 |

Для расчета реформации газообразного топлива среднюю объемную теплоемкость метана (CH₄) принять – 1,684 кДж/(нм³ К)

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсової роботи
„СТАТИКА ГОРІННЯ ТА $I - t$ ДІАГРАМА ПРОДУКТІВ
ЗГОРЯННЯ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА”
з курсу
«ПАЛИВО ТА ПАЛИВНІ ПРИСТРОЇ»

для студентів-заочників фахів
7.095010 “Теплоенергетика”,
7.000008 “Енергетичний менеджмент”

Російською мовою

Укладач: АКМЕН Роберт Генріхович

Відповідальний за випуск В.Г. Павловський
Роботу до видання рекомендував Є.Т. Зайченко

В авторській редакції

План 2004р., поз. 110

Підп.до друку_____ Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1 Обл.-вид.арк 1,25 Тираж 150 прим.
Зам._____. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ „ХПІ” 61002, Харків-2, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000р.

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21