

Топливо и его сжигание

Теоретическое занятие

Специальность: 13.02.02. Теплоснабжение и теплотехническое оборудование

МДК 01.01. Котельные установки

Тема 1.1. Топливо и его сжигание

Преподаватель: Подбережная Н.Д.

Топливо и его сжигание

Котельными установками называются устройства, предназначенные для производства пара заданных параметров из поступившей в установку смеси конденсата и химически очищенной воды. Различают следующие типы котельных установок:

- 1) отопительные;
- 2) производственно-отопительные;
- 3) энергетические.

Котельная установка состоит из котельного агрегата и вспомогательных устройств и механизмов. К механизмам относятся дымососы, вентиляторы и насосы, к вспомогательным устройствам – теплообменные аппараты, водоподготовительные и топливоподготовительные установки.¹

Назначением любого устройства для сжигания топлива является превращение химической энергии топлива в тепловую энергию продуктов сгорания, которая, в свою очередь, либо передаётся другим рабочим телам (вода, пар), либо преобразуется в механическую энергию (газовая турбина, реактивный двигатель). Преобразование внутренней энергии топлива в тепловую энергию происходит в результате его сжигания.

Энергетическим топливом называют горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения в промышленных целях больших количеств энергии.

По способу получения различают природные (натуральные) и искусственные виды топлива.

К природным видам топливам относятся торф, бурые и каменные угли, антрацит, горючие сланцы, нефть и природный газ.

Искусственное топливо получают из природного топлива в процессе переработки. В результате термической переработки нефти получают бензин, керосин, соляровое масло, дизельное топливо, мазут. Из твёрдого топлива физико-

¹Володин Г. И. Оператор котельной. Учебное пособие для СПО. - СПб.: Лань, 2022.

механическим обогащением или термическим разложением получают кокс, полукокс, топливные брикеты, различные горючие газы пиролиза. К искусственным видам топлива также относятся различные газы: доменный, генераторный, коксовый, сжиженный и др.

По агрегатному состоянию различают твёрдые, жидкие и газообразные виды топлива.

Согласно современной теории, твёрдые горючие ископаемые (за исключением сланцев), т.е. торф, бурые и каменные угли, антрациты,

образовались в результате длительного процесса разложения органической массы растений.

Естественное жидкое топливо – сырая нефть – представляет собой смесь органических соединений, в основном различных углеводородов (метанового – C_nH_{2n+2} , нафтенового – C_nH_{2n} , ароматического – C_nH_{2n-6} классов), а также включает в себя некоторое количество жидких кислородсодержащих, сернистых и азотистых соединений, парафин и смолы.

Нефть – вязкая маслянистая жидкость бурого цвета (плотность – от 730 до 1040 кг/м³). Нефть в основном перерабатывается в целях извлечения более лёгких фракций (бензин, керосин, лигроин, газойль). Остающийся после переработки нефти тяжёлый остаток, мазут, используется как энергетическое топливо.

Природный газ представляет собой смесь горючих и негорючих газов, которая может содержать определённое количество водяного пара и механических примесей (пыли и смолы).

Элементный состав топлива

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов, содержащую некоторое количество примесей (воды и пыли). Состав и содержание отдельных газов, входящих в газообразное топливо, сравнительно легко определяются газовым анализом. Поэтому состав газообразного топлива принято выражать в виде объёмных долей отдельных газов ($CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}$,

CO, H₂, CO₂, N₂, O₂ и др.) в процентах к объёму сухого газа в смеси при нормальных условиях (температура 0 °C, давление –760 мм рт.ст.).

Все вещества в составе твёрдого и жидкого топлива находятся в нём в виде сложных высокомолекулярных органических соединений. Состав топлива принято выражать содержанием (в процентах по массе) отдельных химических элементов: углерода (C), водорода (H), серы летучей (S_л), кислорода (O), азота (N), а также золы (A) и влаги (W).

Горючими элементами твёрдого и жидкого топлива являются углерод, водород и сера (органическая и пиритная). В связанном с ними состоянии находятся кислород и азот, которые образуют внутренний балласт топлива. Зола и влага составляют внешний балласт топлива.

Основным горючим элементом твёрдого и жидкого топлива, содержание которого обуславливает выделение основного количества теплоты, является углерод. Он имеет высокую удельную теплоту сгорания (34,1 МДж/кг) и составляет, как правило, от 40 до 70 % (и выше) массы твёрдого топлива и до 90 % массы мазута.

Вторым по значимости элементом в составе твёрдого и жидкого топлива является водород. Водород имеет более высокую удельную теплоту сгорания (120,5 МДж/кг), но его содержание в топливе сравнительно мало (1÷5 % в твёрдых топливах и 10÷11 % в мазуте), поэтому доля водорода в суммарном тепловыделении при горении топлива значительно меньше, чем углерода.

Сера имеет невысокую теплоту сгорания (9,3 МДж/кг), содержится в топливе в небольших количествах (0,3÷3 % в углях и мазуте) и поэтому не представляет ценности как горючий элемент. Сера в топливе содержится в трёх видах: органическая S_о, пиритная (или сульфидная) S_р и сульфатная S_{so4}.

Кислород и азот, связанные с горючими элементами топлива (в виде органических соединений), снижают удельную теплоту его сгорания и образуют внутренний балласт топлива. Азот, будучи инертным газом, тем не менее, при высоких температурах образует в соединении с кислородом высокотоксичные оксиды NO_x.²

²Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО

Наиболее важной теплотехнической характеристикой топлива является теплота сгорания (теплотворная способность), т.е. количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы твёрдого или жидкого (кДж/кг) или единицы объёма газообразного (кДж/м³) топлива.

В зависимости от того, в каком состоянии (жидком или газообразном) находятся в продуктах сгорания водяные пары, различают высшую (Q_v) и низшую (Q_n) теплоту сгорания.

Высшей теплотой сгорания Q_v называют максимальное количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы количества топлива (1 кг – твёрдое или жидкое, 1 м – газообразное) с учётом теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

Во всех практических расчётах в качестве показателя теплотворной способности топлива применяют так называемую низшую теплоту сгорания Q_n . Теплоту сгорания газообразного топлива находят по известному процентному содержанию отдельных горючих компонентов и по теплоте сгорания каждого компонента.

Горение топлива – это реакция, при которой происходит преобразование химической энергии топлива в тепло, т. е. происходит окисление горючих компонентов топлива: углерода С, водорода Н и серы S – для твердых и жидких топлив и углеводородов C_mH_n , монооксида углерода СО, водорода H_2 и сероводорода H_2S – для горючих газов. Процесс горения сопровождается выделением теплоты, света и продуктов горения.

Горение бывает полным и неполным. Полное горение происходит при достаточном количестве кислорода. Нехватка его вызывает неполное сгорание, при котором выделяется меньшее количество тепла, чем при полном, и окись углерода (СО), отравляюще действующая на обслуживающий персонал, образовывается сажа, оседающая на поверхности нагрева котла и увеличивающая потери тепла, что приводит к перерасходу топлива и снижению КПД котла, загрязнению атмосферы. Для полного сжигания топлива воздух подают в топку

с небольшим избытком. Отношение действительно израсходованного объёма воздуха $V^д$ к теоретически необходимому V^0 называется коэффициентом избытка воздуха, который определяется по формуле³:

$$\alpha = V^д / V^0$$

При тепловом расчете паровых и водогрейных котлов определяются теоретические и действительные объёма воздуха и продуктов сгорания. Это производится в следующей последовательности.

Теоретический объём воздуха, необходимого для полного сгорания твёрдого (жидкого) топлива V^0 , м³/кг, определяется по формуле:

$$V^0 = 0,0889 (C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p$$

где C^p , S^p , H^p , O^p - процентное содержание входящих в состав твердого или жидкого топлива компонентов, %.

Теоретический объём воздуха, необходимого для полного сгорания газообразного топлива V^0 , м³/м³, определяется по формуле:

$$V^0 = 0,0476 \cdot (0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum (m + \frac{n}{4}) \cdot C_m H_n - O_2)$$

где m- число атомов углерода;

n- число атомов водорода;

$C_m H_n$ – процентное содержание входящих в состав природного газа углеводородных соединений, %.

При полном сжигании топлива в теоретических условиях образуются продукты сгорания, представляющие собой газовую смесь, состоящую из CO₂, SO₂, N₂, H₂O. Диоксид углерода CO₂ и сернистый ангидрид SO₂ принято объединять и называть сухие трехатомные газы, обозначая через RO₂.

Теоретический объём трёхатомных газов при сжигании твёрдого (жидкого) топлива V_{RO_2} , м³/кг, определяется по формуле:

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^p + 0,375S^p}{100}$$

³Володин Г. И. Оператор котельной: учебное пособие для СПО / Г. И. Володин. — 3-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2022.

Теоретический объем трехатомных газов при сжигании газа $V_{\text{RO}_2}^0$, м³/м³, определяется по формуле:

$$V_{\text{RO}_2}^0 = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} \sum m \cdot C_m \text{H}_n)$$

Теоретический объем азота в продуктах сгорания при сжигании твёрдого (жидкого) топлива $V_{\text{N}_2}^0$, м³/кг, определяется по формуле:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^p}{100}$$

Теоретический объем азота в продуктах сгорания газообразного топлива $V_{\text{N}_2}^0$, м³/м³, определяется по формуле:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + \frac{N_2}{100}$$

Наличие водяных паров в продуктах сгорания обусловлено горением водорода и испарением влаги, содержащейся в топливе, а также влаги, поступающей вместе с воздухом.

Теоретический объем водяных паров при сжигании твёрдого топлива $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$, м³/кг, определяется по формуле:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0$$

Теоретический объем водяных паров при сжигании газа $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$, м³/м³, определяется по формуле:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01(\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m \text{H}_n + 0,124d_{\text{г.тл}}) + 0,0161 \cdot V^0$$

где $d_{\text{г.тл}}$ – влагосодержание твердого топлива, г/м³.

Определяется средний коэффициент избытка воздуха в газоходе $\alpha_{\text{ср}}$ по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}$$

где α' – коэффициент избытка воздуха на входе в газоход;

α'' – коэффициент избытка воздуха на выходе из газохода.

Определяется избыточное количество воздуха для каждого газохода $V_{\text{изб}}^B$, м³/м³ по формуле:

$$V_{\text{изб}}^B = V^0(\alpha_{\text{ср}} - 1)$$

Определяется действительный объем водяных паров для газа $V_{\text{H}_2\text{O}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$, по формуле:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V^0$$

Определяется действительный суммарный объем продуктов сгорания для газа $V_{\text{г}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$, по формуле:

$$V_{\text{г}} = V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V^0$$

Определяется объемная доля трехатомных газов r_{RO_2} по формуле

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}^0}{V_{\text{г}}}$$

Определяется объемная доля водяных паров $r_{\text{H}_2\text{O}}$ по формуле:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{г}}}$$

Определяется суммарная объемная доля $r_{\text{п}}$ по формуле:

$$r_{\text{п}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$$

Количество теплоты, содержащееся в воздухе или продуктах сгорания, называют энтальпией (теплосодержанием). Расчет производится для всего диапазона температур после поверхностей нагрева.

Определение энтальпий воздуха и продуктов сгорания производится в следующей последовательности.

Энтальпия теоретического объема воздуха $H_{\text{в}}^0$ кДж/кг , (кДж/м^3), определяется по формуле

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 \cdot (C\vartheta)_{\text{в}},$$

где $(C\vartheta)_{\text{в}}$ – энтальпия 1м^3 воздуха, кДж/м^3 .

Энтальпия теоретического объема продуктов сгорания $H_{\text{г}}^0$, кДж/кг , (кДж/м^3), определяется по формуле

$$H_r^0 = V_{\text{RO}_2} \cdot (C\vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 \cdot (C\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \cdot (C\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$$

где $(C\vartheta)_{\text{RO}_2}$ – энтальпия 1 м³ трехатомных газов, кДж/м³;

$(C\vartheta)_{\text{N}_2}$ – энтальпия 1 м³ теоретического объема азота, кДж/м³;

$(C\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$ – энтальпия 1 м³ теоретического объема водяных паров, кДж/м³.

Энтальпия избыточного количества воздуха, $H_{\text{изб}}^B$, кДж/кг, (кДж/м³), определяется по формуле

$$H_{\text{изб}}^B = (\alpha - 1) \cdot H_B^0$$

где α – коэффициент избытка воздуха после газохода.

Энтальпия золы, $H_{\text{зл}}$, кДж/кг, определяется по формуле

$$H_{\text{зл}} = (C\vartheta)_{\text{зл}} \cdot \frac{A^p}{100} \cdot a_{\text{ун}},$$

Энтальпия продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1$, H , кДж/кг, кДж/м³ определяется по формуле⁴

$$H = H_r^0 + H_{\text{изб}}^B + H_{\text{зл}}$$

Тепловой баланс котла

При работе парового или водогрейного котла вся поступившая в него теплота расходуется на выработку полезной теплоты, содержащейся в паре или горячей воде, и на покрытие различных потерь теплоты.

Суммарное количество теплоты, поступившее в котельный агрегат, называют располагаемой теплотой и обозначают Q_{rp} .

Тепловым балансом парового (водогрейного) котла называют равенство располагаемой теплоты сумме полезной теплоты и потерь теплоты, имеющих при работе агрегата.

⁴Кузнецов Н. В., Дубовский И. Е., Митор В. В. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – Москва: Эколит, 2020.

$$Q_{pp}=Q_1+\sum Q_i$$

$$Q_{pp}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5+Q_6$$

где Q_1 – полезная теплота, содержащаяся в паре или горячей воде, кДж/кг или кДж/м³

$\sum Q_i$ – сумма всех потерь теплоты в паровом или водогрейном котле, кДж/кг или кДж/м³

Потери теплоты в паровом или водогрейном котле складываются из потерь теплоты с уходящими газами Q_2 , потерь от химической неполноты горения Q_3 , от механической неполноты горения Q_4 , от наружного охлаждения Q_5 , потерь в виде физической теплоты шлака и потерь на охлаждение панелей и балок Q_6 ⁵

Коэффициент полезного действия котельной установки. Расход топлива.

Коэффициентом полезного действия (КПД) парового или водогрейного котла называется отношение полезной теплоты, пошедшей на выработку пара или нагрев воды, к располагаемой теплоте, поступившей в котел.

Не вся полезная теплота, выработанная агрегатом, направляется потребителям. Часть теплоты расходуется на собственные нужды.

Поэтому различают КПД агрегата брутто и нетто.

Если КПД агрегата определяется по выработанной теплоте, то его называют брутто, а если по отпущенной теплоте, то – нетто. КПД брутто агрегата характеризует степень его технического совершенства, а КПД нетто – его коммерческую экономичность. КПД брутто котла определяется по прямому тепловому балансу и по обратному балансу.

КПД брутто парового котла из уравнения прямого теплового баланса $\eta_{бр}$, %, определяется по формуле

$$\eta_{бр} = \frac{Q_{пг}}{Q_p^p \cdot B_{п.г}} \cdot 100,$$

где $Q_{пг}$ – полезная мощность парового котла, кВт;

Q_p^p – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м³);

⁵Кузнецов Н. В., Дубовский И. Е., Митор В. В. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – Москва: Эколит, 2020.

$B_{п.г}$ – расход топлива, кг/с ($\text{м}^3/\text{с}$).

КПД брутто парового котла из уравнения обратного теплового баланса $\eta_{бр}$, %, определяется по формуле:

$$\eta_{бр} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

где q_2 – потери теплоты с уходящими газами, %;

q_3 – потери теплоты от химической неполноты сгорания, %;

q_4 – потери теплоты от химической неполноты сгорания, %;

q_5 – потери теплоты от наружного охлаждения, %;

q_6 – потери теплоты в виде физической теплоты шлаков, %.

Полезная мощность парового котла $Q_{пг}$, кВт, определяется по формуле:

$$Q_{пг} = D_{нп} \cdot (h_{нп} - h_{пв}) + 0,01 \cdot p \cdot D_{нп} \cdot (h_{кип} - h_{пв}),$$

где $D_{нп}$ – расход насыщенного пара, кг/с;

$h_{нп}$ – энтальпия насыщенного пара, кДж/кг;

$h_{пв}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг,

p – непрерывная продувка котла, %;

$h_{кип}$ – энтальпия кипящей воды, кДж/кг.

Расход топлива подаваемого в топку парового котла B , кг/с ($\text{м}^3/\text{с}$), определяется по формуле:

$$B = \frac{Q_{пг} \cdot 100}{Q_p^p \cdot \eta_{бр}}$$

При сжигании твердого топлива определяется расчетный расход топлива с учетом потери тепла от механической теплоты горения.

Расчетный расход топлива B_p кг/с, определяется по формуле:

$$B_p = B(1 - \frac{q_4}{100})^6$$

‘Кузнецов Н. В., Дубовский И. Е., Митор В. В. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – Москва: Эколит, 2020.

Список использованной литературы

1. Володин Г. И. Оператор котельной. Учебное пособие для СПО. – СПб.: Лань, 2022. – 252 с.
2. Кузнецов Н. В., Дубовский И. Е., Митор В. В. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: Эколит, 2020. – 296 с.
3. Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. – Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020. – 287 с.