

Горение топлива

Горение – процесс интенсивного окисления вещества, сложный физико-химический процесс, включающий ряд последовательно и параллельно протекающих физических и химических стадий.

Основа всех процессов горения – самоускоряющиеся реакции окисления горючих веществ. Результат такого окисления – продукты сгорания – новые вещества с иными физико-механическими свойствами.

Признаки горения:

- интенсивное выделение теплоты;
- резкое повышение температуры.

Горение бывает:

- полное (все вещества окисляются до оксидов, потерь теплоты нет);
- неполное.

Реальное горение, как правило, неполное.

При этом любой тип горения невозможен без топлива. Различают твердое, жидкое и газообразное топливо, но вне зависимости от агрегатного состояния принято считать, что любое органическое топливо состоит из:

- Углерода C^p
- Водорода H^p
- Кислорода O^p
- Азота N^p
- Летучей серы $S_{\text{л}}^p$
- Зола (только твердое и жидкое топливо) A^p
- Влаг (только твердое и жидкое топливо) W^p

Топливо, в том виде, в котором оно сжигается в камере сгорания, называется *рабочим*. Для него записывают уравнение элементарного состава, индекс p указывает на то, что элемент содержится в рабочем топливе:

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

Основными элементами топлива, отвечающими за тепловыделение, являются *углерод и водород*. Сера, содержащаяся в топливе, также является горючим элементом, но если ее содержание в топливе мало, то при расчете



она не учитывается, т.к. имеет невысокую теплоту сгорания. Балластом называются негорючие элементы в топливе. К таким относятся азот и кислород в связанном состоянии, а также зола и влага. Балласт при расчетах необходимо учитывать, т.к. он существенно уменьшает тепловыделение единицы массы топлива. Это происходит за счет того, что выделенная теплота начинает тратиться на нагрев твердых негорючих частиц золы, испарение влаги, содержащейся в топливе и в подающемся воздухе и т.д.

Различают пять основных состояний топлива:

- рабочее – содержит влагу и золу в добытом из месторождения количестве и с ними же и используется (уравнение (1)).
- Аналитическое – лабораторная проба рабочего состояния.
- Сухое – топливо, лишенное общей влаги (в уравнении (1) нет W^p).
- Горючее – топливо условно сухое (лишенное общей влаги W^p) и беззольное (нет A^p в уравнении (1)).
- Органическое – топливо без влаги и минеральной массы (в (1) нет W^p , A^p , а сера только органическая S_{op}).

Любое состояние топлива может быть пересчитано в какое-либо другое путем исключения или добавления необходимых слагаемых. Для расчетов, как правило, используется рабочее и горючее состояния.

Для любого топлива важной характеристикой является теплотворная способность или удельная теплота сгорания.

Удельная теплота сгорания – это количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы вещества (1 кг, 1 м³, 1 кмоль). Иначе говоря, это энергетическая ценность топлива. Ее величина для конкретного топлива определяется экспериментально (калориметрическая бомба, калориметр Юнкера).

Различают высшую и низшую теплоты сгорания Q_v и Q_n .

Примеры низшей теплоты сгорания:

- древесина $Q_n = 10 - 12$ МДж/кг;
- торф $Q_n = 8.4 - 10.5$ МДж/кг;
- горючие сланцы $Q_n = 5.5 - 13.9$ МДж/кг;
- каменный уголь $Q_n \approx 24$ МДж/кг;
- мазут $Q_n \approx 40$ МДж/кг;
- природный газ $Q_n = 33 - 38$ МДж/кг.



При расчете высшей удельной теплоты учитывают теплоту, выделяющуюся при конденсации водяных паров. Для низшей теплоты полагают, что водяные пары при горении топлива выбрасываются в атмосферу.

Количество теплоты при конденсации пара определяется как произведение скрытой теплоты конденсации пара (2500 кДж/кг) на его массу:

$$Q_{\text{пара}} = 2500 \left(\frac{9H^p}{100} + \frac{W^p}{100} \right),$$

где первое слагаемое – пар, образующийся при горении водорода, второе слагаемое – количество пара, содержащееся в рабочем топливе. Таким образом:

$$Q_v - Q_n = Q_{\text{пара}}.$$

При известном элементарном составе твердого и жидкого топлива низшую удельную теплоту сгорания определяют по формуле Менделеева:

$$Q_n = 0.338C^p + 1.025H^p - 0.108(O^p - S_{\text{л}}^p) - 0.025W^p.$$

Здесь состав топлива указывается в частях. Для сухого газообразного топлива низшую теплоту сгорания определяют по теплотам сгорания отдельных газов, входящих в состав топлива (r_i – объемная доля газа-компонента, 22.4 м^3 – объем 1 моля газа), при нормальных условиях:

$$Q_n = \frac{1}{22.4} \cdot \sum_{i=1}^N r_i Q_i.$$

Здесь нужно отметить, что все расчеты горения топлив проводятся при нормальных условиях: $P = 101325 \text{ Па}$, $T = 273 \text{ К}$.

Связывая удельную теплоту сгорания топлива с его количеством, делают вывод: чем меньше теплота сгорания, тем больше требуется топлива.

Помимо топлива основным компонентом в процессах горения является окислитель, в качестве которого обычно выступает воздух. Для полного сгорания любого топлива необходимо некоторое количество воздуха, называемое теоретическим.

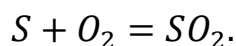
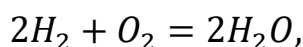
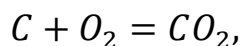
Теоретическое количество воздуха L_0 – количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива либо 1 м^3 газообразного топлива.



Определение теоретического и действительного количества воздуха, а также количества исходных веществ и продуктов сгорания называют составлением материального баланса (для твердого и жидкого топлива на 1 кг, для газообразного на 1 м³ при н.у.).

Материальный баланс

Для этого используют *стехиометрические* соотношения веществ в уравнениях химических реакций, протекающих при горении. Так, например, для твердого и жидкого топлива:



Запишем уравнения в молярных массах:

$$12 + 32 = 44,$$

$$4.032 + 32 = 36.032,$$

$$32.06 + 32 = 64.06.$$

При пересчете на 1 кг получаем, что для полного сгорания углерода необходимо $32/12=2.67$ кг кислорода, для полного сгорания водорода $32/4.032=7.94$ кг кислорода, для полного сгорания серы $32/32.06 \approx 1$ кг кислорода. Учитывая, что в рабочем топливе уже содержится часть кислорода, можно записать следующее:

$$V_{O_2}^0 = 0.01(1.866C^p + 5.55H^p + 0.7S^p - 0.7O^p).$$

Коэффициенты при компонентах – удельные объемы этих компонентов при нормальных условиях. Так, например, для водорода: $22.4/4.032 = 5.55$ м³/кг, где 22.4 – геометрический объем 1 моля любого газа при нормальных условиях. Здесь $V_{O_2}^0$ – удельное теоретическое количество кислорода [м³/кг].

Но так как для окисления используется воздух, а кислорода в нем всего 21% , то выражение переписывается в виде:

$$V^0 = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2}^0 = 0.0889C^p + 0.265H^p + 0.033(S^p - O^p).$$



Иногда полезно знать теоретическое количество воздуха в [кг/кг], для этого необходимо умножить теоретический удельный объем на плотность воздуха при нормальных условиях ρ_B :

$$L_0 = V^0 \cdot \rho_B,$$

$$\rho_B = \frac{P}{RT}.$$

Для газообразного топлива все рассчитывается аналогично, но химических реакций будет существенно больше (в зависимости от состава топлива), кроме того, количество воздуха будет иметь размерность [м³/м³].

В случае, когда состав топлива заранее не известен, а соответственно неизвестны продукты сгорания, то L_0 можно определить приближенно:

$$L_0 = \frac{Q_H}{G_{M_B}},$$

где G_{M_B} – расход воздуха на 1 МДж низшей теплоты сгорания топлива. Для твердых и жидких топлив расход воздуха принимается равным 2.94 кг/МДж, для газообразных топлив 3.8 м³/МДж.

В действительности для обеспечения полноты сгорания топлива воздух необходимо подавать с избытком. В противном случае, при подаче теоретически необходимого количества воздуха, не все топливо его получит ввиду особенностей физического процесса подачи в камеру сгорания и специфики процессов горения.

Число, показывающее, насколько действительное количество воздуха должно быть больше теоретически необходимого, называется **коэффициентом избытка воздуха**:

$$\alpha = \frac{L}{L_0}.$$

Коэффициент избытка воздуха зависит от:

- вида топлива;
- способа сжигания;
- конструкции камер сгорания, топочных устройств и т.д.

Коэффициент избытка воздуха должен принимать оптимальные значения для каждого конкретного вида топлива и оборудования, его сжигающего. При заниженных значениях коэффициента избытка



наблюдается быстрый рост недожога топлива, при завышенных значениях падает температура горения и увеличивается объем продуктов сгорания. И то и другое приводит к увеличению расхода топлива и общему снижению КПД сжигающей установки.

Обычно, на практике, используется два метода определения коэффициента избытка воздуха в зависимости от состава продуктов сгорания:

- по концентрации кислорода;
- по концентрации сухих трехатомных газов.

Записывая действительный расход воздуха через коэффициент избытка воздуха, можно получить следующее:

$$L = L_0 + (\alpha - 1)L_0.$$

Здесь второе слагаемое в правой части – избыточный воздух, т.е. дополнительно введенное количество воздуха. Зная количество избыточного воздуха, можно рассчитать действительные объемы, действительное количество, продуктов сгорания.

Обычно при таких расчетах трехатомные газы, такие как CO_2 и SO_2 для твердых и жидких топлив заменяют совокупным трехатомным газом RO_2 , равным их сумме. Тогда теоретическое количество RO_2 в $[м^3/кг]$ в продуктах сгорания запишется в виде:

$$V_{RO_2} = 0.01(1.866C^p + 0.7S^p).$$

Действительное количество трехатомных газов RO_2 в продуктах сгорания не зависит от избыточного воздуха, поэтому будет равно теоретическому количеству. Так как воздух содержит 21% кислорода, то оставшиеся 79% составит азот. С учетом химических реакций для твердого и жидкого топлива, действительное количество азота запишется в виде:

$$V_{N_2} = 0.79\alpha V^0 + 0.8 \cdot \frac{N^p}{100}.$$

Так как при сгорании топлива в любом случае будет израсходован только теоретически необходимый кислород, то та часть кислорода, которая введена в топливо с избыточным воздухом, перейдет в продукты сгорания:

$$V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)V^0.$$



Количество водяного пара в продуктах сгорания для жидкого и твердого топлива состоит из нескольких компонентов:

- Пар, образующийся при сгорании водорода в топливе $V_{H_2O}^H$
- Пар, образующийся при испарении влаги топлива $V_{H_2O}^W$
- Пар, вносимый с окислителем (воздухом) $V_{H_2O}^B$

Влага, содержащаяся в топливе, определяется экспериментально для каждого вида топлива и обычно делится на гидратную (в составе кристаллогидратов), сорбционную (адсорбирования из среды), капиллярную (содержащаяся в порах топлива) и поверхностную. Такое деление в большей степени условное, т.к. достоверно невозможно определить содержание того или иного типа влаги в топливе. Наличие влаги в топливе всегда ведет к снижению величины низшей теплоты сгорания.

В соответствии с протекающими химическими реакциями и стехиометрическим соотношением, при сгорании 1 моля водорода ($\mu_{H_2} = 2.02$ кг) образуется 1 моль водяного пара, тогда:

$$V_{H_2O}^H = 0.111H^p,$$

$$V_{H_2O}^W = v_{H_2O} \cdot \frac{W^p}{100} = 0.0124W^p,$$

где v_{H_2O} – удельный объем водяных паров, равный $22.4/18$ м³/кг.

Количество водяного пара, вносимое с воздухом, определяются влагосодержанием, которое при нормальных условиях равно: $d = 0.01$ кг/кг, тогда:

$$V_{H_2O}^B = V^0 d \rho_v v_{H_2O} = 0.0161V^0.$$

Если в топку планируется подавать воздух с относительной влажностью, отличной от нормальной, то влагосодержание и плотность должны быть предварительно пересчитаны в соответствии с теорией влажного воздуха.

С учетом избыточного воздуха действительное количество водяного пара запишется в виде:

$$V_{H_2O} = 0.111H^p + 0.0124W^p + 0.0161\alpha V^0.$$

Для перехода к массам продуктов сгорания необходимо определить плотность каждого продукта при нормальных условиях, тогда действительная масса продукта сгорания запишется в виде:

$$m_{\text{продукта}} = V_{\text{продукта}} \rho_{\text{продукта}},$$

$$\rho_{\text{продукта}} = \frac{P\mu}{8314 \cdot T},$$

где μ – молярная масса компонента, 8314 – универсальная газовая постоянная. Например, для CO_2 получим:

$$\rho_{CO_2} = \frac{101325 \cdot (12 + 16 \cdot 2)}{8314 \cdot 273} = 1.964 \text{ кг/м}^3.$$

В действительности любое топливо содержит минеральные примеси. Например, для твердых топлив это, как правило, алюмосиликаты, кремнезем, карбонаты и соли щелочных металлов. Иногда могут присутствовать и редкоземельные элементы в чистом виде. Конкретный состав топлива всегда будет зависеть от месторождения (геологии пласта и т.д.). В связи с этим реальное количество продуктов сгорания всегда будет отличаться от расчетного в большую сторону за счет окисления примесей.

Тепловой баланс

Следующий важный этап при расчете процессов горения – **тепловой баланс**. Составление уравнения теплового баланса способствует пониманию того, из каких компонентов состоит располагаемая теплота, получаемая при сжигании топлива.

Например, для твердого топлива в общем случае уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = Q_H + Q_T + Q_p + Q_{вн},$$

где Q – располагаемая теплота, Q_H – низшая теплота сгорания топлива, Q_T – физическая теплота топлива, Q_p – привнесенная теплота (паровое дутье, паровое распыление), $Q_{вн}$ – внешняя теплота (при внешнем подогреве топлива).

Обычно для большинства твердых топлив $Q = Q_H$.

С другой стороны располагаемая теплота включает теплоту, отданную теплообменным поверхностям (Q_1), теплоту (Q_d), затраченную на диссоциацию, и энтальпию топлива:

$$Q = i_T + Q_1 + Q_d.$$



Энтальпия топлива обычно складывается из энтальпий продуктов сгорания, энтальпии избыточного воздуха и золы. Энтальпия продуктов сгорания может быть определена с учетом их теплоемкостей и массовых долей:

$$i_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^N c_{P_i} g_i T,$$

где T – температура, при которой производится расчет энтальпии и для которой подобраны теплоемкости продуктов сгорания. При этом считается, что топливо сгорает полностью.

Одним из результатов составления теплового баланса является определение температуры горения топлива. В общем случае ее можно получить, считая, что располагаемая теплота – это полная энтальпия процесса горения:

$$t_r = \frac{Q_{\text{н}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{р}} + Q_{\text{вн}} - i_{\text{т}} - Q_1 - Q_{\text{д}}}{\sum_{i=1}^N c_{P_i} g_i}.$$

Так как чаще всего в расчетах твердых топлив $Q = Q_{\text{н}}$ и известны теплоемкости продуктов сгорания для конкретных температур, то температуру горения топлива можно отыскать приближенно: интерполируя значения энтальпий.

Например, пусть известны энтальпии продуктов сгорания i_1 и i_2 при температурах t_1 и t_2 соответственно. Если известно, что искомая температура горения t_r лежит в интервале температур $(t_1; t_2)$, то:

$$t_r = t_1 + \frac{Q - i_1}{i_2 - i_1} (t_2 - t_1).$$

Этот метод аналогичен графическому методу поиска температуры сгорания с использованием кривых коэффициента избытка воздуха (рис. 1).

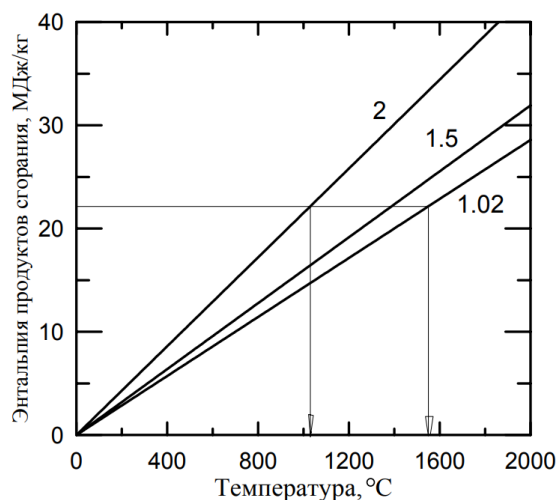


Рис. 1. Графический метод

В этом случае необходимо знать температуры горения топлива при определенном избытке воздуха.

Так как вся располагаемая теплота расходуется на производство полезной теплоты и тепловые потери, что следует из теплового баланса, то для любого сжигающего устройства может быть определен коэффициент полезного действия.

КПД рассчитывается для каждого конкретного устройства (например, котла) и включает в себя определение потерь с уходящими газами, потерь от недожога топлива и т.д.