

Лекция 4

4. Горение органического топлива

4.1. Общие понятия теории горения топлива

Топливом называют вещество, выделяющее при определенных условиях большое количество тепловой энергии, которую используют в различных отраслях народного хозяйства для получения водяного пара или горячей воды систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и производства электроэнергии. Топливо бывает горючее и расщепляющееся. Горючее – топливо, которое выделяет теплоту при взаимодействии с окислителем (воздухом), а расщепляющееся (ядерное) – выделяет теплоту в процессе торможения продуктов деления тяжелых ядер химических элементов при взаимодействии их с нейтронами. Горючее топливо делится на органическое и неорганическое.

В теплогенерирующих котельных установках (ТГУ) применяют органическое топливо, которое по агрегатному состоянию делят на твердое, жидкое и газообразное, а по способу получения – на естественное и искусственное. Естественные: уголь, торф, сланцы, древесина, природный газ, попутный газ нефтяных месторождений. Искусственные (синтетические, композиционные): топливные брикеты, торфяной кокс, дизельное и соляровое топливо, мазут (топочный, бытовой), топливные эмульсии и суспензии, доменный, коксовый, сланцевый газ.

Горением называется быстрый процесс экзотермического окисления горючего вещества, сопровождающегося выделением значительного количества тепловой энергии. Особенности процесса горения, отличающие его от родственных процессов окисления: высокая температура; быстротечность по времени; неизотермичность; изменение концентрации компонентов, структуры и формы поверхности реагирования во времени.

По своей природе горение – процесс, протекающий при непрерывном подводе горючего и окислителя в зону горения и отводе газообразных продуктов сгорания. В основе процесса горения лежат экзотермические и эндотермические реакции, которые описываются стехиометрическими уравнениями и принципиальной особенностью которых является их обратимость (принцип Ле-Шателье). Основы теории цепных реакций разработаны Н.Н. Семеновым. Для протекания реакции необходимо перемешивание компонентов на молекулярном уровне, иными словами, необходим процесс массопереноса реагирующих компонентов в зону реакции и продуктов реакции из нее.

Процесс массопереноса осуществляется в турбулентном потоке за счет турбулентной диффузии, а в ламинарном потоке, неподвижной среде и в пограничном слое – за счет молекулярной диффузии, которые при постоянной температуре и давлении описываются законом Фика. Если реакция горения протекает мгновенно, то это явление называется *взрывом*.

В зависимости от фазового состояния реагирующих веществ химические реакции горения делят на:

1) *гомогенные* – протекающие в объеме между компонентами, находящимися в одной фазе (газ и воздух);

2) *гетерогенные* – протекающие на поверхности раздела фаз (уголь или капля мазута и воздух).

4.2. Состав твердого и жидкого топлива

В состав твердого и жидкого топлива входят горючие элементы: углерод С, водород Н, сера S, а также негорючие элементы (внутренний и внешний балласт) – кислород О, азот N, влага W и зола А.

Топливо, которое используется для сжигания, называется рабочим, и перечисленные элементы дают с индексом «Р», т.е. на рабочую массу топлива. Расчеты ведут на 1 кг топлива. Если из топлива удалить влагу, то останется сухая масса. Если у сухой массы удалить золу, то получим горючую массу топлива.

Если выделить из горючей массы топлива летучую и колчеданную серу, то оставшаяся часть органической серы определит органическую массу. Если пробу топлива долго хранить в сухом помещении, то оставшаяся внешняя и гигроскопическая влага дает аналитическую массу топлива.

Углерод С – главная составляющая топлив. При окислении с кислородом образуется углекислый газ CO_2 и 33 МДж теплоты. При недостатке воздуха или плохой тяге образуется окись углерода СО, или *угарный газ*, который без цвета, запаха и вкуса, токсичен, легче воздуха ($\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$), горюч, взрывоопасен. Угарный газ скапливается в «мертвых» зонах газоходов и при взаимодействии с воздухом может произойти взрыв, поэтому в обмуровке не должно быть трещин и неплотностей. На человека действует отравляюще, так как соединяется с гемоглобином крови в 200 раз быстрее, чем кислород воздуха и тем самым блокирует гемоглобин, поэтому в котельной должен быть трехкратный воздухообмен (вентиляция). При содержании в воздухе СО в количестве 0,1 % –

через час происходит легкое отравление, 0,5 % – через 0,5 часа тяжелое отравление, а при 1 % – через 0,5 часа смертельный исход.

Окись углерода может догореть (при $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$), если подвести добавочный воздух.

Водород H – его содержание небольшое, но дает теплоты в четыре раза больше, чем углерод, т.е. 120 МДж.

Сера S встречается в трех видах: органическая и колчеданная, или летучая горючая сера, а также сульфатная негорючая сера. Летучая сера дает 10 МДж теплоты. Сернистые соединения в сочетании с водяными парами вызывают коррозию стальных труб и повышают точку росы уходящих газов. Сернистый газ SO₂ вредно действует на окружающую среду.

Кислород O находится в соединении с горючими элементами топлива, поэтому не способствует выделению химической энергии топлива.

Азот N содержится в топливе в малых количествах, в горении не участвует и переходит в свободном состоянии в продукты сгорания.

Влага W разделяется на внешнюю, попавшую в пласт при добыче, транспортировке, хранении из атмосферного воздуха, и внутреннюю, входящую в состав кристаллогидратов минеральных примесей топлива. Влага отрицательно влияет на качество топлива и работу теплогенератора, так как на ее испарение в топке используется полезная теплота, увеличивается температура точки росы, увеличивается количество дымовых газов, что приводит к перерасходу электроэнергии для их удаления и т.д.

Зола A, или зольность, понятие условное, так как зола в топливе не содержится, а получается при сжигании. Легкоплавкая зола вызывает зашлаковывание котлов и колосниковых решеток, что препятствует доступу воздуха к топливу. Летучая зола – пылевидные фракции, выносимые продуктами сгорания из топки и осаждающиеся в газоходах на трубках котла, экономайзера, воздухоподогревателя, что снижает теплопередачу от топочных газов к воде, уменьшает КПД и увеличивает расход топлива. Для очистки от золы используют обдувку в паровых и дробеочистку в водогрейных и паровых котлах.

Если твердое топливо нагревать без доступа воздуха до 850 °C (сухая перегонка), то из топлива выделяются летучие вещества (углеводороды, сера, водород, кислород, азот, влага) и остается твердый остаток (углерод и зола) – кокс. Количество летучих веществ определяют в процентах к рабочей или

горючей массе топлива и называют *выходом летучих*. Чем больше выход летучих, тем легче воспламеняется топливо и выше его реакционная способность при горении, но необходимо иметь более высокие топки.

4.3. Свойства жидкого топлива

Жидкое топливо получается из нефти методом термической разгонки либо термического крекинга.

В зависимости от температуры получают фракции: бензин (200...225 °С), керосин (140...300 °С), дизельные топлива (190...350 °С), мазутные (более 350 °С). Мазуты для котельных делятся на:

- флотские Ф-5 и Ф-12 – для использования в судовых котлах, газотурбинных установках и двигателях;
- топочные мазуты М-40, М-100 и другие, которые в зависимости от содержания серы делятся на малосернистые ($S < 0,5 \%$), сернистые ($S = 0,5...2 \%$), высокосернистые ($S > 2 \%$);
- топочные печные бытовые (ТПБ).

Физические свойства жидких топлив приведены в табл. 2.8 [5], основные из них:

- теплота сгорания 39...42 МДж/кг;
- относительная плотность – отношение плотности нефтепродукта при 20 °С к плотности дистиллированной воды при 4 °С (0,9...1,02);
- вязкость условная (ВУ) – отношение времени истечения 200 см³ нефтепродукта при определенной (50, 80, 100 °С) температуре ко времени этого же объема дистиллированной воды при 20 °С; для обеспечения перекачки и сжигания топочного мазута (кроме ТПБ) в котлах его подогревают до 70...115 °С, для того чтобы $VУ = 3...6^\circ$;
- температура вспышки (80...110 °С) – когда нагретое топливо выделяет пары, которые в смеси с воздухом могут вспыхнуть при подносе к ним пламени;
- температура застывания (от -10 до + 42 °С) – при которой оно загустевает настолько, что при наклоне пробирки с топливом на 45 ° к горизонту его уровень остается неподвижным в течение 1 мин.

4.4. Состав и свойства газообразного топлива

В газообразном топливе газовых месторождений преобладают метан CH_4 (80...98 %), тяжелые углеводороды (этан, пропан, бутан и т.д.), водород, сероводород, в небольших количествах кислород, азот, углекислый газ и водяные пары. Состав газообразного топлива дается в процентах по объему, а расчеты ведут исходя из единиц объема сухого газа, взятого при нормальных условиях.

При окислении 1 м³ метана образуются углекислый газ, водяные пары и 36 МДж теплоты; этана – 63,8 МДж, пропана – 91,4 МДж, бутана – 120 МДж и т.д.

Природный газ не имеет цвета, запаха, вкуса, легче воздуха (плотность 0,75 кг/м³). Теплота сгорания 33...40 МДж/м³. Природный газ на человека действует удушающе, а смертельная доза – 25 % от объема помещения. *Температура воспламенения* в воздухе – это температура, которую должен иметь газ или газовое топливо, чтобы начался самопроизвольный процесс горения за счет выделения теплоты горящими частицами газа без подвода теплоты извне. Для метана температура воспламенения в воздухе 654...790 °С. При концентрации природного газа более 17 % – он огнеопасен.

Объемное содержание горючего газа в газозудушной смеси, ниже (или выше) которого пламя не может самопроизвольно распространяться в этой смеси при наличии или внесении в нее источника высокой температуры, называется нижним (верхним) пределом воспламенения, или нижним (верхним) пределом взрываемости данного газа. Пределы взрываемости газов в зависимости от объема воздуха помещения приведены в табл. 1.2 [4].

Для того чтобы своевременно обнаружить утечки, горючие газы подвергают *одоризации*, т.е. придают им резкий специфический запах. Газы одорируют после их очистки и осушки перед поступлением в магистральный газопровод в одоризационных установках при помощи одоранта – этилмеркаптана, в количестве 16 г на 1000 м³ природного газа. Одоризация считается эффективной, если наличие газа в воздухе может быть обнаружено при концентрации его, равной 1/5 от нижнего предела взрываемости.

Это значит, что одоризация газа, имеющего нижний предел взрываемости 5 %, будет достаточной, если запах его хорошо ощутим в воздухе помещения при концентрации газа в нем 1 %. Основные требования к одоранту: должен мгновенно растворяться в газах и сгорать, не образуя вредных для человека соединений; не должен взаимодействовать с влагой и вызывать коррозию труб и оборудования.

Основные преимущества и недостатки газообразного топлива перед другими видами топлива:

- преимущества – легко транспортируется, не требует больших затрат физического труда (по сравнению с твердым и жидким топливом), поддается автоматизированному процессу сжигания, не нужны складские помещения для хранения, хорошие санитарные условия на рабочем месте;

- недостатки – взрывоопасен (4...16 % от объема помещения), пожароопасен (при 17 % и более), удушающе действует на человека, трудно обнаружить утечку.

Содержание вредных примесей регламентируется ГОСТ 5542–87:

а) сероводород H_2S – не более 2 г на 100 м³ газа;

б) смола и пыль – не более 0,1 % на 100 м³, так как они приводят к закупоркам и отложениям на стенках труб, а пыль ухудшает процесс горения и приводит к засорению приборов;

в) нафталин – не более 10 г на 100 м³ летом и не более 5 г на 100 м³ газа зимой;

г) аммиак NH_3 – не более 2 г на 100 м³, так как токсичен и коррозионно воздействует на медные сплавы;

д) влага нежелательна, так как увеличивает коррозию труб и арматуры, снижает теплоту сгорания, поэтому газ до подачи осушают специальными поглотителями; относительная влажность газа должна быть не более 60 % при самой низкой температуре в газопроводе.

Сжиженный газ имеет плотность 2,6 кг/м³ (т.е. тяжелее воздуха в 1,5 раза), теплоту сгорания 110...120 МДж/м³, предел взрываемости 1,5...9,5 % от объема помещения (при наличии искры), температуру вспышки 750...850 °С. Зимняя смесь состоит из 75 % пропана и 25 % бутана, летняя – 25 % пропана и 75 % бутана. Одорант (этилмеркаптан) используется в количестве 40 г на 1000 м³ газа, для того чтобы ощутить запах при концентрации 0,5 % от объема помещения.

4.5. Теплота сгорания топлива

Количество теплоты, выделяемое при полном сгорании единицы топлива, называется его теплотворностью, или *теплотой сгорания* и измеряется в кДж/кг или кДж/м³. Теплота сгорания – основной параметр органического топлива,

характеризующий его энергетическую ценность, и для расчетов определяется по [5, табл. 2.1, 2.8, 2.9].

Различают высшую и низшую теплоту сгорания. За высшую теплотворность Q_{P_v} принимают количество теплоты, выделенное 1 кг (или 1 м³) рабочего топлива, причем, считают, что водяные пары, образующиеся от сгорания водорода и испарения влаги топлива, конденсируются. Низшей теплотой сгорания топлива Q_{P_n} называют количество теплоты, выделенное 1 кг (или 1 м³) рабочего топлива, без учета конденсации водяных паров.

В реальных условиях водяные пары уходят в атмосферу, не сконденсировавшись, и поэтому для расчетов используют низшую теплоту сгорания топлива. Теплота Q_{P_n} меньше Q_{P_v} на теплоту парообразования водяных паров (2460 кДж/кг).

Удельная теплота сгорания твердого и жидкого топлива определяется сжиганием 1 г топлива в калориметрической бомбе, заполненной кислородом, которая помещается в сосуд (калориметр) с водой, а приращение температуры воды измеряется метастатическим термометром. Удельная теплота сгорания газообразного топлива определяется в калориметре путем сжигания исследуемого газа в воздушной среде. Расход газа измеряется счетчиком, а выделившаяся при этом теплота передается потоку проточной воды, расход которой определяется взвешиванием, а приращение температуры – термометрами.

Учет запасов разных видов топлива ведут в пересчете на *условное топливо*, теплота сгорания которого принимается равным 29 308 кДж/кг (7000 ккал/кг). Для перевода натурального топлива V_n в условное – V_y , используют тепловой эквивалент $\mathcal{E} = Q_{P_n} / 29308$, и тогда $V_y = V_n \mathcal{E}$.

4.6. Способы сжигания органического топлива

Если за определяющий параметр взять скорость движения воздуха w_v относительно скорости движения частиц топлива v_t , то по этому параметру выделяют четыре технологии сжигания топлива.

1. В плотном фильтрующем слое ($w_v \gg v_t$).

Применяется только для кускового твердого топлива, которое распределяется на колосниковой решетке. Слой топлива продувается воздухом со скоростью, при которой устойчивость слоя не нарушается и процесс горения имеет кислородную и восстановительную зону.

Видимое тепловое напряжение колосниковой решетки составляет $Q_R = 1,1...1,8$ МВт/м².

2. В кипящем или псевдооживленном слое ($w_b > v_T$).

При увеличении скорости воздуха динамический напор может достигнуть, а затем и превысить гравитационную силу частиц. Устойчивость слоя нарушится и начнется беспорядочное движение частиц, которые будут подниматься над решеткой, а затем совершать возвратно-поступательное движение вверх и вниз. Скорость потока, при которой нарушается устойчивость слоя, называется критической.

Увеличение ее возможно до скорости витания частиц, когда они выносятся потоком газов из слоя.

Значительная часть воздуха проходит через кипящий слой в виде «пузырей» (газовых объемов), сильно перемешивающих мелкозернистый материал слоя, в результате процесс горения по высоте протекает практически при постоянной температуре, что обеспечивает полноту выгорания топлива.

Для кипящего псевдооживленного слоя характерна скорость воздуха 0,5...4 м/с, размер частиц топлива 3...10 мм, высота слоя не более 0,3...0,5 м. Тепловое напряжение объема топки $Q_V = 3,0...3,5$ МВт/м³.

В кипящий слой вводят негорючий наполнитель: мелкий кварцевый песок, шамотную крошку и др.

Концентрация топлива в слое не превышает 5 %, что позволяет сжигать любое топливо (твердое, жидкое, газообразное, включая горючие отходы). Негорючий наполнитель в кипящем слое может быть активным по отношению к вредным газам, образующимся при горении. Введение наполнителя (известняка, извести или доломита) дает возможность перевести в твердое состояние до 95 % сернистого газа.

3. В потоке воздуха ($w_b \approx v_T$) или факельный прямоточный процесс.

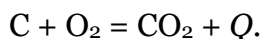
Частицы топлива оказываются взвешенными в газоздушном потоке и начинают перемещаться вместе с ним, сгорая во время движения в пределах топочного объема. Способ отличается слабой интенсивностью, растянутой зоной горения, резкой неизотермичностью; требуется высокая температура среды в зоне воспламенения и тщательная подготовка топлива (распыливание и предварительное перемешивание с воздухом). Тепловое напряжение объема топки $Q_V \approx 0,5$ МВт/м³.

4. Циклонное сжигание топлива ($w_b \leq v_T$). Частица или капля топлива циркулирует по организованному контуру потока столько раз, сколько необходимо для ее полного сгорания. При этом достигается наибольшая скорость сгорания с одновременной интенсификацией массопереноса. Тепловое напряжение объема топки $Q_V \approx 1,3$ МВт/м³.

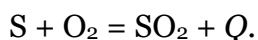
4.7. Расчет горения органического топлива

Расчет сводится к определению количества воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, продуктов горения, а также температуры и энтальпии дымовых газов. Расчет твердого и жидкого топлива ведут по соотношениям масс веществ, участвующих в реакциях, а для газообразного топлива – по объемным соотношениям.

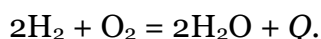
Для полного сжигания 1 кг углерода С требуется 1,866 м³ кислорода O₂, в результате чего образуется 1,866 м³ двуокиси углерода CO₂ и выделяется 34 МДж (34 000 кДж) теплоты:



Для полного сгорания 1 кг серы S требуется 0,7 м³ кислорода O₂, в результате образуется 0,7 м³ сернистого газа SO₂ и выделяется 10,5 МДж теплоты:



Для полного сгорания 1 кг водорода H₂ требуется 5,6 м³ кислорода O₂, образуется 11,2 м³ водяного пара H₂O и выделяется 121,5 МДж теплоты:



Для полного сгорания 1 м³ метана CH₄ требуется 9,52 м³ воздуха V₀, образуется 10,52 м³ дымовых газов, содержащих CO₂ и водяные пары H₂O, и выделяется 36,5 МДж теплоты:



При полном сгорании топлива дымовые газы содержат углекислый газ CO₂, сернистый газ SO₂, азот топлива и воздуха N₂, неиспользованный при горении кислород O₂ воздуха, водяной пар H₂O, полученный за счет окисления водорода топлива, испарения влаги, содержащейся в топливе и внесенной с влажным воздухом и при распылении жидкого топлива (в паромеханических форсунках).

Для полного горения топлива необходимы: достаточное количество воздуха; хорошее перемешивание воздуха с топливом; высокая температура в топке (не менее 700 °С на выходе); достаточное время пребывания топлива и окислителя в топке; постоянный отвод продуктов сгорания из топки.

При неполном сгорании топлива образуются вредные для человека и окружающей среды оксиды азота (NO, NO₂), серы (SO₂), углерода CO (угарный газ), а также сажа, которая осаждается на экранных и конвективных трубах, снижает теплопередачу от топочных газов к теплоносителю, что приводит к уменьшению КПД и перерасходу топлива. Кроме того, сажа может самовозгораться, что приводит к авариям.

Полнота сгорания топлива определяется двумя способами:

1) с помощью газоанализаторов – по показаниям состава уходящих топочных газов оценивается полнота сгорания и избыток воздуха;

2) визуально – по цвету пламени и дыма. При полном сгорании цвет пламени в разогретой топке голубовато-фиолетовый или прозрачно-соломенный, а цвет дыма – бесцветный, прозрачный, невидимый для глаза – летом и светло-серый или белый – зимой. При неполном сгорании цвет пламени оранжево-красный, с темными язычками, непрозрачный, а цвет дыма – серый ближе к темному, непрозрачный.

Энтальпия воздуха и продуктов сгорания зависит от объема, теплоемкости и температуры компонентов горения и вычисляется по формулам, после чего строится график зависимости энтальпии от температуры топочных газов для каждого элемента котла (топки, газоходов, пароперегревателя, экономайзера и т.п.).

Различают теоретическую (калориметрическую) и действительную температуру горения топлива.

Максимальную температуру, развиваемую при сжигании топлива, называют *жаропроизводительностью* топлива. Теоретическая – это та температура, которую приобрели бы дымовые газы, если бы вся теплота от полного сгорания топлива воспринималась бы только дымовыми газами. Калориметрическую температуру горения определяют из уравнения теплового баланса. В реальных условиях горения топлива действительная температура топочных газов всегда ниже теоретической за счет теплообмена между топочными газами и радиационными поверхностями нагрева, а также различных потерь теплоты в топке (механический, химический недожог и др.).

4.8. Коэффициент избытка воздуха

Для обеспечения полного сгорания топлива в топочное устройство подводят воздуха больше, чем теоретически необходимо. Отношение действительно поступившего количества воздуха V_d к теоретически необходимому V_0 , называется *коэффициентом избытка воздуха* α_t .

Топки паровых и водогрейных котлов, как правило, работают с разрежением 2...3 мм вод. ст., в связи с чем происходит подсос воздуха и в топку и во все элементы котельной установки по ходу газового тракта, вплоть до дымососа. Присосы воздуха для каждого элемента котла определяются по [8] и ориентировочно могут быть приняты:

- 0,05 – для первого конвективного пучка (газохода), фестона (с камерой догорания), пароперегревателя, воздухоподогревателя;
- 0,1 – для второго конвективного пучка (газохода), конвективной шахты, чугунного и стального экономайзера с обшивкой;
- 0,15...0,2 – для чугунного экономайзера без обшивки.

Поэтому коэффициент избытка воздуха в уходящих топочных газах – α_{yx} больше чем в топке, на суммарное значение присосов воздуха $\Sigma\Delta\alpha$ и составляет:

$$\alpha_{yx} = \alpha_t + \Sigma\Delta\alpha.$$

Разрежение в топке замеряется тягонапорометром ТНЖ. При разрежении менее 1 мм вод. ст. топочные газы могут выбиваться в помещение котельной, что недопустимо по технике безопасности. При разрежении более 8 мм вод. ст. будет происходить значительный подсос холодного наружного воздуха, что приведет к снижению температуры топочных газов, увеличению потерь теплоты, снижению КПД и др.