

Методика технико-экономической оптимизации поверхности конденсатора в составе бинарной ПГУ

Новичков С. В., Попова Т. И., кандидаты техн. наук

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

Оптимальная поверхность конденсатора в составе бинарной парогазовой установки (ПГУ) определяется на основе минимальных затрат при оптимальном соотношении между электрической мощностью паротурбинной установки (ПТУ) и нагрузкой конденсатора с учетом режимов работы газотурбинной установки (ГТУ). Предложена методика технико-экономической оптимизации поверхности конденсатора ПТУ в составе бинарной ПГУ – ТЭЦ на основе частных производных.

Ключевые слова: ПГУ – ТЭЦ, конденсатор, частная производная, аппроксимация.

Низкопотенциальный комплекс (система конденсатор – водохранилище) является одним из видов теплообменного оборудования, подлежащего технико-экономической оптимизации в составе бинарной ПГУ. Условия его работы зависят от режимов коммунально-бытового назначения (отопление, вентиляция, горячее водоснабжение).

При эксплуатации режимы работы ГТУ изменяются вследствие непостоянства температуры и давления воздуха на ее входе, а также из-за возможного изменения нагрузки. В результате этого изменяются входные и выходные параметры газов ГТУ. В зимний период увеличение ее мощности (и соответственно количества теплоты уходящих газов) сопровождается повышением расхода пара в головную часть турбины и возможным снижением пропускания пара в конденсатор. В летний период при уменьшении мощности ГТУ расход пара в головную часть паровой турбины сокращается, а снижение нагрузки на сетевые подогреватели приводит к увеличению пропускания пара в конденсатор. Минимальные затраты в бинарную ПГУ – ТЭЦ достигаются при оптимальном соотношении электрической мощности ПТУ, ГТУ, нагрузки конденсатора с учетом режимов работы.

Цель данной статьи – с учетом влияния параметров работы ГТУ разработать методику выбора оптимальной поверхности конденсатора ПТУ в составе бинарной ПГУ на основе метода частных производных. При разработке методики используются понятия проектно-расчетного и переменного режимов. Для ГТУ проектно-расчетным является режим работы при температуре наружного воздуха 15 °С, для теплофикационной ПТУ – среднезимний режим. Переменные режимы учитывают изменение метеорологических условий и нагрузки блока ПГУ – ТЭЦ. Харак-

тер климатических и режимных факторов может оказывать существенное влияние на выбор оптимальной поверхности конденсатора.

Представим затраты в ПГУ с учетом режимов работы в общем виде:

$$\begin{aligned} Z_{\text{ПГУ}} = & k_{\text{уд}}^{\text{ГТУ}} n_{\text{ГТУ}} \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i N_{\text{ГТУ}i} + \\ & + k_{\text{уд}}^{\text{КУ}} n_{\text{КУ}} \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i F_{\text{КУ}i} + k_{\text{уд}}^{\text{ПТУ}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j N_{\text{ПТУ}j} + \\ & + k_{\text{уд}}^{\text{К-П}} F_{\text{К-П}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{\tau}_i = \tau_i / \tau_{\text{год}}$ – относительное число часов работы ГТУ в i -м режиме; τ_i – число часов работы ГТУ в i -м режиме, ч; $\bar{\tau}_j = \tau_j / \tau_{\text{год}}$ – относительное число часов работы ПТУ в j -м режиме; τ_j – число часов работы ПТУ в j -м режиме, ч; $\tau_{\text{год}}$ – годовое число работы установки в течение года, ч; $k_{\text{уд}}^{\text{ГТУ}}$, $k_{\text{уд}}^{\text{КУ}}$, $k_{\text{уд}}^{\text{ПТУ}}$, $k_{\text{уд}}^{\text{К-П}}$ – удельные капиталовложения соответственно в ГТУ, котел-утилизатор, ПТУ и конденсатор; $N_{\text{ГТУ}i}$ – мощность ГТУ в i -м режиме, МВт; $F_{\text{КУ}}$ – площадь поверхности нагрева котла-утилизатора, м²; $N_{\text{ПТУ}j}$ – мощность ПТУ в j -м режиме, МВт; $n_{\text{ГТУ}}$ и $n_{\text{КУ}}$ – число ГТУ и котлов-утилизаторов.

Условием существования экстремума функции является приравнение нулю производной затрат в ПГУ по поверхности конденсатора:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z_{\text{ПГУ}}}{\partial F_{\text{К-П}}} = & k_{\text{уд}}^{\text{ГТУ}} \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial N_{\text{ГТУ}i}}{\partial F_{\text{К-П}}} + \\ & + k_{\text{уд}}^{\text{КУ}} \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial F_{\text{КУ}i}}{\partial F_{\text{К-П}}} + k_{\text{уд}}^{\text{ПТУ}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\partial N_{\text{ПТУ}j}}{\partial F_{\text{К-П}}} + \\ & + k_{\text{уд}}^{\text{К-П}} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\partial N_{ГТУ i} / \partial F_{к-р}$ — производная мощности ГТУ по поверхности конденсатора в i -м режиме, кВт/м²; $\partial F_{к-р} / \partial F_{к-р}$ — производная поверхности котла-утилизатора по поверхности конденсатора, м²/м²; $\partial N_{ПТУ j} / \partial F_{к-р}$ — производная мощности ПТУ по поверхности конденсатора в j -м режиме, кВт/м².

Раскроем каждую производную уравнения (2).

1. Производная мощности ГТУ по поверхности конденсатора в i -м режиме

$$\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial N_{ГТУ i}}{\partial F_{к-р}} = \left[\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial N_{ГТУ i}}{\partial T_{н.в i}} \frac{\partial T_{н.в i}}{\partial T_{2i}} \frac{\partial T_{2i}}{\partial T_{yx i}^{ГТУ}} \times \frac{\partial T_{yx i}^{ГТУ}}{\partial Q_{yx i}^{ГТУ}} \frac{\partial Q_{yx i}^{ГТУ}}{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}} \right] \frac{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}{\partial F_{к-р}}, \quad (3)$$

где $\partial N_{ГТУ i} / \partial T_{н.в i}$ — производная мощности ГТУ по температуре наружного воздуха в i -м режиме кВт/К; $\partial T_{н.в i} / \partial T_{2i}$ — производная температуры наружного воздуха по температуре воздуха после компрессора ГТУ в i -м режиме, К/К; $\partial T_{2i} / \partial T_{yx i}^{ГТУ}$ — производная температуры воздуха после компрессора ГТУ по температуре уходящих газов ГТУ в i -м режиме, К/К; $\partial T_{yx i}^{ГТУ} / \partial Q_{yx i}^{ГТУ}$ — производная температуры уходящих газов ГТУ по количеству теплоты уходящих газов ГТУ в i -м режиме, К/кВт.

Эти производные раскрыты в [1].

Производную количества теплоты уходящих газов ГТУ в i -м режиме по количеству теплоты уходящих газов в расчетном режиме можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{\partial Q_{yx i}^{ГТУ}}{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}} = \frac{Q_{к y i} \eta_{к y(p)}}{Q_{к y(p)} \eta_{к y(i)}} = \frac{Q_{yx i}^{ГТУ}}{Q_{yx(p)}^{ГТУ}} = \delta Q_{yx i}^{ГТУ}. \quad (4)$$

Производную количества теплоты уходящих газов ГТУ по поверхности конденсатора в расчетном режиме, кВт/м², можно представить в виде

$$\frac{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}{\partial F_{к-р}} = \frac{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}{\partial N_{ПТУ(p)}} \frac{\partial N_{ПТУ(p)}}{\partial F_{к-р}}. \quad (5)$$

Производная количества теплоты уходящих газов ГТУ по мощности ПТУ

$$\frac{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}{\partial N_{ПТУ(p)}} = \frac{1}{\frac{\partial N_{ПТУ(p)}}{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}} = \frac{G_{yx(p)}^{ГТУ} t_{yx(p)}^{ГТУ} C_{p(p)}^Г}{N_{ПТУ(p)}}, \quad (6)$$

где $G_{yx(p)}^{ГТУ}$ — расход уходящих газов; $C_{p(p)}^Г$ — теплоемкость газов в расчетном режиме.

Раскроем производную мощности ПТУ по поверхности конденсатора, кВт/м², в расчетном режиме:

$$\frac{\partial N_{ПТУ(p)}}{\partial F_{к-р}} = \frac{\partial (N_{ПТУ}^{ЧВД} + N_{ПТУ}^{ЧНД})}{\partial F_{к-р}} = \frac{\partial N_{ПТУ}^{ЧВД}}{\partial F_{к-р}} + \frac{\partial N_{ПТУ}^{ЧНД}}{\partial F_{к-р}}. \quad (7)$$

Примем, что мощность части высокого давления (ЧВД) ПТУ не зависит от режимов работы (поверхности) конденсатора:

$$\frac{\partial N_{ПТУ}^{ЧВД}}{\partial F_{к-р}} = 0. \quad (8)$$

Производную мощности ЧНД ПТУ по поверхности конденсатора выразим следующим образом:

$$\sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\partial N_{ПТУ j}^{ЧНД}}{\partial F_{к-р}} = \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\partial N_{ПТУ j}}{\partial N_{ПТУ(p)}} \frac{\partial N_{ПТУ(p)}}{\partial t_k} \frac{\partial t_k}{\partial \Delta t_i} \frac{\partial \Delta t_i}{\partial \Delta t_p} \frac{\partial \Delta t_p}{\partial F_{к-р}}, \quad (9)$$

где t_k — температура отработавшего пара (конденсата) в конденсаторе, °С; Δt_i и Δt_p — минимальные температурные напоры в конденсаторе в i -м и расчетном режимах, °С.

Изменение мощности турбины в процессе оптимизации обусловлено варьированием температуры конденсации пара t_k . Значение производной $\partial N_{ПТУ(p)} / \partial t_k$ зависит от многих факторов, однако при заданной конструкции последней ступени и известных ее характеристиках эта производная может быть представлена в функции t_k и удельной нагрузки выходного сечения турбины d_f , представляющей собой отношение расхода пара в конденсатор $D_{к-р}$ к площади выхлопа последней ступени турбины f_v . Такая зависимость получена с использованием уравнения мощности турбины $N_{ПТУ} = D_{к-р} l_T$ и дифференциальных уравнений термодинамики в аналитическом виде [2]:

$$\frac{\partial N_{ПТУ(p)}}{\partial t_k} = -D_{к-р} \frac{\partial l_T}{\partial t_k}, \quad (10)$$

где l_T — удельная работа 1 кг пара в последней ступени турбины, кДж/кг.

Обозначим $\partial l_T / \partial t_k = l'_T$. Аналитическая зависимость, учитывающая дополнительно влияние переменного расхода пара через последнюю ступень на выходные потери и изменение работы циркуляционного насоса, имеет вид

$$l'_T = \frac{\partial l_{\Pi}}{\partial t_k} = (S_o - S'_k) \left[\eta_{oi} (1 - \varepsilon) - a_{\Pi} \left(\frac{d_f v_k}{a^*} \right)^2 \right] \eta_{M.G.}, \quad (11)$$

где S_o и S'_k — энтропии пара перед последним отсеком турбины и конденсата при давлении в конденсаторе, кДж/(кг · °C); η_{oi} — внутренний относительный КПД последнего отсека ЧНД;

$$\varepsilon = \frac{H_o}{h_o - h_k + r_k} \frac{C'_k - C''_k}{S''_k - S'_k}$$

— поправка, учитывающая влияние переменного расхода и влажности пара; H_o — располагаемый теплоперепад последнего отсека ЧНД, кДж/кг; h_o и h_k — энтальпия пара перед последним отсеком и энтальпия конденсата, кДж/кг; C''_k и C'_k ; S''_k и S'_k — теплоемкости и энтропии пара и конденсата на пограничных кривых при давлении в конденсаторе, кДж/(кг · °C); v_k — удельный объем отработавшего пара при давлении в конденсаторе p_k , м³/кг; $a^* = \sqrt{k p_k v_k}$ — критическая скорость истечения пара при параметрах в конденсаторе, м/с; $k = 1,1 \div 1,5$ — коэффициент потерь в выхлопном патрубке; $\eta_{M.G.}$ — произведение механического КПД и КПД генератора.

Производные $\partial t_k / \partial \Delta t_i$, $\partial \Delta t_i / \partial \Delta t_p$, $\partial \Delta t_p / \partial F_{k-p}$ раскрыты исходя из уравнения теплопередачи конденсатора. Изменение температуры конденсата пропорционально минимальному температурному напору в i -м режиме:

$$\frac{\partial t_k}{\partial \Delta t_i} = 1; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial \Delta t_p} = \frac{\Delta t_i}{\Delta t_p} \frac{\Delta \tau_i}{\Delta \tau_p} \frac{\Delta t_p^{cp}}{\Delta t_i^{cp}}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Delta t_p}{\partial F_{k-p}} = - \frac{1}{F_{k-p}} \frac{\Delta \tau_p \Delta t_p}{\Delta t_p^{cp}}, \quad (14)$$

где Δt_i и Δt_p — минимальные температурные напоры в конденсаторе в i -м и расчетном режимах, °C; $\Delta \tau_i$ и $\Delta \tau_p$ — максимальные темпе-

ратурные напоры в конденсаторе в i -м и расчетном режимах, °C; Δt_i^{cp} и Δt_p^{cp} — средне-логарифмические температурные напоры в конденсаторе в i -м и расчетном режимах, °C.

После подстановки выражений (8) — (14) в уравнение (7) получаем производную мощности ПТУ по поверхности конденсатора:

$$\sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\partial N_{ПТУj}}{\partial F_{k-p}} = - \frac{D_{k-p}}{F_{k-p}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\Delta t_j \Delta \tau_j}{\Delta t_{cpj}} l'_{Tj}. \quad (15)$$

Подставляя выражения (6) и (15) в уравнение (5), находим производную количества теплоты уходящих газов ГТУ по поверхности конденсатора в расчетном режиме:

$$\frac{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}{\partial F_{k-p}} = - \frac{G_{yx(p)}^{ГТУ} t_{yx(p)}^{ГТУ} C_p^r}{N_{ПТУ(p)}} \frac{D_{k-p}}{F_{k-p}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\Delta t_j \Delta \tau_j}{\Delta t_{cpj}} l'_{Tj}. \quad (16)$$

После преобразований определяем производную мощности ГТУ по поверхности конденсатора в i -м режиме:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial N_{ГТУi}}{\partial F_{k-p}} = & - \left[\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \delta N_{ГТУi} (t_{H.B.}) \times \right. \\ & \times \left. \frac{T_{H.Bi}}{T_{yx i}^{ГТУ}} \frac{1}{G_{yx i}^{ГТУ} C_p^r} \delta Q_{yx i}^{ГТУ} \right] \frac{G_{yx(p)}^{ГТУ} t_{yx(p)}^{ГТУ} C_p^r}{N_{ПТУ(p)} \delta Q_{yx(p)}^{ГТУ}} \times \\ & \times \frac{D_{k-p}}{F_{k-p}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\Delta t_j \Delta \tau_j}{\Delta t_{cpj}} l'_{Tj}. \quad (17) \end{aligned}$$

2. Производная поверхности котла-утилизатора по поверхности конденсатора

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial F_{kyi}}{\partial F_{k-p}} = \\ = \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial F_{kyi}}{\partial F_{ky(p)}} \frac{\partial F_{ky(p)}}{\partial Q_{ky}^p} \frac{\partial Q_{ky}^p}{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}} \frac{\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}}{\partial F_{k-p}}, \quad (18) \end{aligned}$$

где $\partial F_{kyi} / \partial F_{ky(p)}$ — производная поверхности котла-утилизатора в i -м режиме по поверхности в расчетном режиме, м²/м²; $\partial F_{ky(p)} / \partial Q_{ky}^p$ — производная поверхности котла-утилизатора по количеству теплоты, воспринятой им в расчетном режиме от ГТУ, м²/кВт; $\partial Q_{ky}^p / \partial Q_{yx(p)}^{ГТУ}$ — производная теплоты, воспринятой котлом-утилизатором, по количеству теплоты, от данной с уходящими газами ГТУ, кВт/кВт; $\partial Q_{yx(p)}^{ГТУ} / \partial F_{k-p}$ — производная количества теп-

лоты уходящих газов ГТУ по поверхности конденсатора в расчетном режиме.

Подставляя выражение (16) в выражение (18) и учитывая, что

$$\frac{\partial F_{\text{кy}}}{\partial Q_{\text{(p)}}^{\text{кy}}} = \frac{1}{k_{\text{кy}}^{(p)} \Delta t_{\text{кy}}^{(p)}}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{кy}}^{\text{p}}}{\partial Q_{\text{yx(p)}}^{\text{ГТУ}}} = \eta_{\text{кy}}^{\text{p}}, \quad (20)$$

получаем производную поверхности котла-утилизатора по поверхности конденсатора:

$$\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \frac{\partial F_{\text{кy}i}}{\partial F_{\text{к-р}}} = - \frac{\eta_{\text{кy}}^{\text{p}}}{k_{\text{кy}}^{\text{p}} \Delta t_{\text{кy}}^{\text{p}}} \frac{G_{\text{yx(p)}}^{\text{ГТУ}}}{N_{\text{ПТУ(p)}}} \times \\ \times \frac{t_{\text{yx(p)}}^{\text{ГТУ}} C_{\text{p}}^{\text{r}}}{\delta Q_{\text{yx(p)}}^{\text{ГТУ}}} \frac{D_{\text{к-р}}}{F_{\text{к-р}}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\Delta t_j \Delta \tau_j}{\Delta t_{\text{ср}j}} I'_{\text{T}j}. \quad (21)$$

Подставляя производные (15), (17), (21) в уравнение (2), после преобразований получаем окончательное выражение для определения оптимальной поверхности конденсатора $F_{\text{к-р}}^{\text{опт}}$ в составе бинарной ПГУ – ТЭЦ:

$$F_{\text{к-р}}^{\text{опт}} = D_{\text{к-р}} \sum_{j=1}^m \bar{\tau}_j \frac{\Delta t_j \Delta \tau_j}{\Delta t_{\text{ср}j}} I'_{\text{T}j} \left\{ \frac{G_{\text{yx(p)}}^{\text{ГТУ}} t_{\text{yx(p)}}^{\text{ГТУ}} C_{\text{p}}^{\text{r}}}{N_{\text{ПТУ(p)}}} \times \right. \\ \times \left[\delta k_{\text{уд}}^{\text{ГТУ}} n_{\text{ГТУ}} \left(\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \delta N_{\text{ГТУ}i} (t_{\text{н.в}}) \frac{T_{\text{н.в}i}}{T_{\text{ГТУ}}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{1}{G_{\text{yx}i}^{\text{ГТУ}} C_{\text{p}}^{\text{r}}} \delta Q_{\text{yx}i}^{\text{ГТУ}} \right) + \delta k_{\text{уд}}^{\text{кy}} n_{\text{кy}} \frac{\eta_{\text{кy}}^{\text{p}}}{k_{\text{кy}}^{\text{p}} \Delta t_{\text{кy}}^{\text{p}}} \right] + \\ \left. + \delta k_{\text{уд}}^{\text{ПТУ}} n_{\text{ПТУ}} \right\}, \quad (22)$$

где $\delta k_{\text{уд}}^{\text{ГТУ}} = k_{\text{уд}}^{\text{ГТУ}} / k_{\text{уд}}^{\text{к-р}}$ — отношение удельных капиталовложений в ГТУ и в конденсатор,

$\delta k_{\text{уд}}^{\text{ПТУ}} = k_{\text{уд}}^{\text{ПТУ}} / k_{\text{уд}}^{\text{к-р}}$ — отношение удельных капиталовложений в ПТУ и в конденсатор, $\delta k_{\text{уд}}^{\text{кy}} = k_{\text{уд}}^{\text{кy}} / k_{\text{уд}}^{\text{к-р}}$ — отношение удельных капиталовложений в котел-утилизатор и в конденсатор.

В качестве примера расчета по предлагаемой методике была определена оптимальная поверхность конденсатора паровой турбины Т-56/70-6,8 в составе бинарной ПГУ – ТЭЦ, выполненной по дубль-блочной схеме и состоящей помимо ПТУ из двух газотурбинных установок V-64.3А и двух котлов-утилизаторов. Технические данные газовой турбины V-64.3А приняты по [3], теплофикационной турбины Т-56/70-6,8 — по [4]. В результате расчета получено, что оптимальная поверхность конденсатора составляет 3536,5 м².

Итак, технико-экономически оптимальное значение поверхности конденсатора зависит от расхода пара в конденсатор, температурных напоров в нем, климатических условий работы ПГУ, соотношения удельных капитальных затрат на элементы бинарной ПГУ – ТЭЦ.

Список литературы

1. Новичков С. В., Попова Т. И. Методика технико-экономической оптимизации поверхности нагрева котла-утилизатора в составе бинарной ПГУ. — Промышленная энергетика, 2012, № 12.
2. Андрищенко А. И., Змачинский А. В., Понятов В. А. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС. — М.: Высшая школа, 1974.
3. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / Под ред. С. В. Цанева. — М.: Изд-во МЭИ, 2002.
4. Баринберг Г. Д., Валамин А. Е. Эффективные паровые турбины ЗАО “Уральский турбинный завод”. — Электрические станции, 2004, № 11.

novishkovsv@mail.ru