ОПРЕДЕЛЕНИЕ К. П. Д. КОТЛА ПО ОБРАТНОМУ БАЛАНСУ

К. П. Д. парогенератора можно определить по обратному балансу - через тепловые по­тери. Из уравнения теплового баланса получим

$$η\_{ку}=q\_{1}=100-q\_{2}+q\_{3}+q\_{4}+q\_{5}+q\_{6}. (1)$$

**1 Потеря тепла с уходящими газами**

Потеря тепла с уходящими га­зами занимает основное место среди тепловых по­терь парогенератора и составляет (5…12) % располагаемого тепла топ­лива.

Этот вид потерь возникает из-за того, что **физическое тепло (эн­тальпия) газов** $I\_{ух}$**,** уходящих из парогенератора при темпера­туре $ϑ\_{ух}$, превышает физическое тепло поступающих в парогенератор воз­духа $α\_{ух}∙I\_{хв}^{0}$ и топлива $с\_{т}∙t\_{т}$.

Потери теплоты с уходящими газами определяют по формуле, %,

$$q\_{2}=\frac{Q\_{2}}{Q\_{р}^{р}}∙100,$$

где $Q\_{2}$ - абсолютная величина потерь, кДж/кг (или кДж/м3);

$Q\_{р}^{р}$ – располагаемая теплота топлива, кДж/кг (или кДж/м3).

Если пренебречь малым значением физического тепла топлива, а также теплотой золы (для твердого топлива), содержащейся в уходящих газах, по­теря тепла с уходящими газами может быть подсчитана по формуле, кДж/кг (или кДж/м3),

$$Q\_{2}=\left(I\_{ух}-α\_{ух}∙I\_{хв}^{0}\right)∙\left(\frac{100-q\_{4}}{100}\right), (2)$$

где $α\_{ух}$ - коэффициент расхода воздуха в уходящих газах;

$I\_{хв}^{0}$ – энтальпия холодного воздуха теоретически необходимого для сжигания единицы топлива, кДж/кг (или кДж/м3);

множитель ${\left(100-q\_{4}\right)}/{100}$ - учитывает уменьшение объема газов вследствие механической неполноты сгорания топлива $q\_{4}$.

Энтальпия уходящих из парогенератора при темпера­туре $ϑ\_{ух}$ газов, кДж/кг (или кДж/м3),

$I\_{ух}=$ $I\_{г}^{0}+\left(α\_{ух}-1\right)∙I\_{в}^{0}, (3)$

где $I\_{в}^{0}$, $I\_{г}^{0}$ - энтальпии теоретического объема воздуха и продуктов сгорания, отнесенных к сжиганию единицы топлива, при температуре $ϑ\_{ух},$ кДж/кг (или кДж/м3). Эти величины расчитываются по формулам:

$$I\_{в}^{0}=V^{0}∙\left(ct\right)\_{в}; (4)$$

$$I\_{г}^{0}=V\_{RO\_{2}}∙\left(cϑ\right)\_{RO\_{2}}+V\_{N\_{2}}^{0}∙\left(cϑ\right)\_{N\_{2}}+V\_{H\_{2}O}^{0}∙\left(cϑ\right)\_{H\_{2}O}, \left(5\right)$$

где $V^{0}$ - теоретический объем воздуха при $α=1$, м3/кг (или м3/ м3);

$V\_{RO\_{2}}, V\_{N\_{2}}^{0}, V\_{H\_{2}O}^{0}$ теоретические объемы продуктов сгорания (трехатомных газов, азота и водяных паров) при $α=1$, м3/ м3;

$\left(ct\right)\_{в}, \left(cϑ\right)\_{RO\_{2}}, \left(cϑ\right)\_{N\_{2}}, \left(cϑ\right)\_{H\_{2}O}$ - удельные энтальпии воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров, кДж/м3.

Из анализа выражений (2) – (5) следует вывод - величина потери тепла с уходя­щими газами зависит от **объема, а так же со­става продуктов сгорания и от темпера­туры уходящих газов,** т.е.

$$Q\_{2}=f\left(\frac{V\_{г}^{0}}{Q\_{н}^{р}}, α\_{ух}, ϑ\_{ух}\right):$$

**1. Отношение** $\frac{V\_{г}^{0}}{Q\_{н}^{р}}$, характеризую­щее качество топлива, показывает относительный выход продуктов сго­рания (при $α=1$) на единицу теп­лоты сгорания топлива и зависит от содержания в нем балластных составляющих (влаги $W^{p}$ и золы $A^{p}$ - для твердого и жидкого топлива, азота *N2*, двуокиси углерода *СО2* и кислорода *O2* — для газового топ­лива). С увеличе­нием содержания в топливе балласт­ных составляющих и, следовательно, величины $\frac{V\_{г}^{0}}{Q\_{н}^{р}}$ потеря тепла с ухо­дящими газами возрастает.

**2.** Одним из возможных направлений снижения потери тепла с уходящими газами является **уменьшение коэффициента расхода воздуха в уходящих газах** $α\_{ух}$. Величина $α\_{ух}$ зависит от коэффициента расхода воздуха в топке $α\_{т}$ и воздуха, присосанного в газоходы котла $∆α$

$$α\_{ух}=α\_{т}+∆α.$$

С уменьшением $α\_{т}$ потеря тепла $Q\_{2} \left(q\_{2}\right) $ снижается, однако при этом в связи с уменьшением количества воздуха, подаваемого в топочную ка­меру, возможно появление другой потери тепла - от химической неполноты сгорания топлива $Q\_{3} \left(q\_{3}\right)$. Оптимальная величина $α\_{т}$ выбирается с учетом достижения минимального суммарного значения $q\_{2}$ + $q\_{3}$ (см. рис. 1).

|  |  |
| --- | --- |
| D:\media\image1.jpeg | Рисунок 1 - К определению коэффициента рас­хода воздуха в топке. |

Возможность уменьшения $α\_{т}$ зави­сит от рода сжигаемого топлива и типа топочного устройства. При сжигании газового топлива коэффициент расхода воздуха в топке принимают $α\_{т}\leq 1,1$ при сжигании мазута $α\_{т}=1,1-1,15$, пылевидного топ­лива $α\_{т}=1,1$5 – 1,25; кускового топлива $α\_{т}=1,25-1,35$.

Присосы воздуха по газовому тракту парогенератора ($∆α$) практически принимают равными $∆α=0,15-0,3$.

**3.** Важнейшим фактором, влияющим на $Q\_{2}$., является **температура уходящих газов** $ϑ\_{ух}.$ Сниже­ние $ϑ\_{ух}$, достигается установкой в хво­стовой части котла тепло­использующих поверхностей водяного экономайзера и воздухоподогревателя.

Чем ниже температура уходящих газов и соответственно меньше температурный напор $∆t$ между газами и нагреваемым рабочим телом (питательная вода или воздух), тем большая поверх­ность требуется для охлаждения газа на одну и ту же величину. Повышение же температуры уходящих газов при­водит к увеличению потери с $Q\_{2}$ и, следовательно, к дополнительным затратам топлива на выработку одного и того же количества пара. В связи с этим оптимальная температура $ϑ\_{ух}$ определяется на основе технико-экономических расчетов (см. рис. 2) при сопоставлении годовых затрат для теплоиспользующих поверхностей и топлива для различных значений $ϑ\_{ух}.$

|  |  |
| --- | --- |
| D:\media\image1.jpeg | $∆B$ - затраты на топливо;*H* –затраты на поверхнсти нагрева.Рисунок 2 - К определению температуры уходя­щих газов. |

В ряде случаев снижение $ϑ\_{ух}$ огра­ничивается возможностью внешней коррозии хвостовых поверхностей нагрева из-за конденсации на них водя­ных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Температура уходящих газов не должна превышать температуру точки росы, значение которой во много определяется содержанием в дымовых газах окислов серы, т. е.

$$ϑ\_{ух}\leq t\_{росы}.$$

Температура уходящих газов промыщленных паровых котлов в зависимости от их прроизводительности, качества и стоимости топлива, температуры питательной воды и поступающего воздуха принимается равной (110…170) ºС и выше.

**2 Потеря тепла от химической не­полноты сгорания**

При горении топлива может происходить окисление не всей его горючей части. В результате этого в продуктах сгорания появляются элементы неполного сгорания топлива, которыми являются горючие газообразные составляющие (*СО*, *Н2*, *СН4*, СтНп...) плюс сажистый углерод С. Догора­ние этих горючих газов за преде­лами топочной камеры практически невозможно из-за относительно низ­кой их температуры.

Потерю тепла от химической не­полноты сгорания (химического недо­жога) расчитывают по формуле, %,

$$q\_{3}=\frac{Q\_{3}}{Q\_{р}^{р}}∙100,$$

где $Q\_{3}$ - абсолютная величина потерь, кДж/кг (или кДж/м3);

$Q\_{р}^{р}$ – располагаемая теплота топлива, кДж/кг (или кДж/м3).

**Химическая неполнота сгорания топлива может явиться следствием**:

а) общего недостатка воздуха;

б) пло­хого смесеобразования;

в) малых раз­меров топочной камеры, что опреде­ляет недостаток времени для заверше­ния химических реакций;

г) низкой температуры в топочной камере, что приводит к снижению скорости выго­рания топлива.

Температурный режим в топке определяется удельным тепловым напряжением топочного объема, МВт/м3,

$$q\_{v}=\frac{B∙Q\_{н}^{р}}{V\_{т}},$$

где $B∙Q\_{н}^{р}$ - тепловая мощность, МВт;

$V\_{т}$ - объем топки, м3.

 Характер зависимости $q\_{3}$ от величины $q\_{v}$ по­казан на рисунке 3. В области низких значений $q\_{v}$ (левая часть кривой) по­теря $q\_{3}$ увеличивается в связи со снижением температурного уровня в топочной камере, что определяется увеличением потери тепла от наружного охлаждения при уменьшении расхода топлива В.

|  |  |
| --- | --- |
| D:\media\image1.jpeg | Рисунок 3 - Потери тепла от химической неполноты сгорания в зависимость от удельного теплового напряжения топочного объема  |

Повышение $q\_{v}$ (с увеличением расхода топлива) приводит к увеличению тем­пературного уровня в топке и сниже­нию $q\_{3}$. Однако после определенного значения (правая часть кривой) дальнейшее увеличение расхода топ­лива приводит к увеличению $q\_{3}$ из-за уменьшения времени пребывания га­зов в объеме топки и невозможности завершения реакции горения.

Оптимальная величина $q\_{v}$, при которой потеря $q\_{3}$ имеет мини­мальное значение, зависит от вида топлива, способа его сжигания и кон­струкции топки. Для современных то­почных устройств потери тепла от химической неполноты сгорания составляют (0…2) % при $q\_{v}$ = (0,1…0,3) МВт/м3. В топочных устройст­вах, в которых обеспечиваются бла­гоприятные условия для интенсивного горения топлива, например в циклон­ных топках, величина $q\_{v}$ достигает (3…10) МВт/м3 и более.

Потеря теплоты с химическим недожогом определяется количеством теплоты, содержащейся в продуктах неполного сгорания. кДж/кг (или кДж/м3),

$$Q\_{3}=V\_{CO}∙Q\_{CO}+V\_{H\_{2}}∙Q\_{H\_{2}}+V\_{CH\_{4}}∙Q\_{CH\_{4}}+…, (6)$$

где $Q\_{CO}$, $Q\_{H\_{2}}$, $Q\_{CH\_{4}}$ и т. д. – теплоты сгорания горючих газов, кДж/м3.

Объемы горючих газов $V\_{CO}$, $V\_{H\_{2}}$, $V\_{CH\_{4}}$ и т. д. в продуктах сгорания в кубических метрах на единицу сжи­гаемого топлива определяют по ана­лизу газов на выходе из топки на со­держание в них *Н2*, %, *СО*, %, *СН4*, %, и т. д. по формулам, м3/кг (или м3/м3):

$$V\_{CO}=V\_{с.г}∙\frac{CO}{100}; V\_{H\_{2}}=V\_{с.г}∙\frac{H\_{2}}{100}; V\_{CH\_{4}}=V\_{с.г}∙\frac{CH\_{4}}{100}. (7)$$

Объем сухих газов при сжигании твердого и жидкого топлив опреде­ляют по фор­муле, м3/кг,

$$V\_{с.г}=1,866∙\frac{C^{p}+0.375∙S\_{ор+кол}^{p}}{CO\_{2}+SO\_{2}+CO+CH\_{4}}, (8)$$

а при сжигании газового топлива, м3/м3,

$$V\_{с.г}=\frac{CO\_{2}^{т}+CO^{т}+H\_{2}S^{т}+CH\_{4}^{т}+Σ mC\_{m}H\_{m}^{т}}{CO\_{2}+SO\_{2}+CO+CH\_{4}+ …}, (9)$$

где $C^{p}$, $S\_{ор+кол}^{p}$ - содержание углерода и горючей серы в рабочей массе твердого или жидкого топлива, %;

$CO\_{2}$, $SO\_{2}$, $CO$, $CH\_{4}$ и т.д. – с содержание в продуктах сгорания двуокиси углерода, сернистого газа, окиси углерода, метана, %;

 $CO\_{2}^{т}$, $CO^{т}$, $H\_{2}S^{т}$, $CH\_{4}^{т}$, $C\_{m}H\_{m}^{т}$ - содержание в исходном газовом топливе двуокиси углерода, окиси углерода, сероводорода, метана и различных углеводородов, %.

Для снижения потери тепла от хи­мической неполноты сгорания в то­почной камере стремятся повысить температурный уровень, применяя, в частности, подогрев воздуха, а так­же всемерно улучшая перемешивание компонентов горения.

**3 Потеря тепла от механической неполноты сгорания**

Потеря тепла от механической не­полноты сгорания $q\_{4}$ связана с недожогом твердого топлива в топочной камере. Она может быть выражена в процентах от располагаемого тепла, %

$$q\_{4}=\frac{Q\_{4}}{Q\_{р}^{р}}∙100,$$

где $Q\_{4}$ - абсолютная величина потерь, кДж/кг;

$Q\_{р}^{р}$ – располагаемая теплота топлива, кДж/кг.

Не все топливо, поступающее в топку, полностью сгорает. Часть его в виде горючих частиц, содержащих углерод, водород, серу, может уноситься газообразными продуктами сгорания, часть - уда­ляться вместе со шлаком. При слое­вом сжигании возможен также провал части топлива через прозоры колосни­ковой решетки. Теплота, содержащаяся в этих частях топлива. и составляет потери от механической не­полноты сгорания. Таким образом, по­теря тепла от механической неполноты сгорания для слоевых топок состоит из трех слагаемых (провала, шлака и уноса), кДж/кг

$$Q\_{4}=Q\_{4}^{пр}+Q\_{4}^{шл}+Q\_{4}^{ун}, (10)$$

а при камерном сжигании угольной пыли, кДж/кг

$$Q\_{4}=Q\_{4}^{шл}+Q\_{4}^{ун}, (11)$$

где $Q\_{4}^{пр}$ - потери тепла с провалом, кДж/кг;

$Q\_{4}^{шл}$ - потери тепла со шлаком, кДж/кг;

$Q\_{4}^{ун}$ - потери тепла с уносом, кДж/кг.

Расчет потери тепла от механической неполноты сгорания ведется на основе золового баланса котельной установки.

При камерном сжигании 1 кг угольной пыли (см. формулу (11)) зола топлива распределяется следующим образом, доли единицы

$$a\_{шл}+a\_{ун}=1, (12)$$

где $a\_{шл}$ – доля золы топлива в шлаке;

$a\_{ун}$ - доля золы топлива в уносе.

Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива в уравнении (12) подсчитывают по формулам, кДж/кг:

$$Q\_{4}^{шл}=a\_{шл}∙\frac{Г\_{шл}}{100-Г\_{шл}}∙\frac{A^{р}}{100}∙Q\_{шл};$$

$$Q\_{4}^{ун}=a\_{ун}∙\frac{Г\_{ун}}{100-Г\_{ун}}∙\frac{A^{р}}{100}∙Q\_{ун},$$

где $Г\_{шл}, Г\_{ун}$ – содержание горючихв шлаке и уносе, %;

$A^{р}$ – содержание золы в рабочей массе топлива, %;

$Q\_{шл}, Q\_{ун}$ – теплота сгорания горючих элементов в шлаке и в уносе, кДж/кг.

Содержание горючих сединений в шлаке $Г\_{шл}$ и уносе $Г\_{ун}$ определяют лабораторным способом в отобраных от шлака и уноса средних пробах. На содержании горючих в шлаке и уносе сказывается тонина помола топлива, температурный режим и аэродинамика топочного устройства.

Долю золы топлива в уносе $a\_{ун}$ определяют отбором пробы летучей золы в дымовых газах, при этом долю золы в шлаке определяют из уравнения золового баланса (12)

$$a\_{шл}=1-a\_{ун}.$$

Для расчетов теплоту сгорания горючих веществ в шлаке, провале и уносе условно считают равными. Ее принимают несколько меньшей величины, чем теплота сгорания чистого углерода, кДж/кг

$$Q\_{4}^{пр}=Q\_{4}^{шл}=Q\_{4}^{ун}=32680.$$

При сохранении оптимальной тонкости размола пы­ли и нормальных условиях эксплуатации потери $q\_{4} $ зависят от избытка воздуха в топке $α\_{т}$ и существенно меняются с изменением выхода летучих веществ (см. рис. 4).

|  |  |
| --- | --- |
| D:\media\image1.jpeg | Рисунок 4 - Потери теплоты с механическим недожогом топлива при твердом шлакоудалении из топочной камеры |

При избытке воздуха $α\_{т}$ ниже оптимального $α\_{т}^{опт}$ рост недожога определяется неполнотой перемешивания топлива с воз­духом на выходе из горелки и развитием зон с не­хваткой кислорода, хотя температурный уровень горе­ния высокий. При $α\_{т}>α\_{т}^{опт}$ наблюдается снижение тем­пературы в зоне горения и замедление реакций окис­ления, одновременно уменьшается время пребывания частиц в высокотемпературной зоне ввиду увеличения объема продуктов сгорания. Оба эти фак­тора приводят к возрастанию недожога топлива.

Повышенные потери у низкореакционных топлив (антрацит, полуанграцит) определяются поздним вос­пламенением коксовых частиц и затянутым горением в диффузионной области. В связи с этим указанные топлива чувствительны к режиму эксплуатации. В качестве примера на рисунке 5 показано влияние на величину потерь $q\_{4}$ температуры горячего воздуха.

|  |  |
| --- | --- |
| D:\media\image1.jpeg | Рисунок 5 - Зависимость потерь теплоты с ме­ханическим недожогом топлива от температу­ры горячего воздуха |

**4 Потеря теплоты от наружного охлаждения**

Эта потеря определяется тем, что обмуровка и обшивка котла и его элементы: барабан, коллекторы, трубопроводы, имея более высо­кую температуру, чем температура окружаю­щего воздуха, отдают ему часть теплоты. В общем виде потерю $Q\_{5}$, кДж/кг, можно вы­разить следующей формулой

$$Q\_{5}=\frac{F\_{ст}}{B\_{p}}∙\left(α\_{к}+α\_{л}\right)∙\left(t\_{ст}-t\_{окр}\right),$$

где $F\_{ст}$ - наружная поверхность стен котла и его высокотемпературных элементов, м2; $α\_{к}, α\_{л}$ - коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, кВт/(м2·К); $t\_{ст}, t\_{окр}$ - соответст­венно средняя температура поверхности теп­лоотдающих стен и температура окружающего воздуха, °С.

Потеря от наружного охлаждения будет тем больше, чем выше температура обмуров­ки и тепловой изоляции.

Абсо­лютная потеря теплоты в окружающую среду $Q\_{5}$ для котлов разной номинальной мощности определяется отношением ${F\_{ст}}/{B\_{p}}$.

Потери теплоты от наружного охлаждения котельного агрегата пропорцио­нальны его тепловой мощности (т. е. выра­ботке им тепла). Так как ко­личество тепла, вносимое в котельный агрегат в единицу времени, примерно пропорционально его произ­водительности, то потеря теплоты от наружного охлаждения, выраженная в процентах от рас­полагаемого тепла, %,

$$q\_{5}=\frac{Q\_{5}}{Q\_{р}^{р}}∙100,$$

будет тем больше, чем меньше производи­тельность котла.

Значения $q\_{5}^{ном}$, при номинальной паропроизводительности котельных агрегатов представ­лены на рисунке 6.

|  |  |
| --- | --- |
| D:\media\image1.jpeg | Рисунок 6 - Потери тепла от наружного охлаждения котельных агрегатов |

При нагрузках котла, отличающихся от номинальной, потеря тепла от наружного охлаждения рассчитывается по формуле, %,

$$q\_{5}=q\_{5}^{ном}∙\frac{D\_{ном}}{D},$$

где $D\_{ном}$ - номинальная паропроизводительность котельного агрегата, т/ч;

$D$ - паропроизводительность котла, отли­чающаяся от номинальной, т/ч;

$q\_{5}^{ном}$ - потери тепла от наружного охлаж­дения при номинальной нагрузке котла, %.

Потери тепла от наружного охлажден распределяются между отдельными газоходами котельного агрегата. Для упрощения расчетов принято считать, что потери тепла в окружающую среду отдельными газоходами котла прямо пропорциональны количествам тепла, отдаваемым продуктами сгорания поверхностям нагрева в соответствующих газоходах. Поэтому при определении количества тепла, отданного продуктами сгорания топлива поверхностям нагрева, учет потери тепла от наружного охлаждения производят путем введения коэффициента сохранения теплоты, равного

$$φ=1-\frac{q\_{5}}{η\_{к.у}+q\_{5}},$$

где $η\_{к.у}$ - коэффициент полезного действия котельной установки брутто,%.

При проведении балансовых испытаний парового котла величину $q\_{5}$ обычно определяют из уравнения теплового баланса, %,

$$q\_{5}=100-q\_{2}+q\_{3}+q\_{4}+q\_{6}.$$

**5 Потери тепла со шлаком**

В слоевых и пылеугольных топках с сухим шлакоудалением температура шлака достигает 600 - 700 °С. В топках с жид­ким шлакоудалением температура шлака примерно на 100 °С выше температуры начала жидкоплавкого состояния $t\_{3}$.

Потеря с физическим теплом шлака, %,

$$q\_{6}=\frac{Q\_{6}}{Q\_{р}^{р}}∙100,$$

где $Q\_{6}$ — физическое тепло шлака, кДж/кг, подсчитывается по формуле

$$Q\_{6}=a\_{шл}∙c\_{шл}∙t\_{шл}∙\frac{A^{p}}{100},$$

где $t\_{шл}$ - температура шлака, **°**С;

$a\_{шл}$ — доля золы топлива в шлаке;

$c\_{шл}$ - средняя теплоемкость шлака от 0 **°**С до $t\_{шл}$, кДж/(кг·К);

$A^{p}$ - содержание золы в рабочей массе топлива, %.

В слоевых топках доля золы топлива, содер­жащаяся в шлаке $a\_{шл}$, достаточно велика и поэтому потеря с физическим теплом шлаков составляет $q\_{6}$ = 0,5 - 1,5 °/0.

В топках с жидким шлакоудалением по­теря с физическим теплом шлака еще больше, так как температура жидкого шлака дости­гает очень высоких значений (порядка 1 300 -- 1 600 °С). В циклонных топках (ашл – 85 – 90 %) потеря с физическим теплом шлаков может достигать соответственно 1 – 5 °/0.

Потеря с физическим теплом шлака в ко­тельных агрегатах с камерными топками и сухим шлакоудалением для топлив с приве­денной зольностью $ A^{п}\leq 10$ составляет вели­чину $q\_{6}$ < 0,2 %. Поэтому при составлении теплового баланса котла в этом случае $q\_{6}$ учитывают только для топлив с зольностью $A^{п}>10$.