

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 18.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра химических технологий и переработки энергоносителей

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 18.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 66.011, 669 (073)

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ:
Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *М.Ю. Назаренко, С.Н. Салтыкова*. СПб, 2021. 60 с.

Приведены теоретический материал и примеры решения задач по основным разделам дисциплины, задачи для работы студентов на практических занятиях и самостоятельные работы

Предназначены для студентов бакалавриата направления 18.03.01 «Химическая технология» по профилю «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов».

Научный редактор проф. *Н.К Кондрашева*

Рецензент проф. *Б.А. Дмитриевский* (НПО «Минерал»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 18.03.01*

Сост.: *М.Ю. Назаренко, С.Н. Салтыкова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
химических технологий и переработки энергоносителей

Ответственный за выпуск *М.Ю. Назаренко*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 24.05.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 3,5. Усл.кр.-отт. 3,5. Уч.-изд.л. 3,2. Тираж 75 экз. Заказ 433.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по курсу «Химическая технология углей и горючих сланцев» предназначены для выполнения практических работ студентами бакалавриата по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология» по профилю «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов».

Цель дисциплины:

- знакомство с основами технологии по переработке углей и горючих сланцев;
- изучение теории процессов, проходящих при переработке углей и горючих сланцев;
- приобретение необходимых знаний для решения вопросов, связанных с переработкой твердых природных энергоносителей;

Основные задачи дисциплины:

- овладение методами исследования физико – химических и теплофизических свойств материалов и расчета энергетических характеристик материала;
- формирование навыков: по определению состава и свойств веществ и материалов; по проведению экспериментов по заданной методике; по составлению отчетов по выполненному заданию; по оценке влияния промышленного производства на состояние окружающей среды; по расчету основных реакций и процессов, происходящих при переработке природных энергоносителей.

В данных методических указаниях для дисциплины «Химическая технология углей и горючих сланцев» рассматриваются такие темы, как изучение свойств твердого топлива; химический состав твердого топлива; отношение топлива к нагреванию; теплотворность или теплота сгорания; калориметрическая температура горения топлива; производство кокса (технология обогащения коксующихся углей, типовые схемы процесса коксования, тепловой и материальный балансы).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Органическое ископаемое топливо (твердое, жидкое, газообразное) является в настоящее время и по прогнозам до 2030 г. основным источником энергии (теплоты) для промышленного использования, а также для транспортных двигателей.

Под *топливом* понимают вещества, выделяющие в результате тех или иных преобразований тепловую энергию, которая используется в технических целях.

По принципу выделения энергии различают две группы топлив: *химическое*, выделяющее энергию в результате окисления горючих элементов, и *ядерное*, выделяющее энергию при делении ядер. В настоящее время в мире преимущественно используется химическое или органическое топливо, являющееся источником около 70 % всей вырабатываемой энергии. При использовании топлив находят применение как выделяемая энергия – теплота, так и их химические свойства. Поэтому топлива могут быть разделены на *энергетические* и *технологические*.

Энергетическое топливо предназначено для сжигания с целью непосредственного получения тепловой энергии или ее преобразования в механическую и (или) электрическую энергию.

Технологическое топливо используется для ведения высокотемпературных технологических процессов (нагрев, обжиг, плавление и др.) и химической переработки для получения искусственного топлива (кокса) и технических продуктов (например, при сжигании кокса в доменных печах используются восстановительные свойства углерода).

По агрегатному состоянию все топлива делятся на *твердые*, *жидкие* и *газообразные*, а по способу получения или добычи – на *природные* и *производные (искусственные)*. Кроме древесины, все виды природных топлив представляют собой горючие ископаемые. Искусственное топливо получают путем переработки природного. Методы переработки весьма разнообразны и зависят от характеристики и назначения конечного продукта, в их основе лежат физико–механические воздействия на исходный продукт:

дробление, помол, нагрев, перегонка и т.д. Основные виды химических топлив представлены в таблице 1.

Таблица 1

Классификация основных видов химических топлив

Характеристика топлива	Виды топлива		
	Твердое	Жидкое	Газообразное
Природное	Древесина, торф, горючие сланцы, бурый уголь, каменный уголь, антрацит	Нефть, газовые конденсаты	Природный газ, попутные газы нефтяных месторождений
Искусственное	Полукокс, кокс, торфяные и угольные брикеты, древесный уголь	Бензин, лигроин, керосин, газойль, моторные топлива, газотурбинное топливо, мазут и др.	Нефтяной, полукоксый, коксовый, генераторный, доменные газы, газ подземной газификации углей, сланцевый газ

При проведении химического анализа топлива определяются доли различных химических элементов и составляющих его веществ, т.е. элементарный состав. Органическое топливо состоит из сложных соединений различных элементов: углерода С, водорода Н, кислорода О, серы S, азота N и других, а также балласта в виде влаги W и минеральных компонентов не участвующих в процессе горения и способствующих образованию золы A.

Топливо состоит из *горючей* и *негорючей* частей. В горючую часть твердого и жидкого топлива входят углерод С, водород Н и сера S, а также условно кислород О и азот N; в негорючую часть – зола A, представляющая смесь минеральных веществ, и влага W, составляющие его балласт B. Они попадают в топливо из недр земли, а также при транспортировке и хранении топлива на складах:

$$B = A + W$$

где B – балласт топлива; A – зола; W – влага.

1. Элементарный состав топлива

Углерод С является главной горючей составляющей всех топлив. При полном сгорании углерода тепловыделение составляет $33,5 \cdot 10^3$ кДж/кг. Тепловая ценность топлива определяется содержанием в нем углерода. Так, в древесине и торфе его доля достигает 58 %, в угле и мазуте – 90 %. При термохимической переработке топлив углерод служит основой для образования вторичных органических веществ и составляет основную часть важного искусственного технологического топлива – кокса.

Водород Н – вторая важнейшая горючая составляющая любого топлива. Тепловыделение при его сгорании зависит от агрегатного состояния (жидкое или парообразное) конечного продукта горения водорода-воды и может достигать $142 \cdot 10^3$ кДж/кг. С увеличением возраста твердого топлива содержание в нем водорода падает.

Кислород О является балластной примесью в топливе, снижает его тепловую ценность. Кроме того, он связывает в топливе водород, обесценивая и его. В твердых топливах с небольшим химическим возрастом содержание кислорода может достигать 30 % и выше, а в большинстве жидких моторных топлив оно не превышает 1,5 %.

Азот N также балластирует топливо, снижая содержание в нём горючих веществ. В составе твердого топлива его содержится до 1,5 %, в жидких – менее 1 %.

Сера S входит в топливо в трех видах: сера органическая $S_{орг}$, входящая в состав его органических соединений; сера колчеданная $S_{к}$, входящая в состав сульфидов, главным образом пирита и марказита FeS_2 , и сера сульфатная $S_{с}$, входящая в состав различного вида сульфатов, например $CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$ и др. Первые две составляющие серы горят – это так называемая летучая (горючая) сера: $S_{л} = S_{орг} + S_{к}$.

Сульфатная сера в горении топлива не участвует, так как уже находится в соединении с кислородом. В связи с этим она включается во внешний негорючий остаток – золу. Суммарное содержание серы во всех трех соединениях носит название серы общей – $S_{общ} = S_{орг} + S_{к} + S_{с} = S_{л} + S_{с}$. Сера является вредной составляющей топлива, так как при её сгорании образуются оксиды:

сернистый ангидрид SO_2 и серный ангидрид SO_3 . Особенно вреден SO_3 , который, соединяясь с влагой, дает в качестве конечного продукта серную кислоту: $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$. Она вызывает интенсивную коррозию металла котельных агрегатов, двигателей внутреннего сгорания, строительных конструкций и т.д. Выбросы SO_2 и SO_3 в атмосферу оказывают вредное влияние на окружающую среду.

Минеральные компоненты А являются главной балластной составляющей топлива, входящей в состав остаточного продукта полного сгорания топлива – золы. В состав золы входят как вещества, образующие минеральную часть топлива, так и продукты их разложения и окисления. Содержание минеральных компонентов в твердых топливах колеблется в очень широких пределах: от (1÷2) % в древесине до 70 % в сланцах, в жидких топливах – до (1÷5) %. Количество минеральных компонентов в топливе определяет его *зольность*, т.е. способность образовывать в процессе сгорания золу. Основной характеристикой золы является температура плавления, зависящая от ее состава. Топлива с большим содержанием минеральных компонентов нецелесообразно перевозить на большие расстояния.

Влага W так же, как и минеральные компоненты, – балласт, снижающий тепловую ценность топлива и определяющий целесообразность его транспортировки на большие расстояния. На испарение влаги тратится часть теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, что уменьшает температурный уровень процесса горения. Кроме того, снижается значение температуры точки росы водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания и увеличивается опасность низкотемпературной коррозии. Доля влаги в составе топлива колеблется очень широко: от (0,3÷1,5) % в мазуте, 5 % в каменных углях, до (20÷57) % в торфах и бурых углях.

Элементарный состав *горючих газов* можно представить так же, как и твердых и жидких топлив. Однако для удобства анализа и расчетов процесса горения газов их состав обычно представляют в виде суммы объемных долей горючих компонентов и балластных примесей в процентах, определяемых при нормальных условиях без учета водяных паров, т.е. на сухую массу топлива.

В состав природных газов в качестве горючих элементов входят: метан CH_4 – до 98,9 %, углеводороды метанового ряда $(0,3 \div 10)$ % – этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и другие, а также в виде следов сероводород H_2S . Балластом являются азот N_2 , углекислый газ CO_2 и водяные пары.

В попутных газах нефтяных месторождений содержание метана ниже (до 45 %), однако возрастает доля тяжелых углеводородов (до 40 %).

Искусственные газы в качестве горючих компонентов содержат водород, метан, оксид углерода CO и небольшие количества тяжелых углеводородов (в коксовом газе). Балластными примесями в искусственных газах являются CO_2 , N_2 , водяные пары и пыль.

Влагосодержание газообразных топлив d , кг/м^3 , колеблется в зависимости от состояния топлива.

2. Характеристика твердых топлив по составу

Содержание химических элементов и других составляющих топлива исчисляется в процентах от единицы массы или объема, исходя из определенной части (массы) топлива. В зависимости от состава и вида топлива различают рабочую, аналитическую, сухую, горючую и органическую массы топлива. Каждой массе присваивается соответствующий индекс: рабочей – p , сухой – c , горючей – z , органической – o , аналитической – a .

Для твердых топлив применимы все пять масс. О составе топлива на соответствующую массу судят по индексу элементов. Топливо в том виде, в котором оно приходит к потребителю, называется *рабочим*. Его состав наиболее полно отражает состояние топлива. Элементарный состав рабочей массы записывается в следующем виде:

$$\text{C}^p + \text{H}^p + \text{O}^p + \text{N}^p + \text{S}_n^p + \text{A}^p + \text{W}^p = 100 \text{ \%}.$$

На лабораторный анализ топливо поступает воздушно-сухим, т.е. высушенным до постоянного веса на воздухе в естественных условиях. Масса такого топлива называется *аналитической*. Ее элементарный состав представляется в виде:

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_{д}^a + A_a + W_a = 100 \%$$

При полном высушивании топлива (при $t \geq 105 \text{ }^\circ\text{C}$) получают сухую массу. Уравнение элементарного состава сухой массы топлива имеет вид:

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S_{д}^c + A_c = 100 \%$$

Под горючей массой топлива понимают топливо, не содержащее механических компонентов и влаги (балласта). Уравнение элементарного состава горючей массы топлива:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_{д}^r = 100 \%$$

Органическая масса топлива в отличие от горючей не содержит колчеданную серу. Элементарный состав этой массы может быть выражен равенством

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S_{д}^o = 100 \%$$

Очевидно, что при переходе от рабочей к органической массе доля химических элементов в составе топлива увеличивается, т.е.

$$C^o > C^r > C^c > C^a > C^p.$$

3. Пересчет элементарного состава топлива в различные массы

Пересчет элементарного состава с горючей массы топлива на его рабочую массу и обратно производится по формулам:

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$$

$$H^p = H^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} \text{ и т.д.}$$

Для обратного пересчета из рабочей массы в горючую используется множитель $\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$.

Множители для пересчета состава топлива с одной массы на другую приводятся в таблице 2.

Таблица 2

Множители (коэффициенты) для пересчета состава топлив

Заданная масса	Искомая масса		
	рабочая	сухая	горючая
рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^P}$	$\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$
сухая	$\frac{100 - W^P}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^P}$
горючая	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$	$\frac{100 - A^P}{100}$	1

Если топливо содержит большое количество карбонатов (более 2 %), например, горючие сланцы, то коэффициент пересчета (множитель) принимается с учетом разложения карбонатов. В этом случае за горючую массу принимают следующее выражение:

$$G = 100 - (A_{испр} + W^P) - (CO_2)_k,$$

где $(CO_2)_k$ – содержание углекислоты карбонатов, %; $A_{испр}$ – зольность топлива за вычетом сульфатов, образовавшихся при разложении карбонатов с поправкой на сгорание колчеданной серы:

$$A_{испр} = A^P - A_c \left(1 - \frac{W^P}{100} \right).$$

Поправку A_c равной в интервале (2,0÷4,1). Пересчет элементного состава рабочей массы топлива с влажностью W_1^P на массу с влажностью W_2^P производится умножением исходных

составляющих на множитель $\frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p}$. То же самое имеет место

при изменении зольности топлива с A_1 до A_2 : $\frac{100 - A_2}{100 - A_1}$.

Пример 1. При лабораторных исследованиях был получен элементный состав кузнецкого угля марки СС на горючую массу: $C^r = 84,0\%$; $H^r = 4,5\%$; $O^r = 9,0\%$; $N^r = 2,0\%$; $S_{л}^r = 0,5\%$. Влажность и зольность на рабочую массу равны $W^p = 12,0\%$ и $A^p = 11,4\%$. Определить элементный состав на рабочую массу топлива.

Решение. Для пересчета с горючей массы на рабочую используем коэффициент пересчета:

$$K = \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = \frac{100 - (11,4 + 12,0)}{100} = 0,766.$$

Тогда:

$$C^p = C^r K = 84,0 \cdot 0,766 = 64,34\%;$$

$$H^p = H^r K = 4,5 \cdot 0,766 = 3,45\%;$$

$$N^p = N^r K = 2,0 \cdot 0,766 = 1,53\%;$$

$$O^p = O^r K = 9,0 \cdot 0,766 = 6,90\%;$$

$$S^p = S^r K = 0,5 \cdot 0,766 = 0,38\%;$$

Проверка: суммарный элементный состав топлива на рабочую массу должен равняться 100 %:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_{л}^p + A^p + W^p = 100\%.$$
$$64,34 + 3,45 + 6,90 + 1,53 + 0,38 + 12,0 + 11,40 = 100\%.$$

Пример 2. Задан следующий элементный состав на горючую массу кузнецкого угля марки СС ухудшенного состава: $C^r = 80,2\%$; $H^r = 3,3\%$; $O^r = 14,0\%$; $N^r = 2,1\%$; $S_{л}^r = 0,4\%$. Известно, что

зольность сухой массы $A^c = 22,12\%$. Определить элементный состав топлива на рабочую массу при $W^p = 15,0\%$.

Решение. В соответствии с таблицей 2 коэффициент пересчета масс имеет вид $\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$. Для его использования пересчитаем зольность с сухой массы на рабочую:

$$A^p = A^c \frac{100 - W^p}{100} = 22,12 \frac{100 - 15,0}{100} = 18,80\%.$$

Тогда

$$K = \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = \frac{100 - (15,0 + 18,8)}{100} = 0,662.$$

Определяем элементный состав топлива на рабочую массу:

$$C^p = C^r K = 80,2 \cdot 0,662 = 53,09\%;$$

$$H^p = H^r K = 3,3 \cdot 0,662 = 2,18\%;$$

$$N^p = N^r K = 2,1 \cdot 0,662 = 1,39\%;$$

$$O^p = O^r K = 14,0 \cdot 0,662 = 9,27\%;$$

$$S^p = S^r K = 0,4 \cdot 0,662 = 0,27\%;$$

Проверяем полный элементный состав рабочей массы:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_{п}^p + A^p + W^p = 100\%.$$
$$53,09 + 2,18 + 9,27 + 1,39 + 0,27 + 18,8 + 15,0 = 100\%.$$

4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «топливо».
2. Для чего предназначено энергетическое и технологическое топливо?
3. Приведите примеры искусственного вида топлива различного агрегатного состояния.

4. Из чего состоят горючая и негорючая части твердого топлива?
5. Что такое балласт топлива?
6. Что является главной горючей составляющей всех видов топлив?
7. В каких видах сера входит в состав топлив?
8. В чем отличие рабочей, сухой, аналитической и горючей масс топлива?
9. При какой температуре достигается полное высушивание массы твердого топлива?
10. Как осуществляется пересчет рабочей массы горючих сланцев в аналитическую? сухую? органическую?

5. Задачи для самостоятельного решения

Задание 1. Сушка березовского угля с составом рабочей массы: $W^p = 33,0\%$; $A^p = 4,7\%$; $C^p = 44,3\%$; $H^p = 3,0\%$; $O^p = 14,4\%$; $N^p = 0,4\%$; $S_{л}^p = 0,2\%$. Определите состав рабочей массы подсушенного до $W^p = 10,0\%$ топлива.

Задание 2. Содержание углерода в рабочей массе экибастузского угля составляет $43,4\%$ при влажности рабочей массы $7,0\%$ и зольности $38,1\%$. Определите содержание углерода в сухой массе при увеличении рабочей зольности топлива до $45,0\%$.

Задание 3. Определите состав горючей массы нерюнгринского угля, если известен состав рабочей массы: $W^p = 9,5\%$; $A^p = 12,7\%$; $C^p = 66,1\%$; $H^p = 3,3\%$; $O^p = 7,5\%$; $N^p = 0,7\%$; $S_{л}^p = 0,2\%$.

Задание 4. Определите рабочий состав эстонских сланцев, если известен элементный состав горючей массы: $C^r = 72,13\%$; $H^r = 10,16\%$; $O^r = 12,13\%$; $N^r = 0,33\%$; $S_{л}^r = 5,25\%$. Рабочая масса имеет: $W^p = 13,0\%$; $A^p = 40,0\%$; $(CO_2)^p_k = 16,5\%$.

Задание 5. Определите состав рабочей массы челябинского угля марки ЗБ, если состав его горючей массы: $C^r = 71,0\%$; $H^r = 5,3\%$; $O^r = 20,1\%$; $N^r = 1,9\%$; $S_{л}^r = 1,7\%$. Зольность сухой массы топлива $43,0\%$, а влажность угля на рабочую массу $17,0\%$.

Задание 6. Определите состав рабочей массы ленинградских горючих сланцев, если состав их горючей массы следующий:

углерод – 74,0 %, водород – 9,5 %, сера – 6,1 %, азот – 0,4 %, кислород – 10,0 % ($W^p = 11,5$ %; $A^p = 46,0$ %; $(CO_2)^p_k = 16,4$ %).

Задание 7. Определить состав горючей массы кизеловского угля марки Г, если состав его рабочей массы: $C^p = 48,5$ %; $H^p = 3,6$ %; $S^p_{л} = 6,1$ %; $N^p = 0,8$ %; $O^p = 4,0$ %; зольность сухой массы $A^c = 33,0$ % и влажность рабочая $W^p = 6,0$ %.

Задание 8. Определить состав рабочей массы угля марки БЗ, если состав его горючей массы: $C^r = 71,1$ %; $H^r = 5,3$ %; $S^r_{л} = 1,9$ %; $N^r = 1,7$ %; $O^r = 20,0$ %.; зольность сухой массы $A^c = 36$ % и влажность рабочая $W^p = 18,0$ %.

Задание 9. Определить состав рабочей массы угля марки Д, если состав его горючей массы: $C^r = 78,5$ %; $H^r = 5,6$ %; $S^r_{л} = 0,4$ %; $N^r = 2,5$ %; $O^r = 13,0$ %.; зольность сухой массы $A^c = 15,0$ % и влажность рабочая $W^p = 12,0$ %.

Задание 10. В мельнице-вентиляторе подсушивается уголь марки Б2 состава: $C^{p_1} = 28,7$ %; $H^{p_1} = 2,2$ %; $S^{p_1}_{л} = 2,7$ %; $N^{p_1} = 0,6$ %; $O^{p_1} = 8,6$ %.; $A^{p_1} = 25,2$ % и $W^{p_1} = 32$ %. Определить состав рабочей массы подсушенного топлива, если известно, что влажность топлива после подсушки $W^{p_2} = 15,0$ %.

Задание 11 Был получен элементный состав бурого угля марки на горючую массу: $C^r = 80,0$ %; $H^r = 6,5$ %; $O^r = 11,0$ %; $N^r = 2,0$ %; $S^r_{л} = 0,5$ %. Влажность и зольность на рабочую массу равны $W^p = 12,0$ % и $A^p = 11,4$ %. Определить элементный состав на рабочую массу топлива.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТВОРНОСТИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА: УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Главным показателем энергетической ценности топлива является теплота его сгорания.

1. Теплота сгорания топлива

Теплотой сгорания топлива называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого (или жидкого) топлива или 1 м³ газообразного топлива при нормальных условиях. Ее можно определять экспериментально и теоретически, если известен элементарный состав топлива.

Экспериментально теплоту сгорания топлива находят в калориметрической установке. Точно взвешенную навеску испытуемого топлива сжигают в среде сжатого кислорода в калориметрической бомбе и определяют количество выделившейся теплоты. Однако условия сжигания топлива в калориметрической бомбе в значительной степени отличаются от реальных условий их использования в двигателях внутреннего сгорания, парогенераторах, печах и пр.

При сгорании топлив в калориметрической бомбе образуются газообразные продукты, в состав которых входят водяные пары, образующиеся в результате окисления водорода топлива и испарения содержащейся в нем влаги. Температура продуктов сгорания в бомбе близка к температуре окружающей среды, т.е. значительно ниже значения температуры точки росы, поэтому происходит конденсация водяных паров и, следовательно, выделяется соответствующее количество теплоты, при учете которой из опыта находят *высшую теплоту сгорания* Q_v^p .

На практике обычно температура продуктов сгорания, покидающих теплоэнергетическую установку, выше температуры точки росы, и вода, содержащаяся в них, выходит в виде пара, с которым бесполезно теряется и теплота конденсации. Поэтому для оценки реальной теплотворной способности топлив используется понятие *низшей теплоты сгорания* Q_n^p , которая представляет собой количество теплоты, выделившейся при полном сгорании 1 кг топлива, без учета теплоты, выделившейся при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Она меньше высшей на величину неиспользованной теплоты, выделяющейся при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания:

$$Q_n^p = Q_v^p - 25 \cdot (9H^p + W^p),$$

где Q_n^p, Q_v^p – соответственно низшая и высшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг; $25 \cdot (9H^p + W^p)$ – общая теплота, выделяемая при конденсации водяных паров, образующихся в результате сгорания водорода топлива в количестве H^p (%) и

испарившейся в процессе сгорания влаги топлива в количестве W^p (%). Множитель 25 – это энтальпия 1 кг паров при давлении 0,1 МПа, исчисленная на 1 % состава топлива.

Теплота сгорания горючих газов определяется в такой же калориметрической установке или в калориметре, в котором теплота сгорающего топлива полностью поглощается водой, проходящей через калориметр.

Высшая теплота сгорания используется для сравнения тепловой ценности отдельных топлив, низшая – во всех технических расчетах.

Теплоту сгорания твердого и жидкого топлив, кДж/кг, при известном их элементарном составе приближенно можно вычислить по эмпирическим формулам, из которых наиболее распространена формула Д.И. Менделеева:

– низшая удельная теплота сгорания рабочей массы топлива (МДж/кг):

$$Q_{H}^p = 0,339 \cdot C^p + 1,030 \cdot H^p - 0,109 \cdot (O^p - S^p) - 0,025 \cdot (9H^p + W^p);$$

– высшая удельная теплота сгорания рабочей массы топлива (МДж/кг):

$$Q_{s}^p = 0,339 \cdot C^p + 1,030 \cdot H^p - 0,109 \cdot (O^p - S^p),$$

где C^p , H^p , O^p , S^p , W^p – содержание в рабочей массе топлива отдельных химических элементов в процентах.

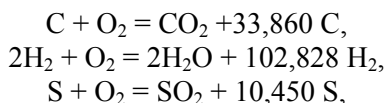
При определении низшей удельной теплоты сгорания последний член суммы учитывает теплоту, поглощенную при испарении влаги топлива и при переходе в пар воды, образовавшейся при горении водорода. Более точно теплоту сгорания определяют экспериментально.

Низшую объемную теплоту сгорания (кДж/м³) газообразного топлива определяют сложением тепловых эффектов реакций горения горючих газов, содержащихся в сухом топливе, по формуле

$$Q_{H}^c = 126 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 350 \cdot CH_4 + 234 H_2S.$$

При сгорании других горючих газов, не учтенных в приведенной формуле, выделяется следующая объемная теплота (кДж/м³): этана С₂Н₆ – 63 600, пропана С₃Н₈ – 89 400, бутана С₄Н₁₀ – 118 800, пентана С₅Н₁₂ – 166 700, этилена С₂Н₄ – 59 000.

Выделение теплоты при горении топлива объясняется тепловым эффектом реакций горения:



где 33,860; 102,828; 10,450 – тепловые эффекты (МДж/кг) реакции горения С, Н₂ и S соответственно.

Но не все составляющие, входящие в состав рабочей массы топлива, выделяют теплоту при горении. Влага топлива при переходе в пар поглощает теплоту; сера, входящая в состав сульфатов, при их диссоциации также поглощает теплоту.

2. Условное топливо

Различие теплот сгорания топлив разных видов, сортов и марок весьма велико. Так, теплота сгорания твердых топлив колеблется от $(8 \cdot 10^3 \div 12 \cdot 10^3)$ кДж/кг у торфа, до $(25 \cdot 10^3 \div 26 \cdot 10^3)$ кДж/кг у каменных углей; жидких топлив – от $40 \cdot 10^3$ кДж/кг у мазутов и до $47 \cdot 10^3$ кДж/кг у бензинов. Еще больший разброс в теплотах сгорания у газов: если у доменного газа $Q^p_H = 33,3 \cdot 10^3$ кДж/м³, то у попутных газов нефтяных месторождений она поднимается до $47 \cdot 10^3$ кДж/м³.

В силу этого обстоятельства – учет и планирование расхода топлива, контроль за его экономным потреблением сильно затруднены не только в общегосударственных масштабах, но и в пределах любого предприятия.

Поэтому для сравнения тепловой ценности различных топлив, вариантов замен одного топлива другим, составления норм расхода топлива и планирования его потребности введены такие технико-экономические понятия, как условное топливо и топливные эквиваленты.

Условным называется топливо, имеющее теплоту сгорания $Q_y = 29\,302$ кДж/кг. Эта величина принята как отправная для планирования расхода и отчета об использовании топлива.

Относительная ценность различных топлив рассматривается в сравнении с условным с помощью топливных эквивалентов. *Топливным эквивалентом* $\mathcal{E}m$ называется отношение низшей теплоты сгорания рабочей массы реального топлива к теплоте сгорания условного топлива:

$$\mathcal{E}m = \frac{Q_n^p}{Q_y}$$

Топливный эквивалент применяют при планировании расхода топлива и в отчетности. Топливные эквиваленты позволяют производить перерасчеты расходов топлива из условного в реальное, и наоборот, на основании соотношений:

$$B_p = \frac{B_y}{\mathcal{E}m},$$

где B_p и B_y – расходы соответственно реального и условного топлив, кг/с (кг/ч, т/год и т.п.).

3. Расчет теплоты сгорания топлива

Пересчет теплот сгорания топлив на рабочую, сухую, аналитическую и горючую массы осуществляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Q_n^p &= Q_g^p - 25 \cdot (9H^p + W^p), \\ Q_n^c &= Q_g^c - 226 \cdot H^c, \\ Q_n^z &= Q_g^z - 226 \cdot H^z, \\ Q_n^p &= Q_n^c \cdot \left(\frac{100 - W^p}{100} \right) - 25 \cdot W^p, \end{aligned}$$

$$Q_n^p = Q_n^z \cdot \left(\frac{100 - W^p - A^p}{100} \right) - 25 \cdot W^p.$$

Здесь индексы «р», «с», «г» относятся к рабочей, сухой и горючей массам топлива.

При изменении влажности от W_1^p до W_2^p и зольности с A_1 до A_2 топлива для определения теплоты сгорания используют следующие зависимости:

$$Q_{n2}^p = (Q_{n1}^p + 25W_1^p) \cdot \left(\frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} \right) - 25 \cdot W_2^p,$$

$$Q_{n2}^p = Q_{n1}^z \cdot \left(\frac{100 - A_2^p}{100 - A_1^p} \right).$$

При одновременно изменении влажности и зольности:

$$Q_{n2}^p = (Q_{n1}^p + 25W_1^p) \cdot \left(\frac{100 - W_2^p - A_2^p}{100 - W_1^p - A_1^p} \right) - 25 \cdot W_2^p.$$

Для приближенных расчетов, а также для проверки элементного состава топлива (если задана Q_n^p) низшую теплоту сгорания, кДж/кг, определяют по формуле:

$$Q_{H^p}^p = 339 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p;$$

$$Q_{H^z}^z = 339 \cdot C^z + 1030 \cdot H^z - 109 \cdot (O^z - S^z).$$

Расхождение полученной низшей теплоты сгорания горючей массы топлива, полученной в калориметрической бомбе, не должно превышать ± 628 кДж/кг для топлив с зольностью менее 25 % и ± 837 кДж/кг – для других топлив.

При сжигании смеси двух твердых или жидких топлив, заданных массовыми долями (q^1 – массовая доля одного из топлив в смеси), теплота сгорания 1 кг смеси подсчитывается по формуле:

$$Q_n^p = \frac{Q_n^p \cdot q}{Q_n^p \cdot (1 - q)}.$$

Если же смесь задана в долях по тепловыделению каждого топлива (q_1 – доля одного из топлив в смеси), то для перехода к массовым долям используется следующая зависимость:

$$g_1 = \frac{q_1 \cdot Q_{n2}^p}{q_1 \cdot Q_{n2}^p + (1 - q_1) \cdot Q_{n1}^p}.$$

При сжигании смеси твердого или жидкого топлива с газообразным, расчет ведется на 1 кг твердого или жидкого топлива с учетом количества газа (x , м³), приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_n^p = Q_{n1}^p + x \cdot Q_{n2}^p.$$

Если смесь задана в долях тепловыделения q , то количество газа, м³, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива, может быть найдено по следующей зависимости:

$$x = \left(\frac{1 - q}{q} \right) \cdot \left(\frac{Q_{n1}^p}{Q_{n2}^p} \right).$$

На основе вышесказанного, теплоту сгорания смеси можно получить, зная исходные данные по основному топливу Q_{n1}^p и q_1 :

$$Q_n^p = Q_{n1}^p \cdot \frac{1}{q_1}.$$

Пример 1. Для кузнецкого угля марки СС, следующего состава на горючую массу: $C^r = 84,0 \%$; $H^r = 4,5 \%$; $O^r = 9,0 \%$; $N^r = 2,0 \%$; $S_{л}^r = 0,5 \%$, (влажность и зольность на рабочую массу равны $W^p = 12,0 \%$ и $A^p = 11,4 \%$), определить Q_n^p, Q_n^e, Q_n^c , если низшая теплота сгорания рабочей массы равна $Q_n^p = 23\,990$ кДж/кг.

Решение. Определение рабочей низшей теплоты сгорания для данного угля:

$$Q_n^p = Q_g^p - 25 \cdot (9N^p + W^p) = 23\,990 + 25 \cdot (9 \cdot 3,45 + 12,0) = 25\,071 \text{ кДж/кг.}$$

Определение низшей теплоты сгорания сухой массы для данного угля:

$$\begin{aligned} Q_n^c &= (Q_g^p + 25W^p) \cdot \left(\frac{100}{100 - W^p} \right) - 226 \cdot H^c = \\ &= (23\,990 + 25 \cdot 12,0) \cdot \left(\frac{100}{100 - 12,0} \right) - 226 \cdot 3,92 = \\ &= 27\,604 - 886 = 26\,718 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Определение низшей теплоты сгорания горючей массы для данного угля:

$$\begin{aligned} Q_n^e &= (Q_g^p + 25W^p) \cdot \left(\frac{100}{100 - W^p - A^p} \right) - 226 \cdot H^r = \\ &= (23\,990 + 25 \cdot 12,0) \cdot \left(\frac{100}{100 - 12,0 - 11,4} \right) - 226 \cdot 4,5 = \\ &= 30\,695 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Пример 2. Насколько увеличится высшая и низшая теплота сгорания рабочей массы угольной пыли назаровского угля при переходе от замкнутой схемы сушки к разомкнутой с окончательной влажностью пыли $10,0 \%$. Исходная низшая теплота сгорания

рабочей массы топлива равна 13 020 кДж/кг. Состав рабочей массы топлива: $W^p = 39,0\%$ и $A^p = 7,3\%$, $C^p = 37,6\%$; $H^p = 2,6\%$; $S^p_{пл} = 0,4\%$; $N^p = 0,4\%$; $O^p = 14,4\%$

Решение. Определяем низшую теплоту сгорания пыли:

$$\begin{aligned} Q_n^{nl} &= (Q_n^p + 25W^p) \cdot \left(\frac{100 - W^{nl}}{100 - W^p} \right) - 25 \cdot W^{nl} = \\ &= (13\,020 + 25 \cdot 39,0) \cdot \left(\frac{100 - 10,0}{100 - 39,0} \right) - 25 \cdot 10,0 = 20\,403 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Находим высшую теплоту сгорания исходного топлива и пыли:

$$Q_g^p = Q_n^p + 25 \cdot (9H^p + W^p) = 13\,020 + 25 \cdot (9 \cdot 2,6 + 39,0) = 14\,586 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_g^{nl} = Q_g^p \cdot \left(\frac{100 - W^{nl}}{100 - W^p} \right) = 14\,586 \cdot \left(\frac{100 - 10,0}{100 - 39,0} \right) = 21\,520 \text{ кДж/кг}.$$

Другой вариант определения высшей теплоты сгорания пыли:

$$Q_g^{nl} = Q_n^{nl} + 25 \cdot (9H^{nl} + W^{nl}) = 20\,403 + 25 \cdot (9 \cdot 3,84 + 10,0) = 21\,520 \text{ кДж/кг},$$

где

$$H^{nl} = H^p \cdot \left(\frac{100 - W^{nl}}{100 - W^p} \right) = 2,6 \cdot \left(\frac{100 - 10,0}{100 - 39,0} \right) = 3,84\%.$$

Пример 3. Определить теплоту сгорания газообразного топлива, имеющего следующий состав: $CH_4 = 94,0\%$; $C_2H_6 = 2,8\%$; $C_3H_8 = 0,4\%$; $C_4H_{10} = 0,3\%$; $C_5H_{12} = 0,1\%$; $N_2 = 2,0\%$; $CO_2 = 0,4\%$.

Решение. Определим теплоту сгорания газа следующим образом:

$$Q_n^c = 0,01 \cdot [Q_{H_2S} \cdot H_2S + Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2 + \sum (Q_{C_mH_n} C_m H_n)],$$

где Q_{H_2S} , Q_{CO} и т.д. – теплота сгорания отдельных составляющих, входящих в состав газообразного топлива, кДж/м³.

$$\begin{aligned} Q_n^c &= 0,01 [Q_{H_2S} H_2S + Q_{CO} CO + Q_{H_2} H_2 + \sum (Q_{C_mH_n} C_m H_n)] = \\ &= 0,01(0 + 0 + 0 + 35818 \cdot 94,0 + 63248 \cdot 2,8 + 91251 \cdot 0,4 + \\ &+ 118646 \cdot 0,3 + 146077 \cdot 0,1) = 36321 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Пример 4. При работе на сниженных нагрузках в топке котла сжигается 25 т/ч твердого топлива с $Q_n^p = 20\,934$ кДж/кг и $15 \cdot 10^3$ м³/ч газа $Q_n^p = 40 \cdot 10^3$ кДж/кг. Определите условную теплоту сгорания смеси топлив.

Решение. При сжигании твердого или жидкого топлива в смеси с газообразным расчет ведется по условной теплоте сгорания, отнесенной к 1 кг твердого или жидкого топлива: $Q_n^p = Q_n^p + xQ_n^p$, где x – количество газа, м³, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива,

$$x = \frac{15 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} = 0,6.$$

Тогда $Q_n^p = 20\,934 + 0,6 \cdot 40 \cdot 10^3 = 44\,934$ кДж/кг.

4. Контрольные вопросы

1. Перечислите твердые виды горючих ископаемых.
2. Что составляет балласт твердого топлива?
3. Дайте определение теплоты сгорания топлива.

4. В чем отличие высшей теплоты сгорания топлива от низшей?
5. Для чего используется высшая теплота сгорания топлива?
6. Для чего используется низшая теплота сгорания?
7. Как можно найти теплоту сгорания твердого или жидкого топлива если известен его элементарный состав?
8. Что называется условным топливом?
9. Зачем ввели понятие условного топлива?
10. Как найти топливный эквивалент?
11. Как определить теплоту сгорания смеси твердых топлив?
12. Как определить теплоту сгорания смеси твердого и жидкого топлива?

5. Задачи для самостоятельного решения

Задание 1. Проверить правильность определения элементного состава топлива, если известны данные лабораторных исследований: $C^c = 62,17\%$; $H^c = 4,10\%$; $O^c = 5,17\%$; $N^c = 1,29\%$; $S_{п}^c = 3,27\%$, $W^p = 7,90\%$; $A^p = 22,10\%$ и $Q_n^p = 22\,776$ кДж/кг.

Задание 2. При открытом способе добычи угля прошло увеличение его зольности с $38,1\%$ до $48,0\%$ в рабочей массе и влажности с $7,0\%$ до $11,0\%$. Определите насколько изменится низшая теплота сгорания угля, если ее исходное значение составляло $Q_n^p = 16\,747$ кДж/кг.

Задание 3. Определить теплоту сгорания смеси твердого топлива с низшей теплотой сгорания $Q_{n1}^p = 13\,020$ кДж/кг и мазута с $Q_{n2}^p = 38\,800$ кДж/кг при тепловой доле твердого топлива в смеси $q=0,30$.

Задание 4. На ТЭЦ сжигается доменный газ и мазут. Доля тепловыделения доменного газа $q = 0,6$. Определите количество газа на 1 кг мазута и теплоту сгорания смеси на 1 кг мазута. Мазут имеет $Q_{n1}^p = 38\,870$ кДж/кг, а доменный газ $Q_{n2}^p = 3710$ кДж/кг.

Задание 5. Используя данные, представленные в таблице 3, определите Q_n^p, Q_n^s, Q_n^c для углей различных месторождений.

Таблица 3

Расчетные характеристики углей различных месторождений

№ п/п	Бассейн, месторождение	Состав рабочей массы топлив, %							Теплота сгорания, Q_n^p , МДж/кг
		W^p	A^p	S^p	C^p	H^p	N^p	O^p	
1	Донецкий (марка Д)	13,0	24,4	3,1	47,0	3,4	1,0	8,0	18,5
2	Донецкий (марка Г)	11,0	28,5	3,5	47,2	3,3	0,6	5,5	18,88
3	Донецкий (марка Т)	6,0	25,4	2,4	61,1	2,9	1,0	1,2	23,40
4	Донецкий (марка А)	8,5	30,2	1,6	56,4	1,1	0,5	1,7	19,97
5	Кузнецкий	9,0	18,2	0,3	61,5	3,6	1,7	5,9	23,57
6	Карагандинский	10,0	38,7	0,8	41,8	2,7	0,6	5,4	16,24
7	Воркутинское	5,5	28,4	0,9	55,5	3,6	1,7	4,4	22,02
8	Челябинский	17,0	32,4	0,9	35,9	2,6	1,0	10,2	13,44
9	Березовское	33,0	4,7	0,2	44,2	3,1	0,4	14,4	16,20
10	Нерюнгринское	10,0	19,8	0,2	60,0	3,1	0,6	6,3	22,48

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТВОРНОСТИ ГАЗООБРАЗНОГО
ТОПЛИВА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА (УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ)**

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов, содержащую некоторое количество примесей. К горючим газам относятся углеводороды (CH_4 и др.) водород (H_2) и оксид углерода (CO). Негорючие компоненты – азот (N_2), диоксид углерода (CO_2) и кислород (O_2) – составляют балласт газообразного топлива. К примесям относят водяные пары, сероводород, пыль. Искусственные газы могут содержать аммиак, смолу и другие примеси.

Газы бывают **естественные** (природные) и **искусственные**. Искусственные газы получают путем переработки на заводах или как побочный продукт какого – либо производства, например, *коксовый газ*: получается при термической переработке кокса ($900 \div 1200$) °С; *сланцевый газ*: получается без подъема сланцев на поверхность при нагреве 1200 °С без доступа воздуха;

генераторные газы: получают путем нагрева твердого топлива в присутствии кислорода воздуха; *доменный газ*: получается как побочный продукт доменного производства (на 1 тонну чугуна получается 3000 м³ газа); *нефтяной газ*: разделяется при пиролизе нефти; *сжиженный газ*: смесь пропана и бутана.

Природные газы можно подразделить на три группы:

1. Газы, добываемые из чисто газовых месторождений (природный газ). Они в основном состоят из метана и являются тощими или сухими. Тяжелых углеводородов (от пропана и выше) сухие газы содержат менее 50 г/м³;

2. Газы, выделяемые из скважин нефтяных месторождений совместно с нефтью (попутный газ). Помимо метана они содержат значительное количество более тяжелых углеводородов (обычно свыше 150 г/м³) и являются жирными газами. Жирные газы представляют собой смесь сухого газа, пропан–бутановой фракции и газового бензина. В попутных газах нефтяных месторождений содержание метана ниже (до 45 %), однако возрастает доля тяжелых углеводородов (до 40 %);

3. Газы, добываемые из конденсатных месторождений, состоят из смеси сухого газа и паров конденсата, который выпадает при снижении давления (процесс обратной конденсации). Пары конденсата представляют собой смесь паров тяжелых углеводородов, содержащих C5 и выше (бензина, лигроина, керосина).

1. Характеристика компонентов природного газа

В состав природного газа в качестве горючих элементов входят: метан CH₄ – до 98,9 %, углеводороды метанового ряда (0,3 ÷ 10) % – этан C₂H₆, пропан C₃H₈, бутан C₄H₁₀ и другие, а также в виде следов сероводород H₂S. Балластом являются азот N₂, углекислый газ CO₂ и водяные пары.

Метан (CH₄) – это бесцветный газ без запаха, легче воздуха. Горюч, но всё же его можно хранить с достаточной лёгкостью.

Этан (C₂H₆) – бесцветный газ без запаха и цвета, чуть тяжелее воздуха. горюч, но не используется как топливо.

Пропан (C₃H₈) – бесцветный газ без запаха, ядовит. У него имеется полезное свойство: пропан сжижается при небольшом

давлении, что позволяет легко отделять его от примесей и транспортировать.

Бутан (C_4H_{10}) – по свойствам близок к пропану, но имеет более высокую плотность. Вдвое тяжелее воздуха.

Углекислый газ (CO_2) – бесцветный газ без запаха, но с кислым вкусом. В отличие от других компонентов природного газа, углекислый газ не горит. Углекислый газ – один из самых малотоксичных газов. Даже большие количества углекислого газа никак не влияют на здоровье человека. Однако он препятствует поглощению кислорода при содержании в атмосфере от 3 % до 10 % по объёму. При такой концентрации начинается удушье и даже смерть.

Сероводород (H_2S) – бесцветный тяжелый газ с запахом тухлых яиц. Очень ядовит, даже при очень маленькой концентрации вызывает паралич обонятельного нерва

2. Расчет теплоты сгорания

Теплотворная способность газа – количество теплоты, которое может быть получено при полном сгорании 1 м^3 газа при нормальных условиях.

Различают высшую и низшую теплотворность газообразного топлива.

Высшая теплотворная способность газа – количество теплоты, полученное при полном сгорании 1 м^3 газа, включающее в себя теплоту, выделяющуюся при конденсации водяных паров продуктов сгорания.

Низшая теплотворность газа – количество теплоты, полученное в процессе горения, без учета теплоты конденсации водяных паров – продуктов сгорания.

Практически при сжигании газа водяные пары не конденсируются, а удаляются с другими продуктами сгорания, поэтому расчет будем вести по низшей теплотворной способности газа.

Теплота сгорания (высшая или низшая) сухого газообразного топлива (газа) определяется по следующей формуле:

$$Q^c = \frac{(Q_1x_1 + Q_2x_2 + Q_kx_k)}{100},$$

где Q_c – теплота сгорания сухого газа, кДж/м^3 ; Q_1, Q_2, Q_k – теплота сгорания компонентов, составляющих газообразное топливо, кДж/м^3 ; x_1, x_2, x_n – объемные доли компонентов, составляющих газообразное топливо, %.

Плотность сухого газа определяют как сумму произведений плотностей компонентов, составляющих газообразное топливо, на их объемные доли:

$$p = \frac{(p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_kx_k)}{100},$$

где p – плотность сухого газа, кг/м^3 ; p_1, p_2, p_k – плотности компонентов, кг/м^3 .

Относительная плотность сухого газа по воздуху равна:

$$p_{отн}^c = \frac{p^c}{p_в},$$

где $p_в = 1,293$ – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 .

3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение теплоты сгорания газообразного топлива.
2. На какие группы можно подразделить газообразное топливо?
3. Как можно найти теплоту сгорания газообразного топлива?
4. Дайте характеристику компонентов природного газа.
5. На какие группы можно подразделить природный газ?
6. К какой группе газов можно отнести сланцевый газ?
7. Как определить плотность сухого газа?
8. Чему равна относительная плотность сухого воздуха?

4. Задачи для самостоятельного решения

Задание 1. Используя данные таблиц 4 – 6 определите теплоту сгорания и относительную плотность газов различных месторождений. Решение запишите в виде таблицы 7.

Таблица 4

Месторождения и состав природного газа

№	Месторождение газа	Состав газа, % по объему							
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	H ₂ S	N ₂ ⁺ редкие
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Медвежье	99,0	0,1	0,005	0	0	0,095	0	0,8
2	Оренбургское	85,0	4,9	1,6	0,75	0,55	0,6	1,3	5,0
3	Вуктылское	74,8	8,8	3,9	1,8	6,4	0	0	4,3
4	Шебелинское	93,3	4,0	0,6	0,4	0,3	0,1	0	1,3
5	Степановское	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0	0,5
6	Ленинградское	86,9	6,0	1,6	1,0	0,5	1,2	0	2,8
7	Северо-Ставропольское	98,7	0,33	0,12	0,04	0,01	ОД	0	0,7
8	Пунгинское	86,1	2,0	0,6	0,34	0,35	8,5	0	2,0
9	Угерское	98,3	0,45	0,25	0,3	0	0,1	0	0,6
10	Губкинское	98,4	0,13	0,01	0,005	0,01	0,15	0	13
11	Комсомольское	97,2	0,12	0,01	0	0,01	0,1	0	2,5
12	Юбилейное	98,4	0,07	0,01	0	0	0,4	0	1,1
13	Мессояхское	97,6	0,10	0,03	0,01	0,01	0,60	0	1,6
14	Соленинское	95,8	2,9	0,07	0,2	0,15	0,4	0	0,5
15	Березовское	94,8	1,2	0,3	0,1	0,06	0,5	0	3,0

Окончание табл.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	Майское	97,7	0,7	од	0,02	0	0,90	0	1,0
17	Газлинское	93,0	3,1	0,7	0,6	0	0,1	0	2,5
18	Ачакское	93,0	3,6	0,95	0,25	0,31	0,4	0	1,3
19	Тенгенское	89,4	6,0	2,0	0,7	0,4	1,0	0	0,5
20	Заполярье	98,5	0,2	0,05	0,012	0,001	0,5	0	0,7
21	Уренгойское	97,64	од	0,01	0	0	0,3	0	1,95
22	Жирновское	81,6	6,5	3,0	1,9	1,4	4,0	0,1	1,5
23	Ромашкинское	40,0	19,5	18,0	7,5	4,9	од	0	10,0
24	Туймазинское	39,5	20,0	18,5	7,7	4,2	0,1	0	10,0
25	Шкаповское	37,5	18,2	16,8	6,8	3,8	0,1	0	16,8
26	Ключевское	78,5	6,0	6,5	4,8	3,6	0,2	0	0,4
27	Дмитриевское	69,2	10,0	10,0	5,0	5,0	0,7	0	0,1
28	Небит-Дагское	91,0	3,0	2,3	1,3	1,8	0,5	0	0,1

Таблица 5

Теплота сгорания чистых горючих газов(при 0 °С, и 101,3 кПа)

Газ	Теплота сгорания, МДж/м ³	
	высшая	низшая
Метан CH ₄	39,86	35,84
Этан C ₂ H ₆	70,42	63,73
Пропан C ₃ H ₈	101,74	93,37
Бутан C ₄ H ₁₀	133,98	123,77
Изобутан C ₅ H ₁₂	131,89	121,84
Оксид углерода CO	12,64	12,64
Сероводород H ₂ S	25,46	23,49

Таблица 6

Физические характеристики газов (при 0 °С, и 101,3 кПа)

Состав газа	Плотность, кг/м ³	Относительная плотность по воздуху
Метан CH ₄	0,7168	0,5545
Этан C ₂ H ₆	1,3566	1,049
Пропан C ₃ H ₈	2,019	1,562
Бутан C ₄ H ₁₀	2,703	2,091
Изобутан C ₅ H ₁₂	2,668	2,064
Азот N ₂	1,2505	0,9673
Двуокись углерода CO ₂	1,9768	1,5291
Сероводород H ₂ S	1,5392	1,1906

Таблица 7

**Результаты расчета характеристик газообразного топлива
(при 0 °С, и 101,3 кПа)**

Низшая теплота сгорания, Q _{нз} ^p , кДж/м ³	Высшая теплота сгорания, Q _{вз} ^p , кДж/м ³	Плотность, ρ ^c , кг/м ³	Относительная плотность, ρ _{отн} ^c
1			
2			
.			
.			
28			

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4
ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА**

В теплотехнике в качестве температурных характеристик процесса полного горения топлива используются три разновидности температуры горения: калориметрическая температура горения $t_{\text{калор}}$, жаропроизводительность топлива $t_{\text{жар}}$, теоретическая температура горения $t_{\text{теор}}$.

1. Температура горения топлива

Калориметрической температурой горения называется та температура, которую приобрели бы образующиеся продукты горения при полном сгорании топлива и при условии, что тепло не уходит в окружающее пространство, т. е. остается в продуктах

горения. Если печь работает на низкокалорийном газе, который подогревается, то учитывается также физическое тепло, вносимое им. Подогрев газа и воздуха часто осуществляют и при достаточной температуре горения с целью экономии топлива и улучшения условий горения.

Калориметрическую температуру сгорания с минимальным (стехиометрическим) количеством окислителя и без подогрева компонентов горения называют *жаропроизводительностью*.

На величину калориметрической температуры влияют следующие факторы:

- 1) подогрев воздуха и топлива;
- 2) процентное содержание кислорода в воздухе;
- 3) коэффициент расхода воздуха на горения;
- 4) теплота сгорания топлива.

Подогрев воздуха и топлива ведет к увеличению калориметрической температуры сгорания, особенно для топлив с низкой теплотой сгорания. С увеличением коэффициента расхода воздуха выше теоретического ($\alpha > 1$) калориметрическая температура снижается, т.к. возрастает объем продуктов сгорания. Использование воздуха, обогащенного кислородом, ведет к увеличению калориметрической температуры горения вследствие уменьшения количества продуктов сгорания. В большинстве случаев увеличение теплоты сгорания топлива способствует повышению калориметрической температуры горения.

Калориметрическая температура горения может быть использована для характеристики топлива, если эта температура определяется при нормальных условиях, а именно:

- а) начальная температура топлива и воздуха составляет $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- б) полное горение происходит с теоретическим количеством сухого естественного воздуха;
- в) процесс диссоциации продуктов сгорания отсутствует;
- г) в камере горения поддерживается нормальное давление $0,1\text{ МПа}$ (760 мм.рт.ст.).

Рассчитанная в этих условиях температура называется *нормальной калориметрической температурой* или иначе жаропроизводительностью.

Калориметрическую температуру рассчитывают исходя из предположения, что реакции горения являются необратимыми и идут лишь в одну сторону до образования конечных продуктов окисления углекислого газа и воды. В действительности эти реакции являются обратимыми, и при температурах выше 1800 °С эндотермические реакции диссоциации CO_2 и H_2O начинают оказывать ощутимое влияние на снижение температуры горения. Температура, рассчитанная с учетом диссоциации CO_2 и H_2O , получила название *теоретической* и является ниже калориметрической.

При сжигании топлива в воздухе, обогащенном кислородом, калориметрическая и теоретическая температуры горения получаются выше и разница между ними достигает значительных величин. В этих случаях расчет теоретической температуры горения следует производить по более сложной методике. Однако нужно отметить, что наличие интенсивной теплопередачи при горении топлива резко снижает температуру продуктов сгорания и максимальные действительные температуры в металлургических печах редко превышают 1800 °С. Топливо сжигают в печах, с некоторым избытком воздуха, что уменьшает диссоциацию и сводит ее влияние к минимуму.

В процессе сжигания топлива в топках или печах выделяется тепло, часть которого излучается на поверхность нагреваемых предметов и стен камеры сжигания; часть тепла остается в продуктах сгорания, в результате чего они приобретают какую-то конечную температуру, с которой покидают топочную камеру. Величина этой температуры зависит от количества топлива, сжигаемого в данной топке в единицу времени, от теплоты сгорания топлива, а также и от подогрева воздуха и газа, т.е. от калориметрической температуры. Конечная температура продуктов сгорания зависит и от условий теплопередачи. Чем благоприятнее условия передачи тепла от газов к поверхности нагрева, тем ниже температура отходящих из топки газов. Таким образом, конечная температура продуктов сгорания топлива является результатом борьбы противоречивых факторов, т.е. зависит от условий сжигания топлива и от условий теплопередачи. *Действительная температура горения устанавливается на таком уровне, при котором имеет*

место равновесие между приходом тепла от сжигания топлива и расходом тепла по условиям теплопередачи, и обеспечивает передачу тепла в таком количестве, которое освобождается при снижении температуры продуктов сгорания от калориметрической до конечной. Сознательно воздействуя на приходную и расходную части тепла в процессе горения топлива, можно изменять в ту или другую сторону эту равновесную действительную температуру горения топлива. Поскольку процесс горения топлива физически неотделим от процесса теплопередачи, то действительная температура горения топлива всегда ниже калориметрической и теоретической. Формулировка понятия действительной температуры горения связана с некоторыми трудностями, т.к. газовая среда, заполняющая камеру сжигания топлива, не имеет одинаковой температуры по всему объему камеры. Следовательно, можно говорить лишь о какой-то средней температуре горения внутри факела или внутри топки. При рассмотрении понятия действительной температуры горения топлива имеют в виду теплопередачу газов при этой температуре, но процесс теплопередачи имеет место, как в процессе горения топлива, так и после него. Поэтому целесообразно говорить не о средней температуре горения, а о средней температуре излучателя в камере горения. Минимальной температурой излучателя будет конечная температура продуктов сгорания топлива в камере сжигания.

По практическим данным средняя температура газового излучателя в процессе горения топлива далека от калориметрической и более близка к конечной температуре газов. Без существенной погрешности пока можно принимать за среднюю температуру излучателя конечную температуру газов, покидающих камеру сжигания. Допускаемая при этом ошибка может быть компенсирована некоторым увеличением коэффициента излучения газов, который равен отношению конечной температуры газов к калориметрической температуре и называется пирометрическим коэффициентом:

$$h_{нур} = \frac{t_k}{t_{кал}}$$

Практические значения $h_{нур}$ изменяются от 0,6 до 0,8. Следовательно, действительная температура горения примерно равна $0,7 \times t_{кал}$ и определяется тепловым балансом печи (топки).

2. Расчет калориметрической температуры

Калориметрическая температура сгорания находится из теплового баланса, отнесенного к единице количества топлива (1 кг или 1 м³):

$$Q_H^p + J_B + J_T = V_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma} \text{ или}$$

$$Q_H^p + V_B \cdot C_B \cdot t_B + C_T \cdot t_T = [V_{RO_2} \cdot C_{CO_2} + V_{N_2}^o \cdot C_{N_2} + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + (\alpha - 1) V_B^o \cdot C_B] t_K$$

Правая часть уравнения представляет собой теплосодержание продуктов сгорания при температуре t_K :

$$t_K = \frac{Q_H^p + C_B \cdot V_B \cdot t_B + C_T \cdot t_T}{V_{RO_2} \cdot C_{CO_2} + V_{N_2} \cdot C_{N_2} + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + (\alpha - 1) \cdot V_B^o \cdot C_B}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где Q_H^p – низшая теплота сгорания топлива; α – коэффициент избытка воздуха; J_B – теплосодержание воздуха, подаваемого на горение: $J_B = V_B \cdot C_B \cdot t_B$; J_T – теплосодержание топлива, $J_T = C_T \cdot t_T$.

Поскольку теплоёмкость продуктов сгорания зависит от температуры, то для определения калориметрической температуры t_K ею сначала задаются, а затем, если есть необходимость – уточняют.

Жаропроизводительность топлива определяется из следующего выражения:

$$t_{ж} = \frac{Q_H^p}{V_{III} \cdot C_{\Gamma}} = \left(\frac{Q_H^p}{V_{III}} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_{\Gamma}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Пример 1. Состав газа $\text{CH}_4^c - 84,5\%$; $\text{C}_2\text{H}_6^c - 8,8\%$; $\text{C}_3\text{H}_8^c - 1,9\%$; $\text{C}_4\text{H}_{10}^c - 0,9\%$; $\text{C}_5\text{H}_{12}^c - 0,3\%$; $\text{CO}_2^c - 0,8\%$; $\text{N}_2^c - 7,8\%$. Влагосодержание $d_T = 10 \text{ г/м}^3$; температура подогрева воздуха $t_B = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$.

Решение. Пересчет сухого топлива на влажное проведем следующим образом:

$$W = \frac{d_T \cdot 100}{803,6 + d_T} = \frac{10 \cdot 100}{803,6 + 10} = 1,2291;$$

$$K = \frac{100 - W}{100} = \frac{100 - 1,2291}{100} = 0,9877;$$

$$\text{CH}_4^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{CH}_4^c = 0,9877 \cdot 84,5 = 83,46\%;$$

$$\text{C}_2\text{H}_6^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{C}_2\text{H}_6^c = 0,9877 \cdot 3,8 = 3,75\%;$$

$$\text{C}_3\text{H}_8^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{C}_3\text{H}_8^c = 0,9877 \cdot 1,9 = 1,88\%;$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10}^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{C}_4\text{H}_{10}^c = 0,9877 \cdot 0,9 = 0,89\%;$$

$$\text{C}_5\text{H}_{12}^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}^c = 0,9877 \cdot 0,3 = 0,296\%;$$

$$\text{CO}_2^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{CO}_2^c = 0,9877 \cdot 0,8 = 0,79\%;$$

$$\text{N}_2^{\text{БЛ}} = K \cdot \text{N}_2^c = 0,9877 \cdot 7,8 = 7,704\%.$$

Теоретически необходимое количество воздуха находим следующим образом:

$$V_B^0 = 0,0476 \cdot \left[0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right] =$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,0476 \cdot \left[2 \cdot 83,5 + \left(2 + \frac{6}{4}\right) \cdot 3,75 + \left(3 + \frac{8}{4}\right) \cdot 1,98 + \left(4 + \frac{10}{4}\right) \cdot 0,89 + \right. \\
 &\quad \left. + \left(5 + \frac{12}{4}\right) \cdot 0,3 \right] = 0,0476 \cdot (167 + 13,125 + 9,4 + 5,78 + 2,4) = \\
 &\quad = 0,0476 \cdot 197,71 = 9,41 \text{ м}^3/\text{м}^3.
 \end{aligned}$$

Действительное количество воздуха находим следующим образом:

$$V_B = \alpha \cdot V_B^o = 1,1 \cdot 9,41 = 10,35 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретическое количество азота находится следующим образом:

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_B^o + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 9,41 + 0,078 = 7,51 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество трехатомных газов находится следующим образом:

$$\begin{aligned}
 V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \Sigma m C_m H_n) &= 0,01 \cdot (0,79 + 83,5 + \\
 &+ 2 \cdot 3,75 + 3 \cdot 1,88 + 4 \cdot 0,89 + 5 \cdot 0,3) = 1,025 \text{ м}^3/\text{м}^3.
 \end{aligned}$$

Теоретическое количество водяных паров находится следующим образом:

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O}^o &= 0,01 \left[H_2S + H_2 + \Sigma \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124 \cdot d_T + 0,0161 \cdot V_o \right] = 0,01 \\
 &\cdot (2 \cdot 83,5 + 0,124 \cdot 10 + 3 \cdot 3,75 + 4 \cdot 1,88 + 5 \cdot 0,89 + 6 \cdot 0,3 + 0,15) = 0,01 \\
 &\cdot (167 + 1,24 + 11,28 + 7,52 + 4,5 + 1,8 + 0,15) = 1,935 \text{ м}^3/\text{м}^3.
 \end{aligned}$$

Действительное количество водяных паров находится следующим образом:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} + 0,0162 (\alpha - 1) V_{\text{B}}^{\circ} = 1,935 + 0,0161 \cdot (1,1-1) \cdot 9,41 = 1,95 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Избыточное количество O_2 находится следующим образом:

$$V_{\text{O}_2} = (\alpha-1) \cdot V_{\text{B}}^{\circ} \cdot 0,21 = (1,1-1) \cdot 9,41 \cdot 0,21 = 0,198 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объём продуктов горения находится следующим образом:

$$V_{\text{III}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^{\circ} + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1) V_{\text{B}}^{\circ} = 1,025 + 7,51 + 1,95 + 0,1 \cdot 9,41 = 11,42 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Действительное количество азота находится следующим образом:

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^{\circ} + (\alpha - 1) V_{\text{B}}^{\circ} \cdot 0,79 = 7,51 + 0,1 \cdot 9,41 \cdot 0,79 = 8,25 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Процентное содержание компонентов смеси:

$$\Gamma_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{III}}} \cdot 100\% = \frac{1,025}{11,42} \cdot 100\% = 8,94\%$$

$$\Gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{III}}} \cdot 100\% = \frac{1,95}{11,42} \cdot 100\% = 17,07\%$$

$$\Gamma_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{III}}} \cdot 100\% = \frac{8,25}{11,42} \cdot 100\% = 72,27\%$$

$$\Gamma_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{III}}} \cdot 100\% = \frac{0,198}{11,42} \cdot 100\% = 1,72\%$$

Итого: 100 %

Плотность продуктов горения находится следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{пр}} &= \frac{44\text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + 28\text{N}_2 + 32\text{O}_2}{22,4 \cdot 100} = \\ &= \frac{44 \cdot 8,94 + 18 \cdot 17,07 + 28 \cdot 72,24 + 32 \cdot 1,72}{2240} = \\ &= \frac{293,36 + 307,3 + 2022,72 + 55,04}{2240} = \frac{27,78}{2240} = 1,2403 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Теплота сгорания топлива находится следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_H^p &= 127,7 \cdot \text{CO} + 108 \cdot \text{H}_2 + 358 \cdot \text{CH}_4 + 590 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 555 \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + \\ &+ 636 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1185 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1465 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 234 \cdot \text{H}_2\text{S} = \\ &= 358 \cdot 83,5 + 636 \cdot 3,75 + 913 \cdot 1,88 + 1185 \cdot 0,89 + 1465 \cdot 0,3 = 29893 + \\ &+ 2385 + 1716 + 1055 + 440 = 35489 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Калориметрическая температура горения находится следующим образом:

$$\begin{aligned} C_B &= 1,3302 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)} \text{ при } 400 \text{ }^\circ\text{C} \\ C_{\text{CO}_2} &= 2,4971 \\ C_{\text{H}_2\text{O}} &= 1,9984 \\ C_{\text{N}_2} &= 1,5031 \\ C_{\text{O}_2} &= 1,5923 \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} C_B \\ C_{\text{CO}_2} \\ C_{\text{H}_2\text{O}} \\ C_{\text{N}_2} \\ C_{\text{O}_2} \end{aligned}} \right\} \text{ при } 2300 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_K = \frac{Q_H^p + V_B \cdot C_B \cdot t_B}{V_{\text{пр}} \cdot C_{\text{пр}}} =$$

$$= \frac{Q_H^p + V_B \cdot C_B \cdot t_B}{V_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{O}_2}} =$$

$$= \frac{35489 + 400 \cdot 10,35 \cdot 1,3302}{1,025 \cdot 2,4971 + 1,95 \cdot 1,9984 + 1,5031 \cdot 8,25 + 1,5923 \cdot 0,198} = \frac{40996}{19,17} = 2138 .$$

Действительная температура горения находится следующим образом:

$$t = \eta \cdot t_K = 0,7 \cdot 2138 = 1497 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где η – пирометрический коэффициент для камерных топок (η принимается равным от 0,65 до 0,7).

3. Контрольные вопросы

1. Какие температуры используются в теплотехнике в качестве температурных характеристик?
2. Какая температура называется калориметрической?
3. Что называется жаропроизводительностью?
4. От чего зависит калориметрическая температура?
5. Что происходит с калориметрической температурой при увеличении коэффициента расхода воздуха?
6. Какую температуру называют нормальной калориметрической температурой?

4. Задачи для самостоятельного решения

Задание 1. Используя данные таблиц 8 – 9 дайте характеристику газов различных месторождений.

Таблица 8

Состав газов различных месторождений

№	Месторождение	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S
1	Промысловское	97,32	0,3	0,08	-	-	0,4	1,9	-
2	Верховское	98,5	0,6	0,1	-	-	0,1	0,7	-
3	Коробковское	94,6	1,1	0,55	0,24	0,41	0,7	2,4	-
4	Дашава – Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	-	0,2	0,4	-
5	Брянск – Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	0,1	1,6	-
6	Гоголево -Полтава	85,8	0,2	0,1	0,1	-	0,1	13,7	-
7	Шебелинка-Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	-	1,2	-
8	Газли – Коган	95,4	2,6	0,3	0,2	0,	0,2	1,1	-

Окончание табл.8

9	Карабулак – Грозный	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	0,2	1,1	-
10	Кумертау-Магнитогорск	68,5	14,5	7,6	3,5	1,0	1,4	3,5	-
11	Ярино – Пермь	81,7	5,3	2,9	0,9	0,3	0,1	8,8	-
12	Кулешовка-Куйбышев	38,0	25,1	12,5	3,3	1,3	1,1	18,7	-

Таблица 9

Данные для расчетов

Температура подогрева воздуха $t_B, ^\circ\text{C}$	Влагосодержание топлива $d_T, \text{г/м}^2$	Коэффициент избытка воздуха α
100	10	1,1
110	11	1,2
120	12	1,3
130	13	1,4
140	14	1,5
150	15	1,1
160	16	1,2
170	17	1,3
180	18	1,4
190	19	1,5
200	20	1,1
210	10	1,2
220	11	1,3
230	12	1,4
240	13	1,5
250	14	1,1
260	15	1,2
270	16	1,3
280	17	1,4
290	18	1,5
300	19	1,1
320	20	1,2
340	10	1,3
360	11	1,4
380	12	1,5
400	13	1,1
420	14	1,2
440	15	1,3

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5 ТЕПЛОВОЙ И МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНСЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО, ГАЗООБРАЗНОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

1. Твердое топливо

Древесное топливо. К нему относят дрова, отходы деревообрабатывающих производств: опилки, стружка, щепа и др.; отходы сельского хозяйства: солома, подсолнечная лузга, льняная костра и многие другие. Древесное топливо считают топливом местного значения. Элементарный состав древесины в среднем отвечает химической формуле клетчатки $(C_6H_{10}O_5)_x$, т.е. состоит из 51 % – С, 6 % – Н, 0,7 % – N и 42,3 % – О. Древесина является веществом, из которого образовались другие виды естественного твердого топлива при ее разложении в недрах земли без доступа воздуха в условиях высокой влажности. Разлагаясь, древесина постепенно беднела кислородом и обогащалась углеродом.

Дрова благодаря наименьшей степени разложения содержат до 85 % летучих веществ. Будучи в сухом виде, они легко загораются и горят длинным пламенем, поэтому древесину используют при розжиге печей и топок, работающих на других трудноразгорающихся топливах, например антрацитах. В составе древесины нет серы; зольность ее невелика, всего $(1,5\div 2)$ %. Влажность дров большая; в свежесрубленном дереве она достигает $(50\div 60)$ %, а в воздушно-сухом состоянии – $(20\div 25)$ %. Высокая влажность и небольшое содержание углерода в древесине обуславливают невысокую теплоту ее сгорания. Для воздушно-сухой древесины удельная теплота сгорания составляет 12,6 МДж/кг. Дрова как топливо уже многие годы не имеют широкого промышленного и бытового применения за исключением районов, богатых лесом при отсутствии в них более рациональных видов топлив.

В настоящее время древесину используют как сырье для бумажной, текстильной, пищевой и многих других отраслей промышленности. Отходы деревообрабатывающих производств –

древесные опилки – добавляют в сырьевую смесь при производстве глиняного строительного кирпича.

Торф встречается в виде залежей во многих районах средней и северной полосы нашей страны. Торф относится к местным видам топлива. Он является продуктом разложения растительности во влажных условиях без доступа воздуха. По своему составу и многим техническим свойствам торф мало отличается от древесины: так в его горючей массе содержится немного больше углерода и меньше кислорода, что объясняется большей степенью его разложения – обуглероживания. Торф также почти не содержит серы, имеет высокую влажность и небольшую теплоту сгорания. Низшая рабочая удельная теплота сгорания фрезерного торфа с влажностью (45÷55) % составляет 8,5 МДж/кг. Зольность торфа ввиду засорения массы механическими примесями болотных вод выше зольности дров и составляет (5÷15) %. Содержание летучих веществ в торфе меньше, чем в древесине вследствие большей степени разложения растительного вещества.

Торф в сухом состоянии быстро загорается и горит длинным пламенем. В зависимости от способов добычи торф получают в виде кусков при машинно – формовочном и гидравлическом способах или в виде крошки при фрезерном. Более экономичным и распространенным способом является фрезерный способ добычи торфа. При хранении на складах торф, особенно фрезерный, подвержен самовозгоранию.

В настоящее время широкое распространение получили торфяные брикеты, имеющие небольшую влажность (около 20 %) и более высокую удельную теплоту сгорания. Кроме того, они не самовозгораются. Следующей за торфом стадией разложения растительного вещества является образование ископаемых углей. Так как процесс обуглероживания растительного вещества протекает не скачкообразно, а постепенно, то ископаемые угли характеризуются разной степенью разложения и в зависимости от этого бывают бурые угли, каменные угли и антрациты.

Бурые угли относят к самым молодым углям. Их цвет меняется от бурого до черного, они лишены блеска, имеют пористую структуру, небольшую механическую прочность. При длительном лежании на воздухе выветриваются и рассыпаются на

мелкие куски; при хранении в штабелях на складах подвержены самоокислению, в результате чего может произойти их самовозгорание. Бурые угли содержат (40÷50) % летучих горючих веществ, горят длинным пламенем. Ввиду пористой структуры имеют большую влажность и зольность, обуславливающие их высокий балласт, достигающий 50 % и выше.

Марки бурых углей обозначают буквой Б и в зависимости от влажности бурые угли делят на группы: Б1 – с влажностью свыше 40 %, Б2 – с влажностью от 30 % до 40 % и Б3 – с влажностью менее 30 %. Бурые угли некоторых месторождений имеют повышенное содержание серы, достигающее 8 %. В зависимости от содержания балласта удельная теплота сгорания бурых углей колеблется от 9,0 МДж/кг до 18,5 МДж/кг.

Бурые угли относятся к местным видам топлива, так как содержат много балласта, не выдерживают дальних перевозок и длительного хранения. На базе месторождений бурых углей организуют топливно-энергетические комплексы, мощные электростанции, например Канско-Ачинский комплекс.

Каменные угли – угли с выходом летучих веществ более 9 %, с большей низшей теплотой сгорания рабочего топлива (23,0÷28,0) МДж/кг. Большинство каменных углей относится к спекающимся углям. Содержание балласта в каменных углях относительно невелико – до 20 %. Каменные угли бывают следующих марок в зависимости от выхода летучих веществ (%) на горючую массу, спекаемости и характера нелетучего остатка: длиннопламенный (Д) – 37; газовый (Г) – 37; газовый жирный (ГЖ) – (31÷37); жирный (Ж) – 33; коксовый жирный (КЖ). – (25÷31); отощенный спекающийся (ОС) – 17; тощий (Т) – (25÷37); слабоспекающийся (С) – (17÷36).

Наиболее молодыми каменными углями являются угли с большим выходом летучих – более 33 %. Это длиннопламенные, газовые угли. По внешнему виду каменные угли в отличие от бурых имеют черный цвет, иногда с блеском, плотное строение и большую прочность. Россия располагает большими запасами каменных углей – это Печорский, Кузнецкий, Иркутский, Минусинский и другие каменноугольные бассейны.

К **антрацитам** относят ископаемые угли с выходом летучих веществ до 9 %. Различают полуантрациты (ПА), переходные от тощих каменных углей к антрацитам, и антрациты (А). Низшая теплота сгорания рабочего топлива составляет (21÷27) МДж/кг. Для них характерны металлический блеск, слоистая структура, большая твердость. Загораются антрациты трудно, горят почти без пламени, тлея в кусках; относятся к высокосортному топливу, так как имеют небольшой балласт, высокую теплоту сгорания, устойчивы на воздухе, поэтому легко выдерживают дальние перевозки и длительное хранение на складах. Основные залежи антрацитов имеются в Донбассе. При добыче каменных углей, особенно антрацитов, образуются куски разных размеров, определяющие сортность.

Горючие сланцы образовались в виде слоистых отложений на дне бывших водоемов в течение длительного времени. Они являются продуктом пропитывания мергелистых известняковых и других горных пород разложившимися простейшими микроорганизмами, обитающими в водоемах. Для горючих сланцев характерны высокая зольность, достигающая 65 % на сухую массу, повышенная сернистость и высокое содержание летучих веществ – до 90 % на горючую массу. Низшая удельная теплота сгорания рабочей массы их невысока, всего (6,0÷10,0) МДж/кг. Горючие сланцы горят длинным коптящим пламенем. Их удобнее сжигать в пылевидном состоянии. Из-за низких тепловых качеств горючие сланцы в большом количестве идут на переработку для получения из них более ценного газообразного (сланцевого газа) и жидкого топлива, а также газообразных химических продуктов. Сланцевую золу используют в промышленности вяжущих материалов как активную минеральную добавку и в сельском хозяйстве для удобрения при кислых почвах ввиду большого содержания в ней извести.

2. Жидкое топливо

Естественное жидкое топливо – нефть, состоящая из смеси различных углеводородов, идет главным образом на переработку – фракционную перегонку. Из нефти получают топливо для тепловых двигателей и много ценных химических продуктов. Топливный

мазут, являющийся остатком после отгонки из нефти бензина и керосина, бывает различных марок в зависимости от вязкости.

Наиболее массовыми товарными продуктами, выпускаемыми нефтеперерабатывающими предприятиями нашей страны, являются топочные мазуты марок 20, 40, 60, 80, 100, 200.

Жидкое топливо практически почти не содержит балласта, загорается легко и горит длинным пламенем, так как состоит из одних летучих горючих веществ. Нефть благодаря малой вязкости легко транспортировать по нефтепроводам. При перевозке мазута с высокой температурой застывания в цистернах требуется его разогрев перед перекачкой в хранилище, а также перед подачей к форсункам. С этой целью в мазут, находящийся в цистернах, опускают змеевики с паровым обогревом. Состав жидкого топлива исчисляют так же, как и твердого, в % по массе и характеризуют теми же составными частями.

Для мазута характерен следующий состав, % по массе: $W^p=4$; $A^p=0,7$; $C^p=84$; $H^p=10,2$; $N^p=0,4$; $O^p=0,4$. Теплотворность мазута $Q^p_H=39\ 700$ кДж/кг.

3. Газообразное топливо

Естественное газообразное топливо – это прежде всего природный горючий газ, который находит все большее применение в народном хозяйстве. Его легко транспортировать на далекие расстояния по газопроводам.

Природный газ характеризуют высокие топливные качества: отсутствие балласта, легкая воспламеняемость, высокая теплота сгорания. Природный газ добывают из недр земли. Кроме чисто газовых скважин некоторые выходы газа на поверхность сопутствуют залежам нефти – это так называемые попутные газы. Состав природного горючего газа характеризуется высоким содержанием метана CH_4 , достигающим в некоторых месторождениях (98÷99) %. Кроме метана природный газ содержит этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и в небольших количествах диоксид углерода CO_2 и азот N_2 .

Таким образом, наиболее калорийными газовыми компонентами являются пропан и бутан. Однако в природном газе их доля незначительна: чаще всего менее 1 % и максимально –

(3÷5) %. Искусственные пропанобутановые смеси в некоторых отраслях техники используются в качестве технического топлива. В тепловых установках строительной индустрии они не применяются.

Для природного газа характерен состав, % по объему: $\text{CO}_2 - 0,4$; $\text{CH}_4 - 95,1$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 1,1$; $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,3$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,03$; $\text{C}_5\text{H}_{12} - 0,02$; $\text{N}_2 - 3,5$; $Q^c_{\text{H}} = 35250$ кДж/м³.

4. Пылевидное топливо

Пылевидное топливо вырабатывают из твердого кускового топлива в целях повышения теплового эффекта и автоматизации процесса сжигания. Во многих случаях это является экономически целесообразным. На крупных предприятиях, расходующих большое количество топлива, – электростанциях или цементных заводах – этот способ сжигания находит большое применение. Любое твердое топливо, за исключением древесного, можно перерабатывать в пылевидное.

Процесс приготовления его состоит в дроблении кусков топлива, сушке и помоле в мельницах. Экономичной схемой является совместная сушка и помол дробленого топлива в сепараторных мельницах разных конструкций с пневматической разгрузкой, вентилируемых горячими газами. При этом сушка размолотого топлива начинается в мельнице и заканчивается в потоке газов в трубе-сушилке. Применяются молотковые мельницы шахтного типа, аэробильные и шаровые. Пылевидное топливо должно иметь определенную тонкость помола и влажность. Предельная тонкость помола зависит от содержания в топливе летучих веществ и устанавливается просевом его через набор стандартных сит. Чем меньше летучих веществ, тем труднее сгорает топливо и тем тоньше должен быть его помол, и наоборот, для топлив с большим содержанием летучих веществ, например бурого угля, допускается более грубый помол. Чрезмерно высокая влажность топлива приводит к налипанию его на молотки и шары мельниц, слеживанию пыли в бункерах; она также понижает теплоту сгорания топлива. Однако пониженная влажность топливной пыли делает ее более взрывоопасной, так как способствует разложению топлива с выделением газов, образующих в определенной концентрации с воздухом гремучую смесь. Для каждого вида

топлива установлена предельная влажность топливной пыли с учетом его индивидуальных качеств.

5. Расчет горения топлива

Промышленные виды топлива горят в результате химических реакций окисления их горючей части кислородом воздуха. Поэтому первой задачей расчета горения является определение расхода воздуха на горение топлива. Затем определяют количество и состав продуктов горения – дымовых газов, образующихся в результате горения топлива, и, наконец, находят температуру дымовых газов.

Первый этап этих расчетов – определение расхода кислорода. Расход кислорода рассчитывают исходя из стехиометрических соотношений реакций окисления отдельных компонентов горючей части топлива, их атомных и молекулярных масс. Для твердого и жидкого топлив эти расчеты ведут по соотношениям массы веществ, участвующих в реакциях, а для газообразного топлива – по объемным соотношениям. Расход воздуха определяют, учитывая в нем наличие азота и водяных паров. Расход кислорода и, следовательно, расход воздуха, соответствующий точным стехиометрическим соотношениям реакций горения, является теоретически необходимым расходом воздуха. В действительности же при сжигании топлива подают в топку всегда несколько больше воздуха в сравнении с теоретическим, так как часть кислорода не успевает прореагировать с горючими частями топлива из-за несовершенства процесса смешения топлива с воздухом.

Отношение действительного расхода воздуха G_d к теоретическому G_m называют коэффициентом избытка воздуха и обозначают буквой α :

$$\alpha = G_d / G_m .$$

Значение α зависит от вида топлива и степени совершенства топочного устройства. Наибольшая полнота смешения с воздухом достигается у газового топлива. Поэтому его можно сжечь с минимальным избытком воздуха: $\alpha = 1,05 \dots 1,1$. Мазут при сжигании

распыляют специальными форсунками, что обеспечивает образование развитой поверхности взаимодействия диспергированных капель мазута с воздухом. Однако даже в тонкодиспергированном мазуте не удается достичь идеального (молекулярного) смешения его капель с воздухом. Поэтому для сжигания мазута требуется повышенный избыток воздуха: $\alpha = (1,1 \div 1,2)$. Несколько больший избыток воздуха необходим при сжигании пылевидного топлива – $\alpha = (1,2 \div 1,25)$. Наименее развитая поверхность взаимодействия с воздухом образуется при сжигании твердого кускового топлива. Поэтому здесь избытки воздуха значительны: $\alpha = (1,4 \div 1,8)$. Значения α для твердых топлив в зависимости от типа топочного устройства приведены в справочных руководствах по сжиганию топлива.

Далее при расчете горения топлива определяют количество и состав дымовых газов, образующихся в результате этого процесса. Они также получаются из стехиометрических соотношений реакций взаимодействия горючих составных частей топлива с кислородом воздуха с учетом закона равенства массы реагирующих веществ и продуктов реакции. В составе и количестве дымовых газов, естественно, учитывается (к продуктам реакции плюсятся) избыточный кислород, весь азот и влага, вовлеченная с воздухом. Числовые примеры расчета расхода воздуха, состава и количества продуктов горения по стехиометрическим соотношениям реакций приведены в настоящем пособии.

Существуют аналитические формулы для расчета горения топлива. Однако пользование ими не раскрывает возможных ошибок расчета, в связи с чем расчет по стехиометрическим соотношениям, по крайней мере для учебных целей, предпочтительнее. Существуют также многочисленные эмпирические формулы для определения расхода воздуха и количества дымовых газов. Все они основаны на установленной тесной корреляционной связи между теплотворностью топлива, расходом воздуха и количеством продуктов горения. Погрешность расчета при пользовании ими составляет $(2 \div 3) \%$. Ими удобно пользоваться в тех случаях, когда не требуется определять состав продуктов горения. Примеры таких формул приведены в таблицах 10 и 11.

Таблица 10

Эмпирические формулы для определения расхода воздуха и количества дымовых газов

Топливо	Расход воздуха	Количество газообразных продуктов горения дымовых газов
Твердое и жидкое	$V_B = 1,015\alpha K_1 \frac{Q_H^P + 6W^P}{1000}$	$V_\delta = [K_2 + (\alpha - 1)K_2] \frac{Q_H^P + 6W^P}{1000} + 1,24 \frac{W^P}{100}$
Газообразное	$V_B = 1,015\alpha K_1 \frac{Q_i^P}{1000}$	$V_\delta = [K_2 + (\alpha - 1)K_1] \frac{Q_i^P}{1000} + \frac{Б + 0,12d}{100}$

Здесь α – коэффициент избытка воздуха; Б – содержание в топливе $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$, %; d – влажность газообразного топлива, г/м³; K_1, K_2 – эмпирические коэффициенты (таблица 11).

Таблица 11

Значение эмпирических коэффициентов K_1 и K_2

Коэффициент	Дрова	Торф	Уголь	Антрацит	Жидкое топливо	Природный газ
K_1	1,05	1,05	1,09	1,1	1,1	1,1
K_2	1,21	1,19	1,16	1,14	1,19	1,24

Третьим этапом расчета горения является определение температуры горения топлива и требуемого избытка воздуха. Различают теоретическую (калориметрическую) и практическую температуры горения топлива. Максимальная калориметрическая температура развивается при сжигании топлива с $\alpha = 1$. Эту характеристику Д.И. Менделеев называл жаропроизводительностью топлива.

Теоретическая – это та температура, которую приобрели бы дымовые газы, если бы все тепло от полного сгорания топлива воспринималось бы только дымовыми газами. В действительности теоретическая температура при сжигании топлива в топках и печах никогда не достигается. Это происходит потому, что сжигание

топлива в промышленных условиях сопровождается определенными потерями: часть твердого топлива вообще не успевает сгорать и удаляется из топок и печей вместе с золой и шлаком. Такие потери называют механическим недожогом.

В большинстве случаев топливо не сгорает до полной степени окисления его горючих составных частей – в дымовых газах наряду с CO_2 и H_2O появляются продукты неполного сгорания CO и H_2 с соответствующим понижением тепловых эффектов процесса горения. Вследствие этого появляются потери тепла от химического недожога топлива. Затем часть тепла теряется через ограждающие конструкции топочного устройства. Кроме потерь тепла, часть его передается нагреваемому материалу непосредственно так называемой прямой отдачей, т.е. излучением, минуя нагрев дымовых газов, температура которых и по этой причине не может быть равной теоретической. Поэтому практическая (действительная) температура горения t_n всегда ниже калориметрической t_k (теоретической). Факторы, которые обуславливают снижение теоретической температуры горения топлива при его сжигании в котельных и промышленных тепловых установках, учитывают калориметрическим коэффициентом η_k (в некоторых источниках называют пирометрическим коэффициентом горения η_n).

$$t_n = \frac{t_k}{\eta_k}.$$

Для топок паровых котлов в зависимости от степени экранирования поверхности нагрева котла η_k колеблется в пределах (0,15÷0,5).

Таблица 12

Значение η_k для различных устройств

Устройство	η_k
Вращающиеся печи	0,68÷0,80
Шахтные печи	0,55÷0,65
Туннельные печи	0,77÷0,82
Кольцевые печи	0,58÷0,60
Периодические печи	0,65÷0,70

Калориметрическую температуру горения топлива с приемлемой для инженерных расчетов точностью определяют из уравнения теплового баланса горения 1кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_n^p + V_в C_в t_в \alpha + C_m t_m = V_д \alpha_k C_д,$$

где Q_n^p – низшая теплотворность топлива, кДж/кг (справочная величина); $V_в$ – теоретический расход воздуха на горение 1 кг (при газообразном топливе – на 1 м³) топлива, м³/кг (принимается по результатам предыдущих расчетов); $C_в$ – теплоемкость воздуха, $C_в=1,3$ кДж/м³°C; $t_в$ – температура воздуха, поступающего на горение топлива, °C; t_m – температура топлива, поступающего на горение (при твердом топливе этой величиной можно пренебречь); C_m – теплоемкость топлива (справочная величина для мазута $C_m=2,51$ кДж/(кг°С); $V_д$ – теоретическое количество продуктов горения от сжигания 1 кг (при газовом топливе – 1 нм³) топлива (принимается по результатам предыдущих расчетов), нм³/кг; $C^д$ – теплоемкость дымовых газов. Для проектных расчетов допустимо пользоваться приближенными формулами расчета теплоемкости дымовых газов.

$$C_д = 0,25 + 0,000014t_д,$$

$$C_д = 0,323 + 0,000018t_д.$$

Пример 1. Рассчитайте процесс горения природного газа Тюменского месторождения. Объемный состав газа (по справочным данным), (%): CH₄ – 95,5; C₂H₆ – 0,8; C₃H₈ – 0,4; C₄H₁₀ – 0,08; C₅H₁₂ – 0,00; CO₂ – 0,22; N₂ – 3,0. Всего 100 %. Влагосодержание воздуха, согласно климатологическим таблицам и I-d-диаграмме, составляет d=10 г на 1 кг сухого воздуха. Природный газ сжигается во вращающейся керамзитобжигательной печи. Требуемая температура обжига $t_{II}=1150$ °C.

Решение. Порядок расчета и его результаты располагают в виде таблицы 13. Расчет ведут по стехиометрическим соотношениям

химических уравнений реакций горения (графа 3, строки 1÷7). Во избежание большого количества дробных цифр расчет ведут на 100 м^3 топлива. В этом случае количество отдельных его составных частей в 100 м^3 газа будет численно равно процентным соотношениям его состава (графа 2, строки 1÷7). Азот и диоксид углерода являются неорганическими компонентами топлива. Поэтому они без изменения количества переходят в состав дымовых газов, что условно обозначено стрелками в графе 3 (строки 6 и 7).

Отношение 79:21 (строка 9) соответствует объемному содержанию азота и кислорода в атмосферном воздухе, выраженному в %. Множитель 0,001 (строка 10) соответствует переводу граммов влагосодержания в килограммы. По справочным данным плотность воздуха 1,293; плотность водяного пара 0,805, выраженные в кг/м^3 .

Итог, подсчитанный в строке 11, табл. 13, определяет количество продуктов горения (графа 10) и расход воздуха (графа 11) при теоретическом количестве воздуха, без его избытка ($\alpha=1$), когда весь кислород участвует в реакциях процесса горения. Практически при сжигании природного газа часто приходится повышать избыток воздуха для понижения температуры горения, которая при сжигании газа в промышленной печи регламентируется технологическими условиями, а при сжигании его в топке сушильной установки или парового котла лимитируется температуростойкостью ее футеровки.

Требуется найти коэффициент избытка воздуха, необходимого для обеспечения температуры горения $1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 13

Расчет горения природного газа Тюменского месторождения

№	Ход расчета		Расход кислорода в м ³ на 100 м ³ газа	Состав и количество продуктов горения, м ³						Расход воздуха, м ³
	Состав, %	Реакция горения		CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	Всего		
1	CН ₄ – 95,5	CН ₄ +2O ₂ =CO ₂ +2H ₂ O	191	95,5	191	-	-	286,5	-	
2	C ₂ H ₆ – 0,8	C ₂ H ₆ +3,5O ₂ =2CO ₂ +3H ₂ O	2,8	1,6	2,4	-	-	4	-	
3	C ₃ H ₈ – 0,4	C ₃ H ₈ +5O ₂ =3CO ₂ +4H ₂ O	2,0	1,2	1,6	-	-	2,8	-	
4	C ₄ H ₁₀ – 0,08	C ₄ H ₁₀ +6,5O ₂ =4CO ₂ +5H ₂ O	0,52	0,32	0,4	-	-	0,72	-	
5	C ₃ H ₁₂ – 0,00	C ₃ H ₁₂ +8O ₂ =5CO ₂ +6H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	
6	CO ₂ – 0,22	CO ₂ топливо = CO ₂ продукты	-	0,22	-	-	-	0,22	-	
7	N ₂ – 3,0	N ₂ топливо = N ₂ продукты	-	-	-	-	3,0	3,0	-	
8	100	Итого	196,32	98,84	195,4	-	3,0	297,24	-	
9	Вовлекается N ₂ с воздухом (при α=1)		-	-	-	-	738,5	738,5	-	
10	Вовлекается H ₂ O с воздухом (при α=1)		-	-	15,01	-	-	15,01	-	
11	Итого при α=1		-	98,84	210,41	-	741,5	1050,75	949,83	
12	При α=1,6 избыточное количество кислорода					117,79		117,79	-	
13	Вовлекается N ₂ с воздухом (при α=1,6)						1181,6	1181,6	-	
14	Вовлекается H ₂ O с воздухом (при α=1,6)				240,16			240,16	-	
15	Итого при α=1,6		196,32	98,84	219,416	117,79	1184,6	1620,7	1519,8	

Необходимый коэффициент избытка воздуха определяют из уравнения теплового баланса процесса горения 1м³ газа по формуле:

$$Q_n^p + V_e C_e t_e \alpha + C_m t_m = V_o \alpha t_k C_o,$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания рабочего топлива газа (для газа Тюменского месторождения $Q_n^p = 36400$ кДж/м³); V_e – теоретический расход воздуха, м³ (в нашем случае $V_e = 9,498$ м³/м³ (графа 11, строка 11)); C_e – объемная теплоемкость воздуха (по справочным данным $C_e = 1,3$ кДж/м³°С; t_e и t_m – температура соответственно воздуха и природного газа, поступающего на горение t_e и t_m , принимаем равными 10 °С; C_m – объемная теплоемкость газового топлива колеблется в пределах (1,55÷1,72) кДж/м³°С, принимаем $C_m = 1,7$ кДж/м³°С; V_o – теоретическое количество продуктов горения от сжигания 1м³ газового топлива (в нашем случае $V_o = 10,5$ м³/м³ (графа 10, строка 11); t_k – калориметрическая температура горения, °С;

$$t_n = \frac{t_k}{\eta_k},$$

где t_n – требуемая практическая температура горения, назначаемая по условиям технологии (задана $t_n = 1150$ °С); η_k – калориметрический коэффициент процесса горения (коэффициент прямой отдачи). Для вращающихся печей по опытным данным $\eta_k = 0,8$; C_o – объемная теплоемкость продуктов горения (дымовых газов). Она может быть подсчитана как средневзвешенная теплоемкость газовой смеси по формулам термодинамики.

Для проектных расчетов объемной теплоемкости продуктов горения (кДж/м³°С) допустимо пользоваться приближенной формулой:

$$C_o = 1,335 + 0,0000755 t_o.$$

Подсчитываем $t_k = 1150 / 0,8 = 1437,5$ °С. Принимаем $t_d = t_k$, тогда $C_d = 1,355 + 0,0000755 \cdot 1437,5 = 1,464$ кДж/(м³°С).

Из уравнения теплового баланса выразим и найдем коэффициент избытка воздуха:

$$Q_n^p + V_g C_g t_g \alpha + C_m t_m = V_d \alpha t_k C_d,$$

$$\alpha = \frac{Q_n^p + C_m t_m}{V_d t_k C_d - V_g C_g t_g} = 3 \frac{6400 + 10 \cdot 1,7}{10,7 \cdot 1437,5 \cdot 1,464 - 9,5 \cdot 1,3 \cdot 10} = 1,6.$$

При $\alpha = 1,6$ продолжаем расчет горения топлива (табл.13) (строки 12÷15). Итоговые цифры в строке 15 графы 10 получают суммированием результатов строк 8,12÷14, а по графе 11 строки 15 – действительный расход воздуха:

$$100V_g = 100V_g^1 \alpha = 949,83 \cdot 1,6 = 1519,73 \text{ м}^3.$$

6. Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды твердого, жидкого и газообразного топлива.
2. Дайте характеристику древесного топлива (влажность, зольность, состав, теплотворная способность).
3. Где в настоящее время в основном используются древесное топливо?
4. Дайте характеристику торфу (влажность, зольность, состав, теплотворная способность).
5. На какие марки и по какому принципу делятся бурые угли?
6. На какие марки и по какому принципу делятся каменные угли?
7. Что такое антрацит?
8. Что такое пылевидное топливо?
9. Назовите формулу теплового баланса горения топлива.

7. Задачи для самостоятельного решения

Задание 1. Определите количество и состав дымовых газов, расход воздуха необходимый на горение природного газа для достижения температуры $T_{п} = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составьте материальный баланс процесса. Состав и характеристика природного газа представлены в таблице 14. Начальная температура воздуха $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура природного газа – $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Влажосодержание воздуха 15 г на 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха по объему $1,3\text{ кДж/м}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплоемкость природного газа – $1,7\text{ кДж/м}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Калориметрический коэффициент печи, в которой происходит процесс горения, равен $0,7$.

Таблица 14

Состав и характеристика природного газа различных месторождений

№	Состав газа по объему, %									$Q_{н}^p$, кДж/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₅	CO ₂	N ₂	H ₂ S		
1	94,9	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	0,2	38000,0	
2	93,0	2,1	0,8	0,4	0,3	0,3	2,7	0,4	36500,0	
3	86,9	6,0	1,6	1,0	0,5	1,2	2,8	нет	38600,0	
4	93,0	3,1	0,7	0,6	Нет	0,1	2,5	нет	36900,0	
5	95,0	1,1	0,3	0,1	0,3	0,4	3,0	0,1	35400,0	
6	93,0	4,0	0,6	0,4	1,2	0,1	1,3	0,3	37600,0	
7	93,0	2,1	1,2	1,0	0,01	0,8	0,5	0,2	39000,0	
8	98,	0,33	0,12	0,04	Нет	0,1	0,7	0,7	34100,0	

Задание 2. Определите количество и состав дымовых газов, расход воздуха необходимый на горение мазута для достижения температуры $T_{п} = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составьте материальный баланс процесса. Состав и характеристика мазута представлены в таблице 15. Дополнительно известно, что 25% углерода сгорает до CO, остальные 75% до CO₂, сера полностью сгорает до SO₂ и затем, 30% образующегося SO₂ сгорает до SO₃ используя кислород воздуха, который поступает на горение. Начальная температура воздуха $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура мазута – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Влажосодержание воздуха 15 г на 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха по массе $1,005\text{ кДж/кг }^{\circ}\text{C}$. Калориметрический коэффициент печи, в которой происходит процесс горения, равен $0,9$.

Таблица 15

Состав и характеристика мазута

№	Мазут	W, %	A, %	Состав, % мас.					Q _n ^p , кДж/кг
				S	C	H	N	O	
1	Низко-сернистый	0,15	0,03	0,39	87,18	11,87	0,10	0,10	41680,0
2	Мало-сернистый	0,20	0,03	0,85	86,38	12,04	0,10	0,20	40530,0
3	Сернистый	0,49	0,05	1,80	85,22	11,40	0,20	0,30	39570,0
4	Высокосернистый	1,00	0,06	2,55	84,04	10,64	0,24	0,41	39060,0

Необходимо учесть, что теплоемкость топлива рассчитывается по следующему уравнению:

$$C_m = 1,74 + 0,00252t_m.$$

Для проектных расчетов объемной теплоемкости продуктов горения (кДж/кг^oC) допустимо пользоваться приближенной формулой:

$$C_{\delta} = 1,05 + 0,00006t_{\delta}.$$

Задание 3. Определите количество и состав дымовых газов, расход воздуха необходимый на горение угля для достижения температуры $T_{п} = 1200$ °C и составьте материальный баланс процесса. Состав и характеристика угля представлены в таблице 16. Дополнительно известно, что 45 % углерода сгорает до CO, остальные 55 % до CO₂, сера на 20 % сгорает до SO₂, а остальное до SO₃. Начальная температура воздуха 10 °C, начальная температура угля – 10 °C. Влажосодержание воздуха 20 г на 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха по массе 1,005 кДж/кг^oC. Калориметрический коэффициент печи, в которой происходит процесс горения, равен 0,7.

Таблица 16

Состав и характеристика угля

№	W, %	A, %	Состав, % мас.					Q _н ^p , кДж/кг
			S	C	H	N	O	
1	10,00	16,00	5,20	80,00	5,50	1,80	7,50	33280,00
2	9,00	18,00	3,20	84,00	5,00	1,70	6,10	35380,00
3	12,00	17,00	3,00	87,00	5,00	1,50	3,50	35380,00
4	10,00	18,00	2,70	88,00	4,80	1,50	3,00	36000,00
5	11,00	19,00	2,50	89,00	4,50	1,50	2,50	36000,00
6	15,00	15,00	2,00	91,00	4,00	1,00	2,00	35590,00

Для проектных расчетов объемной теплоемкости продуктов горения (кДж/кг^oC) допустимо пользоваться приближенной формулой:

$$C_{\delta} = 1,05 + 0,00006t_{\delta}.$$

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Б.Н. Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов /Б.Н. Кузнецов, Т.Г. Шендрик, М.Л. Щипко. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2012. – 212 с.
2. Филоненко Ю.Я. Теоретические основы технологии коксования каменных углей: учебное пособие/Ю.Я. Филоненко, А.А. Кауфман, В.Ю. Филоненко. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. – 191 с.
3. Иванова И.В. Теория горения топлива. Технический анализ твердого топлива: учебное пособие / И.В. Иванова, А.Ф. Смоляков, И.Н. Дюкова, А.А. Куликов. –Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2016. – 32 с.
4. Михайловский В.П. Расчеты горения топлива, температурных полей и тепловых установок технологи бетонных и железобетонных изделий: учебное пособие / В.П. Михайловский, Э.Н. Мартемьянова, В.В. Ушаков. – Омск: СибАДИ, 2011. – 262 с.
5. Сардашвили А.Г. Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа / А.Г. Сардашвили, А.И. Львова. – М., Химия, 1980. – 256 с.
6. Моисеев А.В. Расчетные методы определения физико-химических свойств углеводородных систем, нефтей и нефтепродуктов: Примеры и задачи: учебное пособие / А.В. Моисеев. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – 179 с.
7. Савченков А.А. Первичная переработка нефти и газа: учебное пособие / А.А. Савченков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 128 с.

8. *Ахметов С.А.* Технология глубокой переработки нефти и газа: учебное пособие / С.А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2002. – 672 с.

9. *Трушкова Л.В.* Нефтегазовый комплекс: методические указания для подготовки и повышения квалификации рабочих по профессии «Лаборант химического анализа» / Л.В. Трушкова. – Тюмень: Издательский центр БИК ТюмГНГУ, 2013. – 45 с.

10. *Бойко Е.В.* Химия нефти и топлив: учебное пособие / Е.В. Бойко. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 60 с.

11. *Гаврилов С.В.* Судовые котельные и паропроизводительные установки. Методические указания у практическим занятиям для курсантов специальности 240500 «Эксплуатация судовых энергетических установок» / С.В. Гаврилов. – Петропавловск – Камчатский: КамчайГТУ, 2005. – 106 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение.....	3
2	Практическое занятие №1. Определение рационального состава углей и горючих сланцев	4
3	Практическое занятие №2. Определение теплотворности твердого топлива: углей и горючих сланцев	14
4	Практическое занятие №3. Определение теплотворности газообразного топлива и продуктов сгорания твердого топлива (углей и горючих сланцев).....	25
5	Практическое занятие №4. Температура горения топлива...	31
6	Практическое занятие №5. Тепловой и материальный балансы процесса горения твердого, газообразного и жидкого топлива.....	42
7	Рекомендуемый библиографический список	59