

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куницина

Расчет горения топлива

Методические указания
для выполнения домашнего задания/контрольной работы
по дисциплине «Теплотехника»
для студентов направлений подготовки
18.03.01 «Химическая технология», 22.03.02 «Металлургия»,
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
всех форм обучения

Новотроицк, 2018

УДК 669.041
ББК 31.391
К 91

Рецензенты:

*Доцент кафедры теплотехнических и энергетических систем
ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова, к.т.н., В.Н. Антонов*

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», к.т.н., Е.А. Шевченко*

Куницина Н.Г. Расчет горения топлива: Методические указания для выполнения домашнего задания/контрольной работы по дисциплине «Теплотехника» для студентов направлений подготовки 18.03.01 «Химическая технология», 22.03.02 «Металлургия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» всех форм обучения. - Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2018 - 47 с.

Методические указания составлены на основании рабочих программ дисциплины «Теплотехника» для указанных направлений подготовки и предназначены для закрепления знаний по основам процессов горения различных видов топлива в металлургических агрегатах.

Рассмотрены краткая характеристика различных видов топлива, общие принципы расчета горения топлива, приведены примеры расчетов твердого, жидкого и газообразного топлив. Представлены варианты задания для последующего расчета горения топлива и условия его сжигания. В приложении помещены справочные данные, необходимые для расчетов.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский
технологический университет
«МИСиС», 2018.

Содержание

Введение.....	4
1 Общая характеристика топлива.....	5
1.1 Требования к топливу.....	5
1.2 Классификация топлива.....	5
1.3 Химический состав топлива.....	6
1.4 Основные свойства топлива.....	10
1.5 Основные виды топлива.....	14
2 Основы теории горения.....	18
2.1 Общая характеристика процессов горения.....	18
2.2 Возникновение пламени.....	19
2.3 Особенности горения газообразного топлива.....	21
2.4 Особенности горения жидкого топлива.....	22
2.5 Особенности горения твердого топлива.....	23
3 Методика расчета горения топлива.....	24
3.1 Ограничения и допущения, принимаемые в технических расчетах.....	26
3.2 Определение расхода воздуха.....	26
3.3 Определение количества и состава продуктов сгорания.....	27
3.4 Определение температуры горения.....	28
3.5 Основные формулы для расчета горения топлива.....	30
4 Примеры расчетов горения топлива.....	31
Список использованных источников.....	41
Приложение А. Варианты заданий.....	42
Приложение Б. Средние теплоемкости для воздуха и газов.....	45
Приложение В. Энтальпия 1 м ³ воздуха и газов при различных температурах и постоянном давлении	46

Введение

При проектировании любой печной установки, источником тепла которой является какое-либо топливо, необходимо рассчитать характеристики горения этого топлива, к которым относятся: теплота сгорания топлива; количество воздуха, необходимое для сжигания данного топлива; количество и состав продуктов горения; температура продуктов горения топлива.

Расчеты горения топлива всегда выполняются в начале полного расчета печи, так как позволяют определить одну из наиболее важных величин – температуру горения топлива, которая в значительной мере определяет температурный режим работы печи. Однако значение расчетов горения топлива этим не ограничивается. Расчет горения топлива совместно с расчетом теплового баланса печи позволяет определить полное количество отходящих из печи продуктов сгорания, без чего невозможно выполнить расчет таких важных элементов печи как рекуператоры, борова, дымовые трубы.

Цель настоящих методических указаний – закрепить знания по разделу «Горение топлива», полученные студентами при изучении теоретической части указанной дисциплины, ознакомить студентов с методиками расчетов горения топлива, а также выработать практические навыки самостоятельного проведения расчетов, т.к. важной задачей при проектировании печей металлургической промышленности является правильное решение вопросов, связанных с сжиганием топлива.

1 Общая характеристика топлива

Органическое ископаемое топливо (твердое, жидкое, газообразное) является в настоящее время и по прогнозам до 2030 г. основным источником энергии (теплоты) для металлургической промышленности. Топливо – это вещества органического происхождения, которые при нагревании в присутствии кислорода интенсивно окисляются с выделением значительного количества тепла.

1.1 Требования к топливу

К топливу предъявляются следующие требования:

- добыча топлива, находящегося в виде природных запасов, должна быть сопряжена с наименьшими экономическими затратами. Это, в частности, предполагает, что оно сосредоточено в месторождениях в большом количестве. Все более актуальным становится также требование минимального нарушения экологической обстановки при добыче полезных ископаемых;

- продукты сгорания должны быть как можно более безвредными для людей и окружающей природы;

- продукты сгорания топлива должны легко удаляться по мере его сжигания. Наилучшим в этом отношении является газообразное топливо, которое в отличие от твердого и жидкого не дает после сгорания твердого остатка;

- продукты сгорания не должны загрязнять технологический продукт (или это загрязнение не должно существенно влиять на его качество), а также взаимодействовать с материалом футеровки рабочей камеры печи. В этом отношении преимущество имеет газообразное и в меньшей степени жидкое топливо;

- процесс горения должен быть легко контролируемым и регулируемым, что также характерно для газообразного и жидкого топлива.

Топливный баланс со временем изменяется по структуре. Открытие крупных месторождений газообразного топлива, которое легко транспортируется по трубопроводам, позволило намного уменьшить использование твердого топлива. Преимуществами природного газообразного и жидкого топлив являются также более высокая калорийность и меньшая стоимость, поэтому их доля в топливном балансе, постоянно возрастает.

1.2 Классификация топлива

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 энергии.

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

Агрегатное состояние топлива	Виды топлива	
	Естественное (природное)	Искусственное
Твердое	Древесина, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, горючие сланцы	Древесный уголь, кокс, торфяные и угольные брикеты
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, мазут, смола каменноугольная, лигроин
Газообразное	Природный газ	Коксовый, доменный, генераторный, конвертерный

1.3 Химический состав топлива

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, водород и сера, а также условно кислород и азот; в негорючую часть – зола, представляющая смесь минеральных веществ, и влага, составляющие его балласт (B). Они попадают в топливо из недр земли, а также при транспортировке и хранении топлива на складах: $B = A + W$.

Углерод является главной горючей составляющей всех топлив.

При полном сгорании углерода тепловыделение составляет $33,5 \times 10^3$ 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 – 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 142×10^3 кДж/кг. С увеличением возраста твердого топлива содержание в нем водорода падает.

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

Сера входит в топливо в трех видах: сера органическая $S_{орг}$, входящая в состав его органических соединений; сера колчеданная S_k , входящая в состав сульфидов, главным образом пирита и марказита FeS_2 , и сера сульфатная S_c , 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: $S_l = S_{орг} + S_k$. 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 – $S_{общ} = S_{орг} + S_k + S_c = S_l + S_c$. Сера является вредной составляющей топлива, так как при ее сгорании образуются оксиды: сернистый ангидрид SO_2 и серный ангидрид SO_3 . Особенно вреден SO_3 , который, соединяясь с влагой, дает в качест-

ве 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 и т.д. Выбросы SO_2 и SO_3 в атмосферу оказывают вредное влияние на окружающую среду.

Минеральные компоненты 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 %. 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 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 (0,3-10 %) – 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.

Содержание химических элементов и других составляющих топлива исчис-

ляется в процентах от единицы массы или объема, исходя из определенной части (массы) топлива. В зависимости от состава и вида топлива различают рабочую, сухую, горючую и органическую массы топлива. Каждой массе присваивается соответствующий индекс: рабочей – р, сухой – с, горючей – г, органической – о.

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

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S_{л}^P + A^P + W^P = 100\%. \quad (1)$$

При полном высушивании топлива (при $t \geq 105$ °С) получают **сухую** массу. Уравнение элементарного состава сухой массы топлива имеет вид

$$C^C + H^C + O^C + N^C + S_{л}^C + A^C = 100\%. \quad (2)$$

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

$$C^Г + H^Г + O^Г + N^Г + S_{л}^Г = 100\%. \quad (3)$$

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

$$C^O + H^O + O^O + N^O = 100\%. \quad (4)$$

При переходе от рабочей к органической массе доля химических элементов в составе топлива увеличивается, т.е. $C^O > C^Г > C^C > C^P$.

Пересчет состава из одной массы на другую выполняется по следующим выражениям, %:

$$X^O = X^Г \cdot \frac{100}{100 - S^Г}; \quad (5)$$

$$X^O = X^C \cdot \frac{100}{100 - S^C - A^C}; \quad (6)$$

$$X^O = X^P \cdot \frac{100}{100 - S^P - A^P - W^P}; \quad (7)$$

$$X^{\Gamma} = X^C \cdot \frac{100}{100 - A^C}; \quad (8)$$

$$X^{\Gamma} = X^P \cdot \frac{100}{100 - A^P - W^P}; \quad (9)$$

$$X^C = X^P \cdot \frac{100}{100 - W^P}, \quad (10)$$

где X^P , X^C , X^{Γ} , X^O – содержание какого-либо элемента соответственно в рабочей, сухой, горючей и органической массе.

Для жидких топлив характерны **рабочая** и **сухая** (безводная) массы. Рабочая масса жидких топлив характеризуется отсутствием в ее составе золы.

Состав природных и искусственных газов исчисляется только на сухой объем (1 м³ при нормальных условиях). Содержание влаги определяет масса воды в единице объема сухого газа (W , г/м³). При анализе газообразного топлива влага не учитывается, поэтому сухое топливо пересчитывают на влажное, используя следующие зависимости

$$X^{вл} = X^{сух} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W}; \quad (11)$$

$$H_2O = 0,1242 \cdot W \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W}. \quad (12)$$

1.4 Основные свойства топлива

Теплота сгорания. Наиболее важной характеристикой топлива является **теплота сгорания** – количество тепла, получаемого при сжигании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м³ газообразного топлива в кДж/кг (ккал/кг) или кДж/м³ (ккал/м³): 1 ккал = 4,1868, или 4,19, кДж.

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

$$Q_n^P = Q_v^P - 25 \cdot (9 \cdot H^P + W^P), \quad (13)$$

где Q_n^P – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг;

Q_v^P – высшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг;

25 – теплота парообразования при температуре 0 °С и атмосферном давлении, кДж/кг;

9 – коэффициент, показывающий, что при сгорании 1 кг водорода в соединении с кислородом образуется 9 кг воды.

Теплота сгорания горючих газов определяется в такой же калориметрической установке или в калориметре, в котором теплота сгорающего топлива полностью поглощается водой, проходящей через калориметр. Полученные значения высшей теплоты пересчитывают в Q_n^P по формуле (13).

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

$$Q_v^P = 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S_n^P); \quad (14)$$

$$Q_n^P = 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S_n^P) - 25 \cdot (9 \cdot H^P + W^P), \quad (15)$$

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 перехо-

де 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

$$Q_n^P = 127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + 555 \cdot C_2H_2 + 635 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} + 234 \cdot H_2S. \quad (16)$$

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.

Сама по себе теплота сгорания топлива не влияет на экономичность процесса горения, однако величина теплоты сгорания в значительной степени зависит от содержания в топливе балласта (влаги, золы), влияние которого было рассмотрено выше. По этим причинам теплота сгорания топлива и рассматривается как один из факторов, определяющих экономичность горения.

Путем смешивания топлив разных марок можно значительно повысить экономичность процесса горения.

Расход топлива зависит от его теплоты сгорания, которая для различных топлив изменяется в больших пределах. Так, теплота сгорания твердых топлив колеблется от 8×10^3 – 12×10^3 кДж/кг у торфа, до 25×10^3 – 26×10^3 кДж/кг у каменных углей; жидких топлив – от 40×10^3 кДж/кг у мазутов и до 47×10^3 кДж/кг у бензинов. Еще больший разброс в теплотах сгорания у газов: если у доменного газа $33,3 \times 10^3$ кДж/м³, то у попутных газов нефтяных месторождений она поднимается до 47×10^3 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.

Условное топливо. Условным называется топливо, имеющее теплоту сгорания 29302 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 называется отношение низшей теплоты сгорания рабочей массы реального топлива к теплоте сгорания условного топлива

$$\text{Э}_T = \frac{Q_n^P}{Q_y}, \quad (17)$$

где Э_T – топливный эквивалент;

Q_y – теплота сгорания условного топлива, кДж/кг.

Зольность и влажность. Зола и влага снижают качество топлива, являются нежелательными примесями. Влага снижает теплоту сгорания, затрудняет воспламенение топлива; влажное топливо труднее транспортировать. Зола представляет собой минеральную массу. Она может содержаться в веществе, послужившем образованием топлива, или попасть в него при залегании в недрах земли как случайная примесь. Зола препятствует полному сгоранию топлива, образуя на поверхности кусков горящего топлива воздухо непроницаемый слой. Если зола плавится, то спекшиеся ее куски образуют шлак, еще более препятствующий выгоранию кокса, чем рассыпчатый зольный остаток.

Сернистость. Сера является нежелательной примесью в топливе, несмотря на то, что она в виде серного колчедана повышает ее теплоту сгорания. При горении серы образуются ядовитые сернистый SO_2 и серный SO_3 газы, присутствие которых в рабочем помещении даже в незначительных количествах ухудшает условия труда. Присутствие в среде при тепловой обработке этих газов ухудшает качество готовой продукции. Во влажной среде при низких температурах эти газы образуют пары сернистой H_2SO_3 и серной H_2SO_4 кислот, вызывающие коррозию металлических частей тепловых установок.

Летучие горючие вещества и коксовый остаток. Твердое топливо при нагревании без доступа воздуха начинает разлагаться. Сначала из него испаряется влага, затем выделяются газообразные продукты, называемые летучими горючими веществами. В смеси с воздухом они горят длинным пламенем. Чем больше в топливе летучих веществ, тем оно быстрее загорается и дольше горит пламенем. После выделения летучих веществ остается твердый остаток, называемый коксом. По составу кокс близок к углероду с примесью золы. Он горит без пламени, тлея в кусках.

Технические свойства жидкого топлива. Жидкое топливо имеет свои специфические свойства, определяющие условия его транспортирования, хранения и сжигания.

Вязкость положена в основу маркировки мазута. В зависимости от вязкости топлива выбирают условия его транспортирования по трубопроводам в цистернах, перекачки его в хранилища, распыливания форсунками при сжигании.

Плотность – особенно важное свойство для мазутов. С повышением плотности обычно увеличивается их вязкость, при повышении температуры плотность мазутов уменьшается.

Температура застывания – такая температура, при которой топливо теряет свою текучесть. От температуры застывания зависит необходимость подогрева его при транспортировании и распыливании.

Температура вспышки – такая температура, при которой отделившиеся от поверхности жидкого топлива пары образуют с окружающим воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени, однако скорость образования паров недостаточна для продолжения горения. При хранении жидкого топлива возникает опасность пожаров на складах.

Температура воспламенения – это такая, при которой нагреваемое в стандартных условиях топливо загорается при поднесении к нему пламени и горит не менее пяти секунд.

1.5 Основные виды топлива

Древесина – это твердое топливо, используемое преимущественно в мелких котельных установках. Широкое применение имеют отходы деревообделочного производства: щепа, стружки, опилки, кора и др. Влажность воздушно-сухих дров не превышает 25 %, полусухих – 35 %, свежесрубленных – 50 %. Опилки обычно имеют влажность 45-60 %. Дрова как топливо характеризуются высоким выходом летучих горючих веществ – до 85 % и незначительным содержанием золы – в среднем до 1 %, лишь в сплавных дровах зольность повышается до 5 %. Следовательно, балласт дров определяется в основном их влажностью, от которой и зависит теплота сгорания.

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.

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. Как топливо по своим свойствам близок к дровам. Влажность торфа колеблется в зависимости от способа добычи, условий сушки и хранения от 30-40 до 50-55 %. Зольность торфа колеблется от 7 до 15 %.

Следующей за торфом стадией разложения растительного вещества является образование ископаемых углей. Так как процесс обуглероживания растительного вещества протекал не скачкообразно, а постепенно, то ископаемые угли ха-

рактируются разной степенью разложения и в зависимости от этого бывают бурые угли, каменные угли и антрациты.

Бурый уголь относят к самым молодым углям. Его цвет меняется от бурого до черного, он лишен блеска, имеет пористую структуру, небольшую механическую прочность, содержит много влаги, соединяется легко с кислородом воздуха и при длительном хранении на воздухе сильно выветривается и рассыпается в порошок. Кроме того, он обладает большой склонностью к самовозгоранию. По своей структуре отличается повышенным содержанием балласта и необычно высокой гигроскопичностью, вследствие чего влажность бурых углей 17-55 %. Бурые угли не спекаются, отличаются большим выходом летучих (33,5-58,5 %) на горючую массу и зольностью на сухую массу (10,5-34 %), высоким содержанием серы (0,6-5,9 %).

Каменный уголь применяют непосредственно как топливо или перерабатывают на кокс. По виду кокса различают угли неспекающиеся (порошкообразный кокс) и спекающиеся (сплавленный кокс, иногда вспученный). Каменные угли довольно плотны и малопористы и содержание внешней влаги в них значительно ниже, чем в бурых углях. Многие каменные угли обладают повышенной механической прочностью. В хранении они более устойчивы, меньше подвержены самовозгоранию, а некоторые их виды совсем не самовозгораются.

Антрацит относится к старейшим по происхождению каменным углям, отличается большой твердостью, трудно загорается, горит коротким пламенем, хорошо выдерживает перегрузки и перевозки. Переходным между каменными углями и антрацитом является полуантрацит. Антрацит и полуантрацит не самовозгораются.

Горючие сланцы являются продуктами разложения растительных остатков, осевших на дне больших водоемов; смешиваясь с минеральными осадками, образовывалось илистое вещество – сапропель, которое обогащалось водородом, уплотнялось и превращалось в горючие сланцы.

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. При сжигании сланцев образуется очень большое количество золы (64,5 %). Выход летучих у сланцев очень высок – до 90 %, влажность 13 %.

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.

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.

Газообразное топливо по сравнению с жидким и твердым топливом обладает преимуществами: возможностью лучшего смешения газа с воздухом и, следовательно, сжиганием с меньшим избытком воздуха; легкостью подогрева перед сжиганием; отсутствием золы в топливе; транспортабельностью и удобством учета расхода газа; простотой обслуживания горелочных устройств и т. д.

Одновременно с указанными преимуществами газообразное топлива имеет и ряд недостатков: взрывоопасность; малая объемная масса, что создает дополнительные затруднения при хранении газа.

В этом отношении газ уступает и твердому, и жидкому топливу.

Однако перечисленные преимущества и сравнительно низкая стоимость добычи способствуют широкому внедрению газа и постепенному вытеснению твердого и жидкого топлива в различных отраслях промышленности.

Природный газ состоит главным образом из метана и некоторого количества тяжелых углеводородов. Балластом в газе являются азот, двуокись углерода и влага. Виды газа бывают различные как по месторождению, так и по составу.

Одним из преимуществ природного газа является отсутствие в его составе сернистых соединений, что для металлургической промышленности имеет особое значение.

К искусственным газам, применяемым в качестве топлива, относят коксовый, доменный и генераторные газы.

Коксовый газ является продуктом коксования углей и представляет собой те летучие продукты, которые получаются при термическом разложении угля (сырой или прямой газ). Сырой коксовый газ содержит ряд ценных примесей и балласт: смолу, аммиак, воду, сероводород и т.д., которые конденсируют и улавливают при первичной очистке газа. Газ, прошедший первичную очистку, называется обратным. Обратный газ подвергают дополнительной очистке для извлечения из него циана, окислов азота и серы. Удаление серы необходимо, так как ее присутствие в газе значительно снижает качество газа и сужает область его применения. Полученный газ называют очищенным коксовым газом. Состав и выход коксового газа зависит от вида коксуемых углей и режима коксования.

Коксовый газ применяется в чистом виде или в смеси с доменным газом.

Доменный газ получается как побочный продукт доменного производства. Состав доменного газа зависит от температуры дутья, обогащения его кислоро-

дом, состава и расхода кокса, состава шихты, давления на колошнике, применения природного газа.

Доменный газ содержит значительное количество пыли (60-70 г/м³), поэтому его необходимо подвергать очистке. Доменный газ применяется в воздухонагревателях доменных печей, в котельных установках, в печах с более высокой температурой (мартеновских и прокатных) доменный газ применяется в смеси с коксовым газом.

Генераторный газ – это продукт полного превращения твердого топлива в горючий газ под воздействием кислорода. Остатком при процессе газификации является только зола или шлак.

Генераторные газы могут быть получены в любом месте, где добывается или куда может быть завезено топливо. Процесс газификации проводится в специальных устройствах-газогенераторах.

2 Основы теории горения

2.1 Общая характеристика процессов горения топлива

Горением называется процесс взаимодействия топлива с окислителем, сопровождающийся выделением тепла. Роль окислителя в большинстве случаев выполняет кислород воздуха.

Для того, чтобы происходило горение, необходимо обеспечить тесный контакт между молекулами топлива и окислителя, т.е. необходимо смешать топливо с воздухом.

Следовательно, процесс горения складывается из двух стадий:

- смешение топлива с воздухом;
- горение топлива.

Во время протекания второй стадии происходят сначала воспламенение, а затем уже и горение топлива.

В процессе горения образуется пламя, в котором протекают реакции горения составляющих топлива, и происходит выделение тепла. В технике при сжигании газообразного, жидкого и твердого пылевидного топлива применяют так называемый факельный метод сжигания. Факел – это частный вид пламени, образующегося при подаче топлива и воздуха в рабочее пространство печи в виде струй, постепенно перемешивающихся друг с другом.

При факельном сжигании топлива аэродинамическую основу процесса составляют струйные течения. Поскольку при факельном сжигании характер движения струй может быть ламинарным и турбулентным, в процессах смешения большая роль принадлежит молекулярной и турбулентной диффузии.

Ламинарным называют такое движение, когда струйки газа протекают параллельно одна другой, не пересекаясь. При турбулентном режиме в потоке возникает множество вихрей, что приводит к интенсивному перемешиванию газа.

На практике при создании устройств для сжигания топлива (горелок, форсунок) применяют различные конструктивные средства (устройства, направляющие струи под углом друг к другу, устройства для закручивания струй и др.) с тем, чтобы организовать смешение топлива с воздухом так, как это необходимо для каждого конкретного случая.

Различают гомогенное и гетерогенное горение. При гомогенном горении тепло- и массообмен происходят между телами, находящимися в одинаковом агрегатном состоянии. Гомогенное горение свойственно газообразному топливу и происходит в объеме. При гетерогенном горении тепло- и массообмен происходят между телами, находящимися в разных агрегатных состояниях (обмен происходит между газом и поверхностью частиц топлива). Такое горение свойственно жид-

кому и твердому топливам.

Гомогенное горение может протекать в кинетической и диффузионной областях. При кинетическом горении полное перемешивание топлива с воздухом осуществляют предварительно, и в зону горения подают заранее подготовленную топливо – воздушную смесь. При диффузионном гомогенном горении процессы горения и смешения не разделены и совершаются практически одновременно.

2.2 Возникновение пламени

Возникновение пламени (воспламенение топлива) может произойти только после того, как будет достигнут необходимый контакт молекул топлива и окислителя. Любая реакция окисления протекает с выделением тепла. Вначале реакция окисления идет медленно с выделением малого количества тепла. Однако выделяющееся тепло способствует повышению температуры и ускорению реакции, что, в свою очередь, приводит к более энергичному выделению тепла, которое оказывает благоприятное влияние на развитие реакции. Таким образом, происходит постепенное нарастание скорости реакции до момента воспламенения, после чего реакция идет с очень большой скоростью и носит лавинный характер. В реакциях окисления неразрывно связаны друг с другом механизм химической реакции и тепловые характеристики процесса окисления. Первичным фактором является химическая реакция и вторичным – выделение тепла. Оба эти явления тесно связаны между собой и влияют друг на друга.

В практических условиях обычно прибегают к искусственному поджиганию топлива, вводя в зону горения определенное количество тепла, что приводит к резкому ускорению момента достижения воспламенения.

В большинстве случаев выделение тепла при горении сопровождается потерями тепла в окружающую среду. Соотношения между выделяемым количеством тепла и теплом, передаваемым в окружающую среду, имеет большое значение для развития процесса воспламенения топлива. При стационарном состоянии процесса количество выделяющегося в единицу времени тепла должно быть равно количеству теряемого тепла. По мере окисления топлива значение температуры будет возрастать. И температура достигнет своего наибольшего значения, когда тепловыделение еще равно теплоотдаче. При дальнейшем увеличении тепловыделения начинается переход к резкому нестационарному выгоранию смеси, проходящему с бурным нарастанием температуры и скорости реакции, т. е. происходит тепловой взрыв.

Температура, при которой начинается нестационарный процесс выгорания смеси, называется температурой воспламенения. Таким образом, температура воспламенения не является физико-химической константой, определяемой только

свойствами смеси, она определяется условиями протекания процесса, т. е. характером теплообмена с окружающей средой (температурой, формой сосуда и др.). Температуры воспламенения различных топлив приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Температуры воспламенения в воздухе при атмосферном давлении

Вещество	Температура воспламенения, К		Вещество	Температура воспламенения, К	
	минимальная	максимальная		минимальная	максимальная
Водород	803	863	Ацетилен	608	773
Оксид углерода	883	931	Бензин	683	833
Метан	918	1123	Керосин	-	593
Этан	803	867	Нефть	-	498
Пропан	803	861	Бурый уголь	-	723
Бутан	763	842	Кокс	873	973

Кроме температуры, большое влияние на процесс зажигания топлива оказывает концентрация горючей составляющей в смеси. Существуют такие минимальная и максимальная концентрации горючей составляющей, ниже и выше которых вынужденное воспламенение произойти не может. Такие предельные концентрации называются концентрационными пределами воспламенения, значения их для некоторых газов приведены в таблице 3. Чтобы установить пределы воспламенения промышленных газов, которые являются смесью различных горючих компонентов, пользуются правилом Ле-Шателье, по которому

$$Z = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{Z_1} + \frac{P_2}{Z_2} + \frac{P_3}{Z_3} + \dots + \frac{P_n}{Z_n}}, \quad (18)$$

где Z - искомый нижний или верхний предел воспламенения,

Z_1, Z_2, Z_3, Z_n - соответствующие пределы воспламенения для горючих компонентов топлива,

P_1, P_2, P_3, P_n – процентное содержание отдельных горючих компонентов в топливе.

Таблица 3 – Концентрационные пределы воспламенения, %

Вещество	Газо-воздушная смесь		Газо-кислородная смесь	
	нижний предел	верхний предел	нижний предел	верхний предел
Водород	9,5	65,2	9,2	91,6
Оксид углерода	15,6	70,9	16,7	93,5
Метан	6,3	11,9	6,5	51,9

Негорючие составляющие газообразного топлива влияют на границы воспламенения, они повышают нижний и понижают верхний пределы воспламенения.

2.3 Особенности горения газообразного топлива

Горение газов происходит в объеме и относится к гомогенному горению. Оно может происходить как в кинетической, так и в диффузионной области.

Кинетическое горение. После того как произошло воспламенение, наступает процесс распространения пламени, связанный с постоянной передачей тепла от сгоревших к новым порциям топлива. Подобная передача тепла определяется законами теплопроводности и диффузии, и сильно зависит от характера пламени. Если пламя распространяется в неподвижной смеси или смеси, движущейся ламинарно, то основной формой передачи тепла будет молекулярная теплопроводность. Подобный чисто теплопроводный процесс получил название нормального горения.

При турбулентном движении газо-окислительной смеси большую роль приобретает турбулентная диффузия. При некоторых условиях распространение пламени происходит с огромной скоростью и имеет характер взрывной волны. Подобное распространение пламени получило название детонационного горения или просто детонации.

Важнейшими факторами, влияющими на скорость распространения нормального горения, являются состав горючей смеси, предварительная температура подогрева смеси или отдельных ее компонентов и давление.

Для всех горючих газов существует оптимальное соотношение газа и воздуха, при котором скорость нормального горения достигает максимальной величины. При этом максимум скорости нормального горения никогда не соответствует стехиометрическому соотношению, а всегда смещен в сторону избыточного содержания газа в горючей смеси. Температура горения (или тепловыделение) достигает своего наибольшего значения именно при стехиометрическом соотношении.

Горение при турбулентном режиме более распространенный случай в металлургической практике, чем горение в спокойной или ламинарно движущейся среде. На скорость турбулентного горения и на состояние фронта горения большое влияние оказывает общий уровень турбулентности потока и сам процесс горения, поскольку при определенных условиях возникает неустойчивость фронта горения.

Диффузионное горение. В настоящее время широко распространен диффузионный метод сжигания газообразного топлива, при котором смешение и горе-

ние происходят в одном объеме. И при кинетическом, и при диффузионном горении образуется фронт горения, в котором горючее и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении. Достижение стехиометрического соотношения, которое при наличии постоянного поджигателя (в металлургических печах всегда есть поджигатель) обеспечивает необходимые условия для протекания процесса горения, зависит от характера перемешивания топлива с воздухом. Поэтому процессы смешения при диффузионном горении играют первостепенную роль.

Диффузионные пламена имеют сложный турбулентный характер и изучены пока недостаточно.

2.4 Особенности горения жидкого топлива

В условиях промышленных печей жидкое топливо сжигают в распыленном состоянии.

Процесс горения жидкого топлива складывается из следующих стадий:

- распыление;
- воспламенение, которому предшествует и способствует процесс смешения;
- подогрев и испарение;
- горение капли жидкого топлива.

Процесс распыления топлива основан на дроблении жидкости распылителем. Дробление будет происходить в том случае, если давление движущегося распылителя будет превышать действие поверхностного натяжения.

Воспламенение жидкого топлива происходит следующим образом: жидкое топливо, попав в среду с высокой температурой, начинает испаряться. Около поверхности капли образуется паро-воздушная смесь, которая воспламеняется первой. Температура, при которой происходит воспламенение паро-воздушной смеси, называется температурой вспышки топлива. Обычно температура кипения жидкого топлива ниже температуры воспламенения.

Все процессы, из которых складывается горение топлива, совершаются или на поверхности, или около поверхности капли.

Температура кипения жидких топлив всегда ниже температуры воспламенения, поэтому горение жидкого топлива в основном происходит в паровой фазе. Процессы горения паро-воздушной смеси и испарения тесно связаны между собой. При горении жидкого топлива осуществляется теплообмен между газовой средой и поверхностью жидкости, т.е. между средами, находящимися в разных агрегатных состояниях, что придает всему процессу гетерогенный характер

Общее время горения капли находят из анализа изменения размеров капли в связи с процессами тепло- и массопереноса. Оно прямо пропорционально плотно-

сти, размеру капли и скрытой теплоте капли и обратно пропорционально теплопроводности капли, а также перепаду температур между газовой средой и поверхностью капли.

2.5 Особенности горения твердого топлива

Горение твердого топлива относится к гетерогенному.

Процесс горения твердого топлива складывается из следующих стадий:

- подогрев и подсушка топлива;
- процесс пирогенного разложения топлива с выделением летучих и образованием коксового остатка;
- горение летучих;
- горение коксового остатка.

Процесс выделения летучих, т.е. горючей смеси различных газообразных составляющих – H_2 , CO , CH_4 , C_mH_n и др., протекает при подогреве топлива до $200\text{ }^\circ\text{C}$ и выше. Температура начала выделения летучих зависит от возраста угля. Чем «старше» уголь, тем выше в нем содержание углерода, тем при более высокой температуре начинается процесс выделения летучих. Летучие в процессе горения твердого топлива играют важную роль, которая различна при горении кускового топлива и угольной пыли.

При горении кускового топлива летучие выделяются при сравнительно умеренных температурах, смешиваются с воздухом и воспламеняются первыми. Таким образом, горением летучих начинается процесс горения всего топлива. Тепло, выделяемое при горении летучих, способствует повышению температуры и дальнейшему развитию процесса горения. Горение углерода начинается уже после завершения выхода летучих. Процесс горения самого углерода продолжителен и он определяет время протекания всего процесса.

При сжигании угольной пыли в связи с огромной суммарной поверхностью угольных частиц основная масса летучих не успевает выделиться до момента воспламенения частиц, поэтому летучие сгорают вместе с углеродом.

3 Методика расчета 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. 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 к теоретическому называют коэффициентом избытка воздуха

$$n = \frac{V_{\text{возд(д)}}}{V_{\text{возд(т)}}}, \quad (19)$$

где n – коэффициент избытка воздуха.

$V_{\text{возд(д)}}$ – действительный объем воздуха, м^3 ;

$V_{\text{возд(т)}}$ – теоретический объем воздуха, м^3 ;

Значение коэффициента избытка зависит от вида топлива и степени совершенства устройства для сжигания топлива. Наибольшая полнота смешения с воздухом достигается у газообразного топлива. Поэтому его можно сжечь с минимальным избытком воздуха: $n=1,05-1,1$. 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: $n=1,1-1,2$. Несколько больший избыток воздуха необходим при сжигании пылевидного топлива: $n=1,2-1,25$. Наименее развитая поверхность

взаимодействия с воздухом образуется при сжигании твердого кускового топлива. Поэтому здесь избытки воздуха значительны: $n=1,4-1,8$.

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 настоящих методических указаниях.

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 2-3 %. Ими удобно пользоваться в тех случаях, когда не требуется определять состав продуктов горения.

Третьим этапом расчета горения является определение температуры горения топлив. Различают теоретическую (калориметрическую) и практическую температуры горения топлива. Максимальная калориметрическая температура развивается при сжигании топлива с $n=1$. 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 печах никогда не достигается. Это происходит потому, что сжигание топлива в промышленных условиях сопровождается определенными потерями: часть топлива вообще не успевает сгорать и удаляется из печей вместе с золой, шлаком и дымовыми газами. 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 устройства для сжигания топлива.

Кроме потерь тепла, часть его передается нагреваемому материалу непо-

средственно 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 всегда ниже калориметрической (теоретической).

Факторы, которые обуславливают снижение теоретической температуры горения топлива при его сжигании в котельных и промышленных тепловых установках, учитывают калориметрическим коэффициентом η (в некоторых источниках называют пирометрическим коэффициентом горения)

$$t_{\text{п}} = \eta \cdot t_{\text{к}}, \quad (20)$$

где $t_{\text{п}}$ – практическая температура, °С;
 η – пирометрический коэффициент;
 $t_{\text{к}}$ – калориметрическая температура, °С.

Пирометрический коэффициент зависит от назначения и конструкции печи и составляет: для топочных камер $\eta=0,95$, для садочных печей $\eta=0,8-0,85$, для проходных и протяжных печей $\eta=0,7-0,75$.

3.1 Ограничения и допущения, принимаемые в технических расчетах

Все расчеты ведутся на единицу топлива (1 кг для твердого и жидкого и 1 м³ для газообразного топлива). Газовые объемы рассчитываются при нормальных условиях, т. е. при температуре 20 °С и давлении 760 мм. рт. ст. Объем одного моля газов в этих условиях принимают равным 22,4 м³. В качестве окислителя используют атмосферный воздух, состав которого принимают неизменным: 21 % кислорода и 79 % азота по объему. Соотношение азота и кислорода воздуха представляют в виде константы $k = \frac{79}{21} = 3,762$.

Рассмотрим точные расчеты горения топлива, основанные на стехиометрических соотношениях горючих составляющих и окислителя. Такие расчеты принято называть аналитическими.

3.2 Определение расхода воздуха

В качестве первого примера рассмотрим горение газообразного топлива, состоящего из 98 % CH₄ и 2 % N₂. Горючей составляющей данного топлива является метан, который будет окисляться по реакции: CH₄ + 2O₂ = CO₂ + 2H₂O.

Из реакции следует, что для сжигания 1 моль CH₄ требуется 2 моль O₂. Объем 1 моль любого газа одинаков для всех газов и при нормальных условиях

равен 22,4 л, следовательно для сжигания 1 м³ CH₄ требуется 2 м³ O₂. В рассматриваемом примере в 1 м³ газа содержится 0,98 м³ CH₄, для сжигания которого требуется 0,98 · 2 = 1,96 м³ O₂. Количество азота в воздухе определяется с учетом константы и равно 1,96 · 3,762 = 7,37 м³ (*). Расход воздуха для сжигания 1 м³ газа указанного состава будет равен 1,96 + 7,37 = 9,33 м³.

Вторым примером рассмотрим горение 1 кг углерода, который окисляется по реакции: C + O₂ = CO₂. Из реакции следует, что для окисления 1 моль C требуется 1 моль O₂. По условию примера в реакции окисления будет участвовать $\frac{1000\text{г}}{12\text{г/моль}} = 83,33\text{моль}$ C. Поэтому для его окисления также потребуется 83,33 моль O₂. Следовательно, объем требуемого кислорода составит 83,33 · 22,4 = 1867 л = 1,87 м³. Количество азота в воздухе составит 1,87 · 3,762 = 7,02 м³. Расход воздуха для сжигания 1 кг углерода будет равен 1,87 + 7,02 = 8,89 м³.

Если в состав топлива входит некоторое количество кислорода, то при горении топлива он может участвовать в реакциях окисления, поэтому из суммарного объема кислорода, необходимого для сгорания топлива, следует вычесть объем кислорода топлива.

3.2 Определение количества и состава продуктов сгорания

Рассмотрим пример горения газа (98 % CH₄ и 2 % N₂) сначала при коэффициенте расхода воздуха, равным 1. Определим последовательно количество каждой составляющей продуктов сгорания. При сжигании 1 м³ CH₄ образуется 1 м³ CO₂ и 2 м³ H₂O, а при сжигании 0,98 м³ CH₄ образуется 0,98 м³ CO₂ и 1,96 м³ H₂O.

Кроме того, вносится азота:

с воздухом 1,96 · 3,762 = 7,37 м³ (см. выше (*))

с газом 0,02 м³

Итого 7,39 м³.

Полное количество продуктов сгорания: 0,98 + 1,96 + 7,39 = 10,33 м³.

Состав продуктов сгорания будет следующий, %:

CO₂. $\frac{0,98}{10,33} \cdot 100 = 9,49$

H₂O. $\frac{1,96}{10,33} \cdot 100 = 18,97$

N₂. $\frac{7,39}{10,33} \cdot 100 = 71,54$

Итого. 100 %.

При сжигании газа с коэффициентом расхода воздуха, большим единицы, количество и состав продуктов сгорания изменяются. Например, при $n = 1,2$ в продуктах сгорания газа рассматриваемого состава будет $0,98 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$; $1,96 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$; $1,96 \cdot 1,2 - 1,96 = 0,39 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ и $1,96 \cdot 1,2 \cdot 3,762 + 0,02 = 8,86 \text{ м}^3 \text{ N}_2$.

Полное количество продуктов сгорания: $0,98 + 1,96 + 0,39 + 8,86 = 12,19 \text{ м}^3$.

Состав продуктов сгорания будет следующий, %:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2. & \dots\dots\dots \frac{0,98}{12,19} \cdot 100 = 8,04 \\ \text{H}_2\text{O}. & \dots\dots\dots \frac{1,96}{12,19} \cdot 100 = 16,08 \\ \text{O}_2. & \dots\dots\dots \frac{0,39}{12,19} \cdot 100 = 3,20 \\ \text{N}_2. & \dots\dots\dots \frac{8,86}{12,19} \cdot 100 = 72,68 \end{aligned}$$

Итого. 100 %.

Правильность выполненного расчета горения топлива проверяют методом составления материального баланса этого процесса. Для рассмотренного выше примера горения в воздухе газа (98 % CH_4 и 2 % N_2) при $n = 1$ материальный баланс будет выглядеть следующим образом:

Поступило, кг:	Получено, кг:
$\text{CH}_4. \dots\dots\dots 0,98 \cdot 16 / 22,4 = 0,7$	$\text{CO}_2. \dots\dots\dots 0,98 \cdot 44 / 22,4 = 1,93$
$\text{O}_2. \dots\dots\dots 1,96 \cdot 32 / 22,4 = 2,8$	$\text{H}_2\text{O}. \dots\dots\dots 1,96 \cdot 18 / 22,4 = 1,57$
$\text{N}_2. \dots\dots\dots (7,37 + 0,02) \cdot 28 / 22,4 = 9,24$	$\text{N}_2. \dots\dots\dots 7,39 \cdot 28 / 22,4 = 9,24$
<hr/>	
Итого. 12,74	Итого 12,74

При составлении материального баланса погрешность не должна превышать 0,5 %.

3.4 Определение температуры горения

Температуру горения различного топлива удобно рассчитывать через общее теплосодержание продуктов сгорания.

Химическая энтальпия продуктов сгорания

$$I_0 = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V_{\text{пр.сг}}}, \quad (21)$$

где I_0 – химическая энтальпия продуктов сгорания, кДж/м³;

$V_{\text{пр.сг}}$ – объем продуктов сгорания, м^3 .

Физическая энтальпия подогретого топлива

$$I_T = \frac{t_T \cdot c_T}{V_{\text{пр.сг}}}, \quad (22)$$

где I_T – физическая энтальпия подогретого топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$;
 t_T – температура подогрева топлива, $^{\circ}\text{C}$;
 c_T – удельная теплоемкость подогретого топлива, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Энтальпия подогретого воздуха

$$I_B = \frac{t_B \cdot c_B \cdot V_B}{V_{\text{пр.сг}}}, \quad (23)$$

где I_B – физическая энтальпия подогретого воздуха, $\text{кДж}/\text{м}^3$;
 t_B – температура подогрева воздуха, $^{\circ}\text{C}$;
 c_B – удельная теплоемкость подогретого воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
 V_B – действительный расход воздуха для сжигания единицы топлива, м^3 .

Таким образом, определение температуры горения топлива осуществляется на основании общего теплосодержания

$$I = I_o + I_B + I_T, \quad (24)$$

где I – общее теплосодержание продуктов сгорания, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

В практике эксплуатации тепловых агрегатов встречается сжигание комбинированного топлива, т.е. состоящего из двух и более видов. Например, на металлургических заводах широко используется коксодоменная смесь, состоящая из доменного и коксового газов, смешанных друг с другом в различных пропорциях в зависимости от требуемой теплоты сгорания.

Ввиду напряженного топливного баланса металлургических заводов с полным циклом в последнее время в коксодоменную смесь добавляют природный газ. Таким образом, получается смесь уже трех видов топлива. Иногда применяют совместное сжигание газообразного и жидкого топлива, например коксодоменной смеси и мазута, природного газа и мазута и т. д.

Во всех случаях расчеты процесса сгорания смесей различного топлива условняются.

3.5 Основные формулы для расчета горения топлива

Выше было написано, что для расчета процессов горения топлива существуют формулы. Однако погрешность расчета при их использовании составляет 2-3 %. Если не требуется определения состава продуктов горения, их вполне можно использовать.

Все формулы, необходимые для расчета горения топлива, сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Основные формулы для расчета горения топлива

Параметр	Жидкое и твердое топливо	Газообразное топливо
Состав смеси	$X_{CM}=X' \cdot a + X'' \cdot (1-a)$	
	$a = \frac{m'}{m' + m''}$	$a = \frac{Q_{H}^{P''} - Q_{H.(CM)}^P}{Q_{H}^{P''} - Q_{H}^{P'}}$
Расход кислорода на горение при $n=1$	$V(O_2) = 0,01 \cdot (1,867 \cdot C^P + 5,6 \cdot H^P + 0,7 \cdot (S^P - O^P))$	$V(O_2) = 0,01 \cdot (0,5 \cdot (CO + H_2 + 3 \cdot H_2S) + \sum (n+m/4) \cdot C_nH_m)$
Расход сухого воздуха	$V_B = n \cdot (1+k) \cdot V(O_2)$, где $k=79/21=3,762$; n – коэффициент расхода воздуха	
Объемы компонентов продуктов сгорания	$V(RO_2) = 0,01 \cdot (1,867 \cdot C^P + 0,7 \cdot S^P)$ $RO_2 = CO_2 + SO_2$ $V(H_2O) = 0,01 \cdot (11,2 \cdot H^P + 1,242 \cdot W^P)$ $V(N_2) = 0,008 \cdot N^P + n \cdot k \cdot V(O_2)$ $V(O_2)' = (n-1) \cdot V(O_2)$	$V(RO_2) = 0,01 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + H_2S + \sum n \cdot C_nH_m)$ $V(H_2O) = 0,01 \cdot (H_2O + H_2 + H_2S + 0,5 \cdot \sum m \cdot C_nH_m)$ $V(N_2) = 0,01 \cdot N_2 + n \cdot k \cdot V(O_2)$ $V(O_2)' = (n-1) \cdot V(O_2)$
Объем продуктов сгорания	$V_{пр.сг} = V(RO_2) + V(H_2O) + V(N_2) + V(O_2)'$	
Калориметрическая температура горения	$t_K = t_K' + \frac{I_0 - I_{K'}'}{I_{K''} - I(t_K')} \cdot (t_K'' - t_K')$	
Энтальпия продуктов сгорания	<p>Истинная</p> $I_0 = \frac{Q_H^P + V_B \cdot C_B \cdot t_B + C_T \cdot t_T}{V_{пр.сг}}$ <p>При температуре t_K'</p> $I(t_K') = \frac{I(RO_2) \cdot V(RO_2) + I(H_2O) \cdot V(H_2O) + I(N_2) \cdot V(N_2) + I(O_2) \cdot V(O_2)'}{V_{пр.сг}}$	

4 Примеры расчетов горения топлива

Пример 1.

Определить расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания, а также калориметрическую температуру горения мазута. Состав мазута, %: $C^P=85,6$, $H^P=10,5$, $N^P=0,7$, $O^P=0,5$, $S^P=0,7$, $A^P=0$, $W^P=2$. Провести расчет при величине коэффициента избытка воздуха $n=1,15$. Температура подогрева воздуха $t_b=300$ °С.

Решение:

Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания определим, пользуясь табличным методом. Для удобства расчет горения жидкого топлива следует вести на 100 кг горючего. В основу расчета положены реакции полного сгорания отдельных элементов: $C + O_2 = CO_2$; $2H_2 + O_2 = 2H_2O$; $S + O_2 = SO_2$. Результаты расчета занесены в таблицу 5.

Для определения калориметрической температуры необходимо знать теплоту сгорания топлива. Для жидкого топлива ее можно определить по формуле (15)

$$Q_H^P = 339 \cdot 85,6 + 1256 \cdot 10,5 - 109(0,5 - 0,7) - 25 \cdot (9 \cdot 10,5 + 2) = 39815,7 \text{ кДж/кг.}$$

Определим энтальпию продуктов сгорания при условии, что воздух подогреет до 300 °С:

$$I_0 = \frac{39815,7 + 11,9735 \cdot 1,344 \cdot 300}{12,595} = 3544,53 \text{ кДж/м}^3.$$

Задаемся возможной температурой горения $t_k = 1800$ °С. Для этой температуры энтальпия продуктов сгорания (приложение В) будет равна

$CO_2 + SO_2$	$(0,1268+0,0004) \cdot 4360,67=554,68$
H_2O	$0,0954 \cdot 3429,9=327,21$
O_2	$0,259 \cdot 2800,48=725,32$
N_2	$0,7515 \cdot 2646,74=1989,03$

Итого 3596,24 кДж/м³.

Поскольку $I_0 < I_{1800}$ °С, то действительная калориметрическая температура будет ниже 1800 °С.

Примем $t_k = 1700$ °С, тогда энтальпия составит

$CO_2 + SO_2$	$(0,1268+0,0004) \cdot 4087,1=519,88$
H_2O	$0,0954 \cdot 3203,05=305,57$
O_2	$0,259 \cdot 2632,09=681,71$
N_2	$0,7515 \cdot 2486,28=1868,44$

Итого 3375,6 кДж/м³.

Таблица 5 – Форма таблицы для записи результатов определения расхода воздуха, количества и состава продуктов сгорания

Участвуют в горении					Газообразные продукты, образующиеся при горении										
Топливо				Воздух				CO ₂ , кмоль	H ₂ O, кмоль	SO ₂ , кмоль	O ₂ , кмоль	N ₂ , кмоль	всего		
Составляющие	Содержание	Масса, кг	Молекулярная масса, г/моль	Количество, кмоль	O ₂ , кмоль	N ₂ , кмоль	всего								
							кмоль						м ³	кмоль	м ³
C	85,6	85,6	12	7,13	7,13						36,72				
H	10,5	10,5	2	5,25	2,625						(из				
S	0,7	0,7	32	0,022	0,022					0,022	воз-				
O	0,5	0,5	32	0,016	-0,016					-	духа)				
N	0,7	0,7	28	0,025	-	9,761·3,762				-	0,025		49,238·22,4		
W	2,0	2,0	18	0,111	-		9,761+36,72	46,481·22,4		0,111	-				
Суммарное значение:															
при n=1					9,761	36,72	46,481	1041,17	7,13	5,361	0,022	-	36,745	49,258	1103,4
(%)					(21)	(79)	(100)		(14,48)	(10,89)	(0,045)		(74,58)	(100)	
при n=1,15					11,22	42,23	53,45	1197,35	7,13	5,361	0,022	1,459	42,255	56,227	1259,5
(%)					(21)	(79)	(100)		(12,68)	(9,54)	(0,04)	(2,59)	(75,15)	(100)	

Поскольку $I_{1700} \cdot C < I_0$, действительная калориметрическая температура лежит в пределах 1700 – 1800 °С. Калориметрическую температуру горения определяют интерполяцией по формуле

$$t_k = t_1 + \frac{I - I_1}{I_2 - I_1} \cdot (t_2 - t_1),$$

где t_k – калориметрическая температура горения, °С,

$$t_k = 1700 + \frac{3544,53 - 3375,6}{3596,24 - 3375,6} \cdot (1800 - 1700) = 1777 \text{ °С.}$$

Пример 2.

Для случая сжигания смешанного газа с теплотой сгорания 21 МДж/м³ определить расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания, калориметрическую температуру горения при коэффициенте расхода (избытка) воздуха $n=1,12$. Температура подогрева воздуха 380 °С. Температура подогрева топлива 200 °С. Составить материальный баланс процесса горения.

Состав топлива А, %: CO₂=15, CO=16, H₂=39, CH₄=24, C₂H₄=3, N₂=3. Влажность топлива А: W_А=31 г/м³.

Состав топлива Б, %: CH₄=93,2, C₂H₄=0,3, C₂H₆=0,4, C₃H₈=0,6, C₄H₁₀=0,6, N₂=4,9. Влажность топлива Б: W_Б=4,5 г/м³.

Решение:

Выполним пересчет каждого топлива с сухой массы на влажную, используя формулы (11) и (12)

Для топлива А

$$\text{CO}_2^{\text{вл}} = 15 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 14,44\%;$$

$$\text{CO}^{\text{вл}} = 16 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 15,41\%;$$

$$\text{H}_2^{\text{вл}} = 39 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 37,56\%;$$

$$\text{CH}_4^{\text{вл}} = 24 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 23,11\%;$$

$$\text{C}_2\text{H}_4^{\text{вл}} = 3 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 2,89\%;$$

$$\text{N}_2^{\text{вл}} = 3 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 2,89\%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,1242 \cdot 31 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 31} = 3,70\%.$$

Проверяем правильность расчета, складывая все компоненты топлива А:

$$\sum X^{\text{вл}} = 14,44 + 15,41 + 37,56 + 23,11 + 2,89 + 2,89 + 3,70 = 100 \%$$

Для топлива Б

$$\text{CH}_4^{\text{вл}} = 93,2 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 92,679 \%$$

$$\text{C}_2\text{H}_4^{\text{вл}} = 0,3 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 0,298 \%$$

$$\text{C}_2\text{H}_6^{\text{вл}} = 0,4 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 0,398 \%$$

$$\text{C}_3\text{H}_8^{\text{вл}} = 0,6 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 0,597 \%$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10}^{\text{вл}} = 0,6 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 0,597 \%$$

$$\text{N}_2^{\text{вл}} = 4,9 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 4,874 \%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,1242 \cdot 4,5 \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 4,5} = 0,557 \%$$

Проверяем правильность расчета, складывая все компоненты топлива Б:

$$\sum X^{\text{вл}} = 92,679 + 0,298 + 0,398 + 0,597 + 0,597 + 4,874 + 0,557 = 100 \%$$

Определяем теплоту сгорания каждого топлива по формуле (16).

Теплота сгорания топлива А

$$Q_{\text{н(А)}}^{\text{р}} = 127 \cdot 15,41 + 108 \cdot 37,56 + 358 \cdot 23,11 + 590 \cdot 2,89 = 15992 \text{ кДж/м}^3$$

Теплота сгорания топлива Б

$$Q_{\text{н(Б)}}^{\text{р}} = 358 \cdot 92,679 + 590 \cdot 0,298 + 635 \cdot 0,398 + 913 \cdot 0,597 + 1185 \cdot 0,597 = 34860 \text{ кДж/м}^3$$

Определяем состав смеси двух топлив. Для этого необходимо определить долю топлива А в смеси газообразных топлив из выражения таблицы 4

$$a = \frac{Q_{\text{н(Б)}}^{\text{р}} - Q_{\text{н(см)}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н(Б)}}^{\text{р}} - Q_{\text{н(А)}}^{\text{р}}}$$

где a – доля топлива А в смеси двух топлив;

$Q_{\text{н(А)}}^{\text{р}}$, $Q_{\text{н(Б)}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания соответственно топлива Б и топлива А, кДж/м³;

$Q_{\text{н(см)}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания смеси топлив, кДж/м³,

$$a = \frac{34860 - 21000}{34860 - 15992} = 0,73$$

Состав смеси определяется по формуле, указанной в таблице 4,

$$X^{\text{вл(см)}} = X^{\text{вл(А)}} \cdot a + X^{\text{вл(Б)}} \cdot (1-a),$$

где $X^{\text{вл(см)}}$, $X^{\text{вл(А)}}$, $X^{\text{вл(Б)}}$ – содержание компонента в смеси топлив и в топливах А и Б соответственно, %.

Тогда с учетом формулы состав смеси топлив будет следующий

$$\text{CO}_2^{\text{см}} = 14,44 \cdot 0,73 + 0 = 10,54 \text{ \%};$$

$$\text{CO}^{\text{см}} = 15,41 \cdot 0,73 + 0 = 11,25 \text{ \%};$$

$$\text{H}_2^{\text{см}} = 37,56 \cdot 0,73 + 0 = 27,42 \text{ \%};$$

$$\text{CH}_4^{\text{см}} = 23,11 \cdot 0,73 + 92,679 \cdot (1-0,73) = 41,89 \text{ \%};$$

$$\text{C}_2\text{H}_4^{\text{см}} = 2,89 \cdot 0,73 + 0,298 \cdot 0,27 = 2,19 \text{ \%};$$

$$\text{C}_2\text{H}_6^{\text{см}} = 0 + 0,398 \cdot 0,27 = 0,11 \text{ \%};$$

$$\text{C}_3\text{H}_8^{\text{см}} = 0 + 0,597 \cdot 0,27 = 0,16 \text{ \%};$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10}^{\text{см}} = 0 + 0,597 \cdot 0,27 = 0,16 \text{ \%};$$

$$\text{N}_2^{\text{см}} = 2,89 \cdot 0,73 + 4,874 \cdot 0,27 = 3,43 \text{ \%};$$

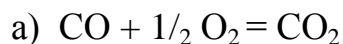
$$\text{H}_2\text{O}^{\text{см}} = 3,70 \cdot 0,73 + 0,557 \cdot 0,27 = 2,85 \text{ \%}.$$

Проверяем правильность расчета, складывая все компоненты смеси топлив

$$\sum X^{\text{см}} = 10,54 + 11,25 + 27,42 + 41,89 + 2,19 + 0,11 + 0,16 + 0,16 + 3,43 + 2,85 = 100 \text{ \%}.$$

Определяем расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания. Расчет ведем на 100 м^3 смеси топлив.

Составляем реакции горения горючих компонентов смеси топлив и на их основе определяем количество требуемого для горения кислорода, а также количество образующихся продуктов сгорания.

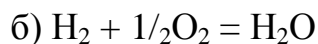


$$1 \text{ м}^3 \text{CO} - 0,5 \text{ м}^3 \text{O}_2$$

$$11,25 \text{ м}^3 \text{CO} - 5,625 \text{ м}^3 \text{O}_2;$$

$$1 \text{ м}^3 \text{CO} - 1 \text{ м}^3 \text{CO}_2$$

$$11,25 \text{ м}^3 \text{CO} - 11,25 \text{ м}^3 \text{CO}_2.$$

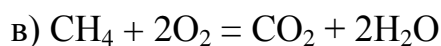


$$1 \text{ м}^3 \text{H}_2 - 0,5 \text{ м}^3 \text{O}_2$$

$$27,42 \text{ м}^3 \text{H}_2 - 13,71 \text{ м}^3 \text{O}_2;$$

$$1 \text{ м}^3 \text{H}_2 - 1 \text{ м}^3 \text{H}_2\text{O}$$

$$27,42 \text{ м}^3 \text{H}_2 - 27,42 \text{ м}^3 \text{H}_2\text{O}.$$

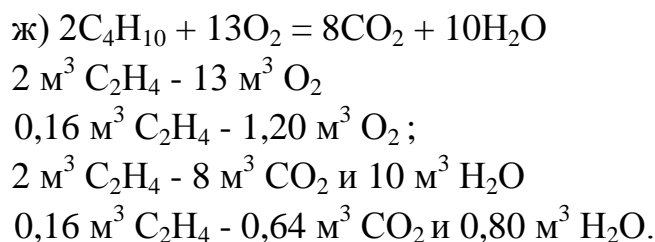
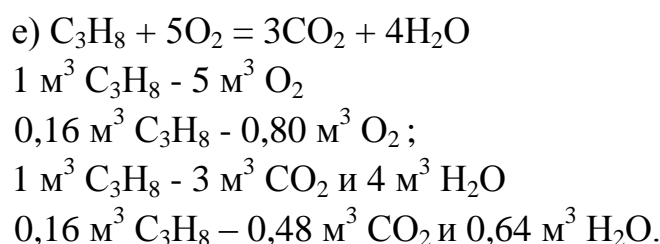
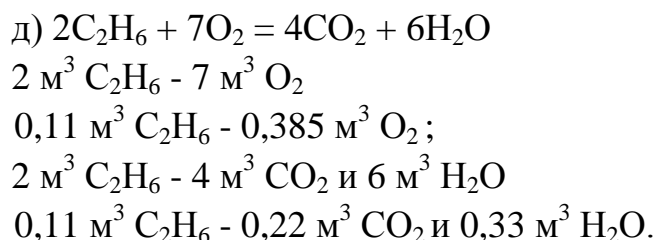
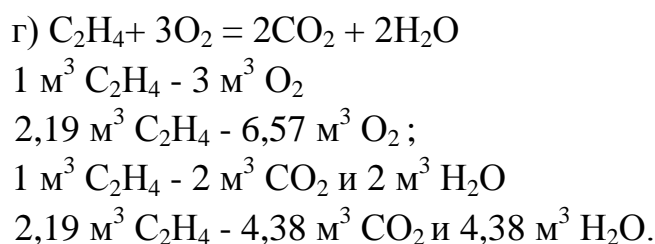


$$1 \text{ м}^3 \text{CH}_4 - 2 \text{ м}^3 \text{O}_2$$

$$41,89 \text{ м}^3 \text{CH}_4 - 83,78 \text{ м}^3 \text{O}_2;$$

$$1 \text{ м}^3 \text{CH}_4 - 1 \text{ м}^3 \text{CO}_2 \text{ и } 2 \text{ м}^3 \text{H}_2\text{O}$$

$$41,89 \text{ м}^3 \text{CH}_4 - 41,89 \text{ м}^3 \text{CO}_2 \text{ и } 83,78 \text{ м}^3 \text{H}_2\text{O}.$$



Полученные данные заносим в таблицу 5.

Для определения количества воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха, необходимо воспользоваться выражением (19).

Для определения состава продуктов сгорания, воспользуемся формулой

$$\varpi_{i(\text{пр.ср.})} = \frac{V_{i(\text{пр.ср.})}}{V_{\text{пр.ср.}}} \cdot 100\% ,$$

где $\varpi_{i(\text{пр.ср.})}$ – содержание i -того компонента в продуктах сгорания, %

$V_{i(\text{пр.ср.})}$ – объем i -того компонента в продуктах сгорания, м^3 ;

$V_{\text{пр.ср.}}$ – общий объем продуктов сгорания, м^3 .

Таблица 5 – Результаты расчета расхода воздуха, состава и количества продуктов сгорания

Участвуют в горении					Образуется продуктов сгорания, м ³				
Топливо, м ³		Воздух, м ³							
Составляющая	Содержание, м ³	O ₂	N ₂	всего	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	всего
CO ₂	10,54	-	112,07	3,762=421,61	10,54	-	-	3,43+421,61=425,04	
CO	11,25	5,625			11,25	-			
H ₂	27,42	13,71			-	27,42			
CH ₄	41,89	83,78			41,89	83,78			
C ₂ H ₄	2,19	6,57			4,38	4,38			
C ₂ H ₆	0,11	0,385			0,22	0,33			
C ₃ H ₈	0,16	0,80			0,48	0,64			
C ₄ H ₁₀	0,16	1,20			0,64	0,80			
N ₂	3,43	-			-	-			
H ₂ O	2,85	-			-	2,85			
n = 1	100	112,07	421,61	533,68	69,40	120,20	-	425,04	614,64
(%)		(21)	(79)	(100)	(11,3)	(19,6)		(69,1)	(100)
n = 1,12	100	125,52	472,20	597,72	69,40	120,20	13,45	475,63	678,68
(%)		(21)	(79)	(100)	(10,2)	(17,7)	(2,0)	(70,1)	(100)

Таким образом, состав продуктов сгорания составит

$$\text{CO}_2 = \frac{69,40}{678,68} \cdot 100\% = 10,2\% ;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{120,2}{678,68} \cdot 100\% = 17,7\% ;$$

$$\text{O}_2 = \frac{13,45}{678,68} \cdot 100\% = 2,0\% ;$$

$$\text{N}_2 = \frac{475,63}{678,68} \cdot 100\% = 70,1\% .$$

Для проверки правильности расчета составляется материальный баланс. Материальный баланс представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Материальный баланс горения смеси двух топлив

Поступило, кг	Получено, кг
Топливо:	Продукты сгорания:
$\text{CO}_2 = 10,54 \cdot 44 / 22,4 = 20,70$	$\text{CO}_2 = 69,40 \cdot 44 / 22,4 = 136,32$
$\text{CO} = 11,25 \cdot 28 / 22,4 = 14,06$	$\text{H}_2\text{O} = 120,20 \cdot 18 / 22,4 = 96,59$
$\text{H}_2\text{O} = 2,85 \cdot 18 / 22,4 = 2,29$	$\text{N}_2 = 475,63 \cdot 28 / 22,4 = 594,54$
$\text{H}_2 = 27,42 \cdot 2 / 22,4 = 2,45$	$\text{O}_2 = 13,45 \cdot 32 / 22,4 = 19,21$
$\text{CH}_4 = 41,89 \cdot 16 / 22,4 = 29,92$	
$\text{C}_2\text{H}_4 = 2,19 \cdot 28 / 22,4 = 2,74$	
$\text{N}_2 = 3,43 \cdot 28 / 22,4 = 4,29$	
$\text{C}_3\text{H}_8 = 0,16 \cdot 44 / 22,4 = 0,31$	
$\text{C}_2\text{H}_6 = 0,11 \cdot 30 / 22,4 = 0,15$	
$\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,16 \cdot 58 / 22,4 = 0,41$	
Воздух:	
$\text{O}_2 = 125,52 \cdot 32 / 22,4 = 179,31$	
$\text{N}_2 = 472,20 \cdot 28 / 22,4 = 590,25$	
Итого: 846,88 кг.	Итого: 846,66 кг.

Рассчитываем погрешность вычислений $\frac{846,88 - 846,66}{846,88} \cdot 100\% = 0,03\% .$

Т.к. погрешность менее 0,5 %, следовательно, расчет проведен правильно.

Из таблицы 5 следует, что для сжигания 100 м³ смеси топлив необходимо затратить 597,72 м³ воздуха при указанной величине коэффициента избытка воздуха, равной 1,12. При этом образуется продуктов сгорания 678,68 м³. Т.е. для сжигания 1 м³ смеси топлив необходимо затратить 5,98 м³ воздуха и образуется продуктов сгорания 6,79 м³.

Определяем калориметрическую температуру горения. Для этого необхо-

димо найти начальную энтальпию (теплосодержание) 1 м^3 продуктов сгорания по формуле (24).

Количество тепла, получаемое от сжигания топлива в расчете на единицу объема продуктов сгорания, определим из выражения (21)

$$I_0 = \frac{21000}{6,79} = 3092,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Количество тепла, вносимое подогретым воздухом, может быть определено по выражению (23).

Теплоемкость воздуха при температуре 380°C определяем методом интерполяции

$$C_{\text{в}380} = 1,3181 + \frac{380 - 300}{400 - 300} \cdot (1,3302 - 1,3181) = 1,3278 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Тогда количество тепла, вносимое подогретым воздухом,

$$I_{\text{в}} = \frac{380 \cdot 1,3278 \cdot 5,98}{6,79} = 444,4 \text{ кДж/м}^3.$$

Количество тепла, вносимое подогретым топливом, определяем по формуле (22).

Теплоемкость топлива, состоящего из многих компонентов, определяется из выражения

$$c_{\text{т}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \varpi_i,$$

где c_i – теплоемкость i -того компонента топлива при указанной температуре, $\text{кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$;

ϖ_i – доля i -того компонента топлива в смеси.

Теплоемкость компонентов смеси топлив при температуре 200°C (согласно приложению Б):

$$C_{\text{CO}_2}^{200} = 1,8079 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{CO}}^{200} = 1,3105 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{C}_2\text{H}_4}^{200} = 2,328 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{H}_2}^{200} = 1,2979 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{CH}_4}^{200} = 1,7669 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{C}_2\text{H}_6}^{200} = 2,328 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{C}_3\text{H}_8}^{200} = 2,328 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^{200} = 2,328 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$C_{N_2}^{200} = 1,3030 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С});$$

$$C_{H_2O}^{200} = 1,5174 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Теплоемкость топлива

$$C_T = 1,8079 \cdot 0,1054 + 1,3105 \cdot 0,1125 + 1,2979 \cdot 0,2742 + 1,7669 \cdot 0,4189 + 1,3030 \cdot 0,0343 + 1,5174 \cdot 0,0285 + 2,328 \cdot (0,0219 + 0,0011 + 0,0016 + 0,0016) = 1,4115 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Количество тепла, вносимое подогретым топливом,

$$I_T = \frac{200 \cdot 1,4115 \cdot 1}{6,79} = 41,6 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Таким образом, энтальпия продуктов сгорания составит

$$I = 3092,8 + 444,4 + 41,6 = 3578,8 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Далее искомую температуру находим методом подбора. Для этого задаемся возможной температурой горения, например, равной 2200°С , и определяем при этой температуре энтальпию продуктов сгорания с учетом табличных данных и состава продуктов сгорания

CO_2	$0,102 \cdot 5464,20 = 557,3$
H_2O	$0,177 \cdot 4358,83 = 771,5$
O_2	$0,020 \cdot 3487,44 = 69,7$
N_2	$0,701 \cdot 3295,84 = 2310,4$

Итого

$$3708,9 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Сравниваем полученную энтальпию с действительной энтальпией продуктов сгорания. Поскольку $I < I_{2200}$, следовательно, искомая температура горения меньше, чем 2200°С .

Задаемся температурой горения, равной 2100°С . Энтальпия продуктов сгорания при этой температуре

CO_2	$0,102 \cdot 5186,81 = 529,1$
H_2O	$0,177 \cdot 4121,79 = 729,6$
O_2	$0,020 \cdot 3314,85 = 66,3$
N_2	$0,701 \cdot 3131,96 = 2195,5$

Итого

$$3520,5 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Т.к. $I_{2100} < I$, то действительная калориметрическая температура горения лежит в пределах $2100 - 2200^\circ\text{С}$.

Калориметрическая температура горения

$$t_k = 2100 + \frac{3578,8 - 3520,5}{3708,9 - 3520,5} \cdot (2200 - 2100) = 2131^\circ\text{С}.$$

Выполнение домашнего задания/контрольной работы аналогично рассмотренному примеру 2. Варианты задания приведены в приложении А.

Список использованных источников

1 Теплотехника металлургического производства. Т.1. Теоретические основы: Учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. – М.: МИСиС, 2002.

2 Теплотехника металлургического производства. Т.2. Конструкция и работа печей: Учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. – М.: МИСиС, 2002.

3 Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч1. Топливо: учебное пособие. – СПбГТУРП, СПб, 2011.

4 Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч2. Теория горения: учебное пособие. – СПбГТУРП, СПб, 2011.

Приложение А

Варианты заданий

Таблица А1 – Задания по вариантам

№ варианта	Смесь 2-х топлив, А и Б		Влажность исходных топлив, г/м ³		Теплота сгорания смеси, МДж/м ³	Коэффициент избытка воздуха, n	Температура подогрева, °С	
	состав топлива А	состав топлива Б	W _А	W _Б			топлива	воздуха
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	8	35	20	4,5	20	1,05	200	300
2	11	45	21	6	21	1,06	-	310
3	12	26	22	25	10,5	1,07	280	325
4	16	23	25	21	12,5	1,08	270	330
5	20	27	24	30	12	1,09	250	340
6	16	25	26	32	10,5	1,05	250	350
7	22	16	27	17	8,5	1,06	275	360
8	14	41	28	8	27	1,07	-	370
9	1	15	29	19	7	1,08	260	350
10	9	36	30	7	30	1,09	-	360
11	14	38	31	6,5	16,5	1,1	-	350
12	23	17	32	22	9,5	1,12	250	350
13	25	14	18	23	10	1,14	300	340
14	20	27	19	24	8,5	1,05	300	340
15	27	44	20	7,5	22	1,06	300	330
16	14	28	21	10	15	1,07	-	330
17	16	34	22	12	18,5	1,08	-	320
18	21	28	23	9	17,5	1,12	-	290
19	25	39	24	11	20	1,15	-	300
20	26	36	25	6	24	1,17	300	370
21	17	37	26	7,5	15,5	1,12	240	320
22	26	38	27	6,9	24	1,15	260	350
23	5	39	28	6	17	1,07	-	350
24	3	15	14	22	11	1,05	-	400
25	7	28	30	13	30	1,06	-	400
26	9	34	31	4,5	22	1,12	210	380
27	19	33	20	9	16,5	1,09	190	380
28	10	17	5	26	14,5	1,15	-	340
29	18	23	22	24	7	1,25	275	350
30	2	15	23	21	10	1,2	300	350
31	8	39	20	4,5	24	1,16	250	350
32	14	40	20	5	17	1,07	280	350
33	15	35	22	4,5	18	1,08	-	360
34	19	4	23	7,5	19	1,09	-	360
35	16	29	24	8	20	1,1	260	370
36	19	30	25	6,5	16,5	1,12	-	375
37	16	39	26	5,6	14,8	1,15	-	380
38	19	40	27	5,5	14,5	1,07	220	375
39	13	36	28	3,5	17	1,1	240	370
40	13	37	24	4,5	12	1,2	-	400

Продолжение таблицы А1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
41	14	38	29	4	20	1,08	-	390
42	15	9	30	30	10,5	1,06	300	380
43	23	43	31	4,9	28	1,15	-	360
44	24	37	32	5	21	1,16	200	370
45	25	38	33	4,8	22	1,18	-	360
46	26	42	34	4	25	1,08	-	250
47	27	16	35	21	8,5	1,12	275	300
48	22	16	20	22	9,5	1,09	300	340
49	23	16	21	23	10	1,1	300	350
50	24	31	22	12,5	22,5	1,15	200	350
51	25	32	23	15	23,5	1,12	150	360
52	26	33	24	16	24,5	1,14	-	360
53	27	40	25	3,5	28,3	1,15	-	370
54	5	44	26	4	22	1,13	230	375
55	11	36	27	5,2	21	1,1	250	380
56	8	37	28	4,8	19	1,18	-	390
57	11	38	29	6,1	24	1,11	-	390
58	6	16	30	19	11	1,04	320	400
59	12	22	22	20	12,5	1,16	300	350
60	6	35	25	6	25	1,15	-	290

Таблица А2 – Состав топлива

№ состава топлива	Состав сухого топлива в % объёмн.											
	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂ S	N ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	6,3	0,2	38	51	0,5	-	-	-	-	-	-	4
2	3	0,3	18	56	18	0,7	-	-	-	-	-	4
3	-	-	3	12	58	27	-	-	-	-	-	-
4	0,4	-	-	-	96,3	0,3	-	-	-	-	-	3
5	15	0,2	27	46	8	0,8	-	-	-	-	-	3
6	3	1	7	58	25	2	-	-	-	-	-	4
7	20,3	0,2	34	39	3	0,5	-	-	-	-	-	3
8	10	1	20	34	25	-	3	-	-	-	-	7
9	13	-	9	9	54	7	-	-	-	-	-	8
10	-	-	-	-	98	-	-	-	-	-	-	2
11	2,3	0,8	6,8	57	22,3	2,7	-	-	-	-	0,4	10,1
12	7	0,2	28	13	2,5	0,3	-	-	-	-	-	49
13	6	-	27	13	0,6	-	-	-	-	-	-	53,4
14	12	-	27	8	1,8	-	-	-	-	-	-	51,2
15	1	-	32,5	0,5	-	-	-	-	-	-	-	66
16	10,5	-	28	2,4	0,3	-	-	-	-	-	0,3	58,5
17	13,1	-	13,1	-	-	-	-	-	-	-	-	73,8
18	14,5	0,2	8,8	2,3	0,2	-	-	-	-	-	-	74
19	4,8	1,4	4,9	11,6	2	-	-	-	-	-	-	75,3
20	5,5	0,2	27,5	13,5	0,5	-	-	-	-	-	-	52,6
21	7	0,2	25,5	15,5	2,6	0,4	-	-	-	-	0,2	48,7
22	2,1	0,4	8,7	50,5	28,2	5,6	-	-	-	-	0,1	4,5

Продолжение таблицы А2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
23	2,1	0,4	8,7	50,5	28,2	-	-	5,6	-	-	-	4,5
24	3	1	6	56	22	2	-	-	-	-	-	10
25	3	1	6	56	22	-	-	2,0	-	-	-	10
26	2,9	0,5	7	58	26,7	2,4	-	-	-	-	-	2,5
27	2,9	0,5	7	58	26,7	-	-	2,4	-	-	-	2,5
28	1	-	-	-	30	1,4	13	14,3	6,3	3,3	0,7	30
29	0,1	-	-	-	39,5	1,4	20	18,5	7,7	2,8	-	10
30	1,5	-	-	-	57,5	-	15	11	8	4	-	3
31	0,2	-	-	-	42,7	-	20	19,5	9,5	2,9	-	5,2
32	0,1	-	-	-	40	-	19,5	18	7,5	3,8	-	11
33	1	-	-	-	23,7	-	12	10	2,8	1,5	2	47
34	0,4	-	-	-	91,4	1,4	1,2	1,7	2,1	-	-	1,8
35	-	0,5	-	-	92,2	0,8	0,5	0,5	-	-	0,3	5,2
36	-	-	-	-	92,2	-	0,8	-	1	-	-	6
37	0,2	-	-	-	77,8	-	4,4	1,7	0,8	-	1	14
38	7,3	-	-	-	86,5	-	3	0,9	0,1	-	-	2,2
39	0,2	-	-	-	98	-	-	-	-	-	-	1,8
40	0,3	-	-	-	88	-	1,9	0,2	0,3	-	-	9,3
41	0,2	-	-	-	97,8	-	0,4	-	0,3	-	-	1,3
42	0,2	-	-	-	83,5	-	4,3	0,8	1,6	-	-	9,6
43	0,1	-	-	-	96,8	1	0,5	0,2	0,1	-	-	1,3
44	-	-	-	-	89,9	-	3,6	0,9	0,4	-	-	5,2
45	0,1	-	-	-	92,6	-	4,2	0,9	0,8	-	-	1,4

Приложение Б
Средние теплоемкости для воздуха и газов, кДж/м³·°С

Темпе- ратура, °С	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Воздух сухой	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₄
0	1,6204	1,3327	1,3076	1,4914	1,3069	1,3021	1,277	1,5156	1,5558	1,7669
100	1,7290	1,3013	1,3193	1,5019	1,3054	1,3021	1,2896	1,5407	1,6539	2,106
200	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097	1,3105	1,2979	1,5742	1,7669	2,328
300	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181	1,3231	1,3021	1,6077	1,8925	2,5289
400	1,9436	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302	1,3315	1,3021	1,6454	2,0223	2,7215
500	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3446	1,344	1,3065	1,6832	2,1437	2,8932
600	2,0592	1,3419	1,4152	1,6073	1,3583	1,3607	1,3105	1,7208	2,2693	3,0481
700	2,1072	1,3553	1,437	1,6385	1,3726	1,3733	1,3147	1,7585	2,3324	3,1905
800	2,1617	1,3583	1,4529	1,6501	1,3821	1,3901	1,3189	1,7962	2,4954	3,3412
900	2,1916	1,3817	1,4663	1,6865	1,3998	1,4026	1,323	1,8297	1,5969	3,4501
1000	2,2260	1,3938	1,4801	1,7132	1,4118	1,4152	1,3273	1,8632	2,6961	3,5073
1100	2,5993	1,4056	1,4935	1,7392	1,4236	1,4278	1,3356	1,8925	2,7843	
1200	2,2886	1,4065	1,5065	1,7657	1,4347	1,4408	1,3446	1,9218	2,8723	
1300	2,3158	1,429	1,5123	1,7908	1,4453	1,4487	1,3524	1,9469		
1400	2,3405	1,4374	1,522	1,8151	1,4551	1,4613	1,3608	1,9721		
1500	2,3636	1,447	1,5312	1,8389	1,4642	1,4696	1,3691	1,9972		
1600	2,3849	1,4554	1,5401	1,8619	1,478	1,478	1,3785			
1700	2,4042	1,4625	1,5483	1,8841	1,4809	1,4864	1,3559			
1800	2,4226	1,4705	1,5559	1,9055	1,4889	1,4947	1,3942			
1900	2,4393	1,4708	1,5638	1,9252	1,496	1,489	1,3983			
2000	2,4552	1,4851	1,5714	1,9449	1,5031	1,5073	1,4067			
2100	2,4699	1,4914	1,5743	1,9638	1,5094	1,5115	1,4151			
2200	2,4837	1,4981	1,5351	1,9813	1,5174	1,5198	1,4235			
2300	2,4971	1,5031	1,5923	1,9984	1,5221	1,5241	1,4316			

Приложение В
Энтальпия 1 м³ воздуха и газов при различных температурах
и постоянном давлении

Температура, °С	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	Воздух сухой
	кДж/м ³				
1000	2226,75	1713,32	1480,11	1393,86	1411,86
1100	2485,34	1913,67	1641,02	1546,14	1565,94
1200	2746,44	2118,78	1802,76	1699,76	1721,36
1300	3010,58	2328,01	1966,05	1857,74	1879,27
1400	3276,75	2504,25	2129,93	2012,36	2036,8
1500	3545,34	2758,39	2296,78	2170,55	2196,19
1600	3818,86	2979,13	2463,97	2328,65	2356,68
1700	4087,1	3203,05	2632,09	2486,28	2517,6
1800	4360,67	3429,9	2800,48	2646,74	2680,01
1900	4634,76	3657,85	2971,3	2808,22	2841,43
2000	4919,51	3889,72	3142,76	2976,25	3006,26
2100	5186,81	4121,79	3314,85	3131,96	3169,77
2200	5464,2	4358,83	3487,44	3295,84	3338,21
2300	5446,39	4483,34	3662,33	3457,2	3500,54
2400	6023,25	4724,37	3837,64	3620,58	3635,6
2500	6303,53	5076,74	4014,29	3786,09	3835,29

КУНИЦИНА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания
для выполнения домашнего задания/контрольной работы
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направлений подготовки
18.03.01 «Химическая технология», 22.03.02 «Металлургия»,
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
всех форм обучения

Подписано в печать 21.11.2018 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 114	Печать цифровая Тираж 50 экз.	Уч.-изд.л. 3

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

Е-mail: nfmisis@yandex.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.

