

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛОТЫ НА ПАРОТУРБИННЫХ ТЭЦ

Расход топлива на выработку электрической энергии и теплоты на паротурбинных ТЭЦ может быть определен как сумма двух слагаемых

$$B_T = B_{T.Э} + B_{T.Т.} \quad (1.1)$$

где $B_{T.Э}$ - расход топлива на выработку электрической энергии;

$B_{T.Т.}$ - расход топлива на выработку теплоты.

На ТЭЦ устанавливаются теплофикационные турбины двух видов: с противодавлением для полного использования отработавшего тепла (типа Р) и с конденсацией и отборами пара для частичного его использования (типа П, Т или ПТ). Основными агрегатами большинства современных паротурбинных ТЭЦ являются теплофикационные турбины с отбором пара. Эти турбины могут развивать, как правило, полную электрическую мощность независимо от нагрузки теплофикационных отборов. Однако они не всю электроэнергию вырабатывают *комбинированным методом*. Часть электрической энергии вырабатывается в этих турбинах на потоке пара, поступающем в конденсатор, т. е. *конденсационным методом*.

Поэтому полное количество электрической энергии, вырабатываемой на ТЭЦ, является в общем случае суммой двух слагаемых

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_T + \mathcal{E}_{Т.К.} \quad (1.2)$$

где \mathcal{E}_T - выработка электрической энергии *комбинированным методом*;

$\mathcal{E}_{Т.К.}$ - выработка электрической энергии на ТЭЦ *конденсационным методом*.

Количество электрической энергии, вырабатываемой на ТЭЦ *комбинированным методом* можно определить по формуле

$$\mathcal{E}_T = \varepsilon_T \cdot Q_T \quad (1.3)$$

где ε_T - удельная *комбинированная* выработка;

Q_T - отпуск отработавшей теплоты (из отборов или противодавления).

На паротурбинных ТЭЦ основная *комбинированная* выработка электрической энергии производится на базе теплоты, отдаваемой из теплофикационных отборов или из хвостовой части турбины в систему теплоснабжения, т. е. на базе внешнего теплового потребления. Кроме того, часть электрической энергии производится *комбинированным* методом на базе внутреннего теплового потребления, т. е. теплоты, используемой для регенеративного подогрева конденсата, поступающего в питательную систему ТЭЦ из теплофикационной установки (теплофикационных подогревателей и потребителей пара), а также для регенеративного подогрева химически очищенной воды, восполняющей потерю конденсата в теплофикационной системе.

Полная удельная *комбинированная* выработка электрической энергии на ТЭЦ определяется как сумма двух слагаемых [1]

$$\varepsilon_T = \varepsilon_0 + \varepsilon_{В.Т.} = \varepsilon_0 \cdot (1 + e_T) \quad (1.4)$$

где ε_0 - удельная *комбинированная* выработка на базе теплоты, отданной *внешним* потребителям;

$\varepsilon_{В.Т.}$ - удельная *комбинированная* выработка на базе *внутреннего* теплового потребления ТЭЦ, т. е. на базе регенеративного подогрева конденсата теплофикационной установки;

$e_T = \varepsilon_{В.Т.}/\varepsilon_0$ - относительная *комбинированная* выработка на внутреннем тепловом потреблении ТЭЦ.

Удельная *комбинированная* выработка электрической энергии, $\text{кВт} \cdot \text{час} / \text{ГДж}$ на базе *внешнего* теплового потребления с учетом реальных потерь в турбогенераторах ТЭЦ определяется по формуле

$$\varepsilon_0 = \frac{278 \cdot H_T \cdot \eta_{0_i} \cdot \eta_{ЭМ}}{i_T - i_{Т.КОНД}} \quad (1.5)$$

где H_T изоэнтропийное (адиабатное) теплопадение от состояния перед турбиной до давления в отборе;

η_{0i} - внутренний относительный КПД турбины;

$\eta_{ЭМ}$ - электромеханический КПД турбогенератора;

i_T - энтальпия пара в отборе турбины;

$i_{T.КОНД}$ - энтальпия конденсата поступающего в регенеративную систему.

Точный расчет удельной выработки $\varepsilon_{В.Т.}$ на базе внутреннего теплового потребления ТЭЦ довольно сложен и может производиться только для конкретной тепловой схемы ТЭЦ.

Для предварительной оценки $\varepsilon_{В.Т.}$ можно пользоваться упрощенной методикой, предложенной в [1].

Реальную схему регенеративного подогрева конденсата можно заменить условной схемой, состоящей из одного регенеративного смешивающего типа. Температура отвода теплоты в этот регенеративный подогреватель можно определить за формулой

$$T_P = \frac{T_{П.В.} - T_{Т.КОНД}}{\ln(T_{П.В.}/T_{Т.КОНД})} \quad (1.6)$$

где $T_{Т.КОНД}$, $T_{П.В.}$ - соответственно температура конденсата на входе в регенеративный подогреватель и температура питательной воды, K .

Без существенных погрешностей формулу (1.6) можно заменить на

$$T_P = \frac{T_{П.В.} + T_{Т.КОНД}}{2} \quad (1.7)$$

Давление условного регенеративного отбора p_P соответствует линии насыщения пара при температуре T_P .

При рассматриваемой условной схеме регенеративного подогрева удельная комбинированная выработка электрической энергии на базе внутреннего теплового потребления ТЭЦ, отнесенная к единице теплоты, отпущенной через теплофикационный подогреватель в тепловую сеть, определится как

$$\varepsilon_{В.Т.} = \frac{H_P \cdot \eta_{0i} \cdot \eta_{ЭМ} (i_{П.В.} - i_{Т.КОНД})}{(i_T - i_{Т.КОНД}) (i_P - i_{П.В.})} \quad (1.8)$$

где H_p - изоэнтропийное (адиабатное) теплопадение от состояния пара перед турбиной до давления в условном регенеративном отборе;

i_p - энтальпия пара в условном регенеративном отборе;

$i_{п.в.}$ - энтальпия питательной воды;

i_T - энтальпия пара в отборе турбины;

$i_{T.конд}$ - энтальпия конденсата поступающего в регенеративную систему.

Из совместного решения (1.5) и (1.8) находится относительная комбинированная выработка электрической энергии на внутреннем тепловом потреблении ТЭЦ

$$e_{в.т.} = \frac{H_p (i_{п.в.} - i_{T.конд})}{H_T (i_p - i_{п.в.})} \quad (1.9)$$

Расход топлива на выработку электрической энергии на ТЭЦ

$$B_{Т.э.} = b_T^э \cdot \mathcal{E}_T + b_{Т.к.}^э \cdot \mathcal{E}_{Т.к.} \quad (1.10)$$

где $b_T^э$ - удельный расход топлива на выработку электрической энергии на базе теплоты, отводимой тепловым потребителям, т. е. *комбинированным методом*;

$b_{Т.к.}^э$ - удельный расход топлива на выработку электрической энергии на базе теплоты, отводимой в окружающую среду, т. е. *конденсационным методом*.

Удельный расход топлива на *комбинированную* выработку электрической энергии, $кг/(кВт \cdot час)$ определяется зависимостью

$$b_T^э = 0,123 / \eta_{к.с.} \cdot \eta_{эм} \quad (1.11)$$

где $\eta_{к.с.}$ - КПД котельной электростанции.

При выработке на ТЭЦ электрической энергии конденсационным методом пар из регенеративных отборов турбины также используется для подогрева потока конденсата, направляемого из конденсатора в котел. На базе этого регенеративного подогрева также вырабатывается *комбинированным* методом некоторое количество электрической энергии.

Относительное количество комбинированной выработки электрической энергии, получаемой на базе подогрева потока конденсата из конденсатора, может быть определено по аналогии с (1.9) по формуле

$$e_{Т.К.} = \frac{H_P (i_{П.В.} - i_{К.КОНД.})}{H_{Т.К.} (i_P - i_{П.В.})} \quad (1.12)$$

где $H_{Т.К.}$ - изоэнтروпийный перепад от состояния пара перед турбиной до давления в конденсаторе ТЭЦ;

$i_{К.КОНД.}$ - энтальпия конденсата после конденсатора ТЭЦ.

Поскольку на каждую единицу электрической энергии, вырабатываемой на ТЭЦ чисто *конденсационным* методом, вырабатывается дополнительно на базе регенеративного подогрева конденсата $e_{Т.К.}$ единиц электрической энергии *комбинированным* методом, то средний удельный расход условного топлива, $кг/(кВт \cdot час)$, на *конденсационную* выработку электрической энергии на ТЭЦ [1] определяется как

$$b_{Т.К.}^{\mathcal{E}} = \frac{1}{\eta_{К.С.} \cdot \eta_{ЭМ.} \cdot \eta_{i_T}^P} \quad (1.13)$$

где $\eta_{i_T}^P$ - внутренний абсолютный КПД *конденсационной* выработки на ТЭЦ с учетом регенерации

$$\eta_{i_T}^P = \eta_{i_T} \frac{1 + e_{Т.К.}}{1 + e_{Т.К.} \cdot \eta_{i_T}}, \quad (1.14)$$

где η_{i_T} - внутренний абсолютный КПД *конденсационной* выработки на ТЭЦ без учета регенерации

$$\eta_{i_T} = \frac{H_{Т.К.} \cdot \eta_0}{i_0 - i_{К.КОНД.}}, \quad (1.15)$$

Очевидно, что при отсутствии регенеративного подогрева, т.е. при $H_P = 0$, $e_{Т.К.} = 0$ и $\eta_{i_T}^P = \eta_{i_T}$,

$$b_{Т.К.}^{\mathcal{E}} = \frac{1}{\eta_{К.С.} \cdot \eta_{ЭМ.} \cdot \eta_{i_T}} \quad (1.16)$$

где $\eta_{К.С.}$ - КПД котельной электростанции;

$\eta_{ЭМ}$ - электромеханический КПД турбогенератора.

Средний удельный расход условного топлива, $кг/(кВт \cdot час)$, на ТЭЦ с учетом как *комбинированной*, так и *конденсационной* выработки электрической энергии

$$b_{T,CP}^{\mathcal{E}} = \frac{b_T^{\mathcal{E}} \cdot \mathcal{E}_T + b_{T,K.}^{\mathcal{E}} \cdot \mathcal{E}_{T,K.}}{\mathcal{E}} \quad (1.17)$$

где значения \mathcal{E}_T подсчитываются по (1.3).

По заданному значению полной выработки электрической энергии на ТЭЦ \mathcal{E} и известной выработке на базе теплофикации \mathcal{E}_T легко найти величину

$$\mathcal{E}_{T,K.} = \mathcal{E} - \mathcal{E}_T \quad (1.18)$$

Расход топлива на выработку теплоты на ТЭЦ

$$B_{T,T.} = b_T^T \cdot Q \quad (1.19)$$

где Q - количество теплоты, отпущенной с ТЭЦ, ГДж ,

$$Q = Q_T + Q_P \quad (1.20)$$

где Q_T - теплота из отборов турбин;

Q_P - теплота, производимая непосредственно на котлах.

Удельный расход топлива на выработку теплоты на ТЭЦ, кг/ГДж , определяется за формулой

$$b_T^T = 34,1 / \eta_{K.C.} \quad (1.21)$$

где $\eta_{K.C.}$ - КПД котельной электростанции.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА РАЗДЕЛЬНУЮ ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛОТЫ

Расход топлива при *раздельной* выработке теплоты и электрической энергии также является суммой двух слагаемых

$$B_P = B_{P,\mathcal{E}} + B_{P,T.} \quad (2.1)$$

где $B_{P,\mathcal{E}}$ - расход топлива на выработку электрической энергии на конденсационной тепловой электростанции;

$B_{P,T.}$ - расход топлива на выработку теплоты в районной котельной.

На современных КЭС с развитой регенерацией электрическая энергия вырабатывается двумя методами: а) *конденсационным*; б) *комбинированным на базе регенеративного подогрева конденсата*.

Принципиальное отличие КЭС от ТЭЦ заключается в том, что в первых *отсутствует* комбинированная выработка электрической энергии на базе *внешнего* теплового потребления, поэтому доля чисто конденсационной выработки электрической энергии на КЭС значительно больше, чем на ТЭЦ. В конденсаторе паровой турбины пар конденсируется при температуре $t_{\text{КОНД}}$. Полученный конденсат подогревается в регенеративных подогревателях паром из отбора турбины от температуры $t_{\text{КОНД}}$ до температуры питательной воды $t_{\text{П.В.}}$. На базе этого подогрева *комбинированным* методом вырабатывается электрическая энергия.

По аналогии с (1.12) можно написать выражение для относительной выработки электроэнергии на внутреннем тепловом, потреблении КЭС, т. е. на базе регенеративного подогрева конденсата

$$e_{\text{К.}} = \frac{H_{\text{П.В.}} (i_{\text{П.В.}} - i_{\text{К.КОНД}})}{H_{\text{К}} (i_{\text{П.}} - i_{\text{П.В.}})} \quad (2.2)$$

где $e_{\text{К.}}$ - отношение *комбинированной* выработки электрической энергии на КЭС к чисто *конденсационной* выработке;

$H_{\text{К}}$ - изоэнтروпийный перепад от состояния пара перед турбиной до давления в конденсаторе;

$i_{\text{К.КОНД}}$ - энтальпия конденсата после конденсатора конденсационных электростанций.

По аналогии с (1.13) средний удельный расход условного топлива на КЭС

$$b_{\text{К}}^{\text{Э}} = \frac{I}{\eta_{\text{К.С.}} \cdot \eta_{\text{ЭМ.}} \cdot \eta_{i_{\text{К}}}^{\text{П}}} \quad (2.3)$$

где $\eta_{i_{\text{К}}}^{\text{П}}$ - внутренний абсолютный КПД конденсационной выработки на КЭС с учетом регенерации

$$\eta_{i_{\text{К}}}^{\text{П}} = \eta_{i_{\text{К}}} \frac{1 + e_{\text{К.}}}{1 + e_{\text{К.}} \cdot \eta_{i_{\text{К}}}}, \quad (2.4)$$

где $\eta_{i_{\text{К}}}$ - внутренний абсолютный КПД конденсационной выработки на КЭС без учета регенерации

$$\eta_{i_k} = \frac{H_K \cdot \eta_{0_i}}{i_0 - i_{K.КОНД}}, \quad (2.5)$$

где i_0 - энтальпия пара перед турбиной;

η_{0_i} - внутренний относительный КПД турбины;

В конденсационных турбинах с промперегревом

$$\eta_{i_k} = \frac{H_K \cdot \eta_{0_i}}{i_0 + \Delta i_{III} - i_{K.КОНД}}, \quad (2.6)$$

где $H_K = H'_K + H''_K$, H'_K - изоэнтропийный перепад от состояния пара перед турбиной до давления на входе в промперегреватель; H''_K - изоэнтропийный перепад от состояния пара после промперегревателя до давления в конденсаторе;

Δi_{III} - количество теплоты, подведенное к пару в промперегревателе.

Аналогично (1.16), при отсутствии регенеративного подогрева, т.е. при $H_p = 0$, средний удельный расход условного топлива на КЭС

$$b_{K.}^{\mathcal{E}} = \frac{I}{\eta_{K.C.} \cdot \eta_{ЭМ.} \cdot \eta_{i_k}} \quad (2.7)$$

Для выработки на КЭС того же количества электрической энергии, что и на ТЭЦ, требуется затратить условного топлива,

$$B_{P.Э.} = b_{K.}^{\mathcal{E}} \cdot \mathcal{E} \quad (2.8)$$

где $b_{K.}^{\mathcal{E}}$ - удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии на КЭС, определяемый по (2.7).

Расход топлива на выработку теплоты при отдельной системе теплоэнергоснабжения по аналогии с уравнением (1.19) определяется по формуле

$$B_{P.T.} = b_K^T \cdot Q \quad (2.9)$$

где b_K^T - удельный расход топлива на выработку теплоты в котельной.

Удельный расход условного топлива, $кг/ГДж$ на выработку теплоты в котельной

$$b_K^T = \frac{34,1}{\eta_K} \quad (2.10)$$

где η_k - КПД районной котельной.

Литература

1. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М.:Энергоатомиздат, 1982. 360 с.
2. Теплотехнический справочник. Изд. 2-е, перераб. Под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева. Т.1. М., «энергия», 1975. 744 с.
3. Сафонов А. П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. – М.:Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
4. Щепетильников М. И., Хлопушин В. И. Сборник задач по курсу ТЭС: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.