

## ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НОРМАТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБИН

Докт. техн. наук, проф. КАЧАН А. Д., инж. ПОПОВА Ю. Б.,  
канд. техн. наук, доц. ПАЩЕНКО А. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Основной характеристикой, определяющей экономичность работы теплофикационных турбин на различных режимах, является расходная (или энергетическая) характеристика – зависимость расхода теплоты  $Q_0$  на входе в турбогенератор от его нагрузок. В общем случае расход теплоты на входе в турбогенератор является функцией многих переменных: электрической мощности, нагрузок регулируемых отборов, параметров свежего пара и пара отборов, давления в конденсаторе, особенностей схемы регенерации и т. д.

Исходные нормативные энергетические характеристики (НЭХ) турбин типа ПТ обычно представляют в зависимости от трех основных параметров (электрической мощности  $N$ , нагрузок производственного  $Q_{\text{п}}$  и теплофикационного отборов  $Q_{\text{т}}$ ) при фиксированных значениях остальных, на изменения которых вводятся надлежащие поправки.

В Беларуси (в работах БЭРН) принят метод представления исходной НЭХ в виде двух квадрантов. Соответствующий вид исходной НЭХ для турбины ПТ-25-90/10 Минской ТЭЦ-3 приведен на рис. 1, 2.

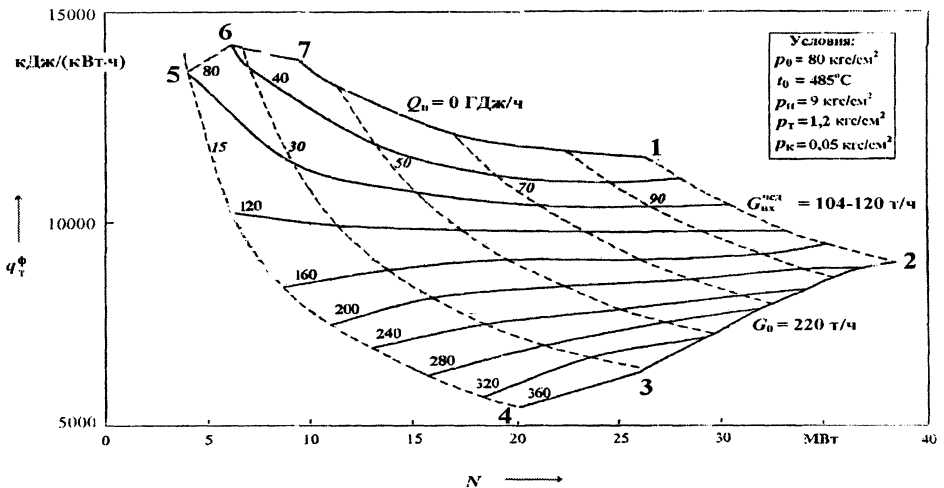


Рис. 1. Зависимость фиктивного удельного расхода теплоты brutto  $q_{\text{т}}^{\phi}$  от электрической мощности  $N$  и нагрузки производственного отбора  $Q_{\text{п}}$  (НЭХ турбины ПТ-25-90/10)

Верхний квадрант (рис. 1) рассматриваемой НЭХ представляет собой зависимость фиктивного удельного расхода теплоты brutto  $q_{\text{т}}^{\phi}$  от электрической мощности турбины  $N$  и отпуска теплоты в производственный

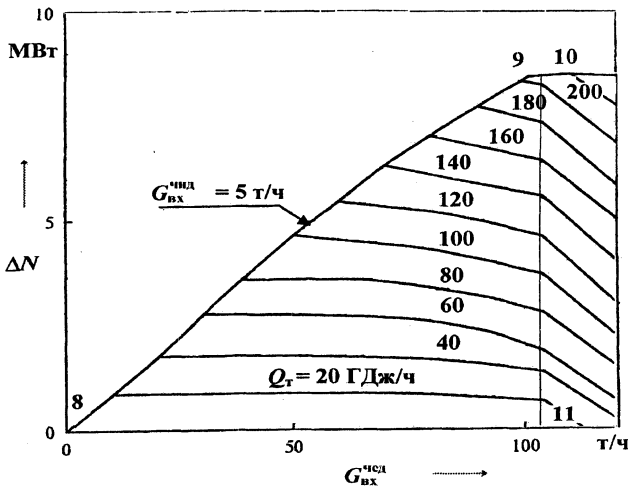


Рис. 2. График определения уменьшения мощности турбины  $\Delta N$  при включении Т-отбора (НЭХ турбины ПТ-25-90/10)

отбор  $Q_n$  для случая, когда нагрузка теплофикационного отбора  $Q_t$  равна нулю. При включении теплофикационного отбора ( $Q_t > 0$ ) электрическая мощность турбины уменьшается на некоторую величину  $\Delta N$ , которую можно определить по нижнему квадранту (рис 2). Тогда для нахождения удельного расхода теплоты брутто  $q_t$  при некоторых значениях нагрузок  $Q_n$ ,  $Q_t$ ,  $N$  необходимо сначала принять первоначальную поправку к мощности турбины  $\Delta N$ , определенную для соответствующей линии  $Q_t = \text{const}$  (рис. 2). Затем по  $Q_n$  и  $N + \Delta N$  определяется расход пара  $G_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  на входе в часть среднего давления (ЧСД) турбины (рис. 1). Далее по  $G_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  и  $Q_t$  находится уточненная поправка к мощности турбины  $\Delta N'$  на включение Т-отбора (рис. 2). Затем по  $N + \Delta N'$  и  $Q_n$  можно найти фиктивный удельный расход теплоты брутто  $q_t^\Phi$  (рис. 1), а также искомый удельный расход теплоты брутто

$$q_t = \frac{q_t^\Phi (N + \Delta N') - Q_n \cdot 10^3}{N}.$$

Используя полученный с помощью НЭХ удельный расход теплоты брутто, можно определить расход теплоты  $Q_0$  в свежем паре на турбину

$$Q_0 = q_t N \cdot 10^{-3} + Q_n + Q_t = q_t^\Phi (N + \Delta N') \cdot 10^{-3} + Q_n.$$

Для применения данной НЭХ при решении задачи внутростанционной оптимизации ее необходимо формализовать, т. е. представить в аналитическом виде. Для этого авторы предлагают рассматривать НЭХ как две поверхности, ограниченные линиями 1-2-3-4-5-6-7 (рис. 1) и 8-9-10-11 (рис. 2) соответственно. Линии 1-2, 2-3 ограничивают максимально возможное фиктивное значение электрической мощности (т. е. с учетом поправки  $\Delta N$  на включение Т-отбора) турбины для некоторой фиксированной нагрузки  $Q_n$ . Аналогичным образом линии 7-6, 6-5, 5-4 представляют

собой границу допустимых минимально возможных фиктивных значений электрической мощности турбины для фиксированных нагрузок  $Q_n$ . Рассматривая поверхность 8–9–10–11, можно заметить, что при включении Т-отбора линия 8–9, с одной стороны, представляет ограничение первоначальной поправки  $\Delta N$  к электрической мощности турбины, а с другой – ограничение на минимально возможный расход пара на входе в ЧСД. Линия 10–11 позволит определить уточненную поправку к мощности турбины на включение Т-отбора при максимальных значениях расхода пара в ЧСД (104 – 120 т/ч).

Учитывая изложенное выше, необходима серия аппроксимаций для получения функциональных зависимостей рассматриваемых поверхностей и ограничивающих линий с целью дальнейшего их использования в алгоритме построения аналитической модели НЭХ:

- аппроксимация линий 1–2, 2–3 (рис. 1), которые являются зависимостями фиктивной максимальной электрической мощности турбины от нагрузок производственного отбора, т. е.  $N^{\phi \max} = f(Q_n)$ ;

- аппроксимация линий 7–6, 6–5, 5–4 (рис. 1), которые представляют собой зависимости минимальной фиктивной электрической мощности турбины от нагрузок производственного отбора, т. е.  $N^{\phi \min} = f(Q_n)$ ;

- аппроксимация линии 8–9 (рис. 2) для получения функциональной зависимости первоначальной поправки к электрической мощности турбины при включении теплофикационного отбора, т. е.  $\Delta N = f(Q_T)$ ;

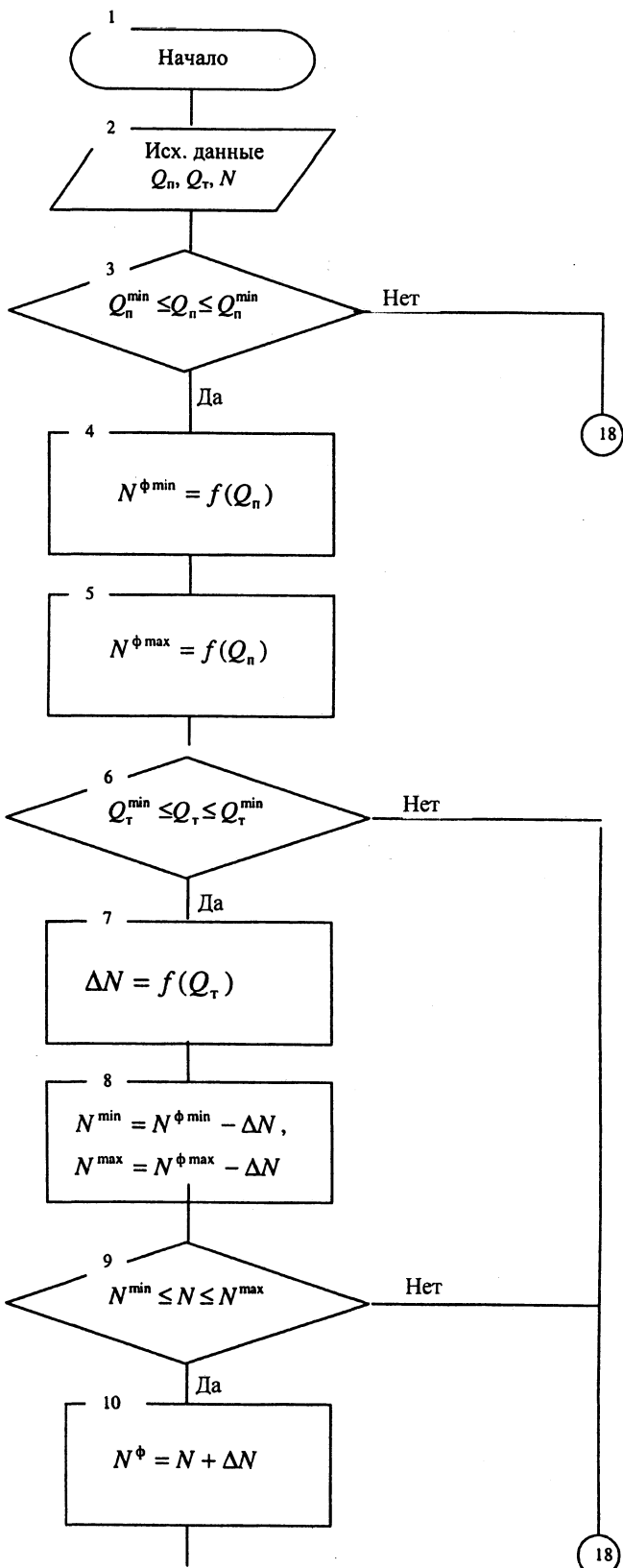
- аппроксимация поверхности 1–2–3–4–5–6–7 (рис. 1) для получения функциональной зависимости расхода пара  $G_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  на входе в ЧСД от нагрузки производственного отбора  $Q_n$  и фиктивной мощности турбины  $N^{\phi}$ , т. е.  $G_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}} = f(Q_n, N^{\phi})$ , где  $N^{\phi} = N + \Delta N$ ;

- аппроксимация линии 8–9 (рис. 2) для получения функциональной зависимости минимально возможного расхода пара на входе в ЧСД при включении теплофикационного отбора, т. е.  $G_{\text{вх}}^{\text{ЧСД min}} = f(Q_T)$ ;

- аппроксимация поверхности 8–9–10–11 (рис. 2) для получения функциональной зависимости уточненной поправки к электрической мощности турбины от нагрузки теплофикационного отбора и расхода пара на входе в ЧСД, т. е.  $\Delta N' = f(Q_T, G_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}})$ ;

- аппроксимация поверхности 1–2–3–4–5–6–7 (рис. 1) для получения функциональной зависимости фиктивного удельного расхода теплоты брутто от нагрузки производственного отбора и уточненной фиктивной мощности, т. е.  $q_T^{\phi} = f(Q_n, N'^{\phi})$ , где  $N'^{\phi} = N + \Delta N'$ .

Тогда по алгоритму построения аналитической модели НЭХ (рис. 3) можно для любого сочетания нагрузок  $Q_n$ ,  $Q_T$ ,  $N$  определить расход теплоты на турбину в свежем паре, если, конечно, данный режим является допустимым.



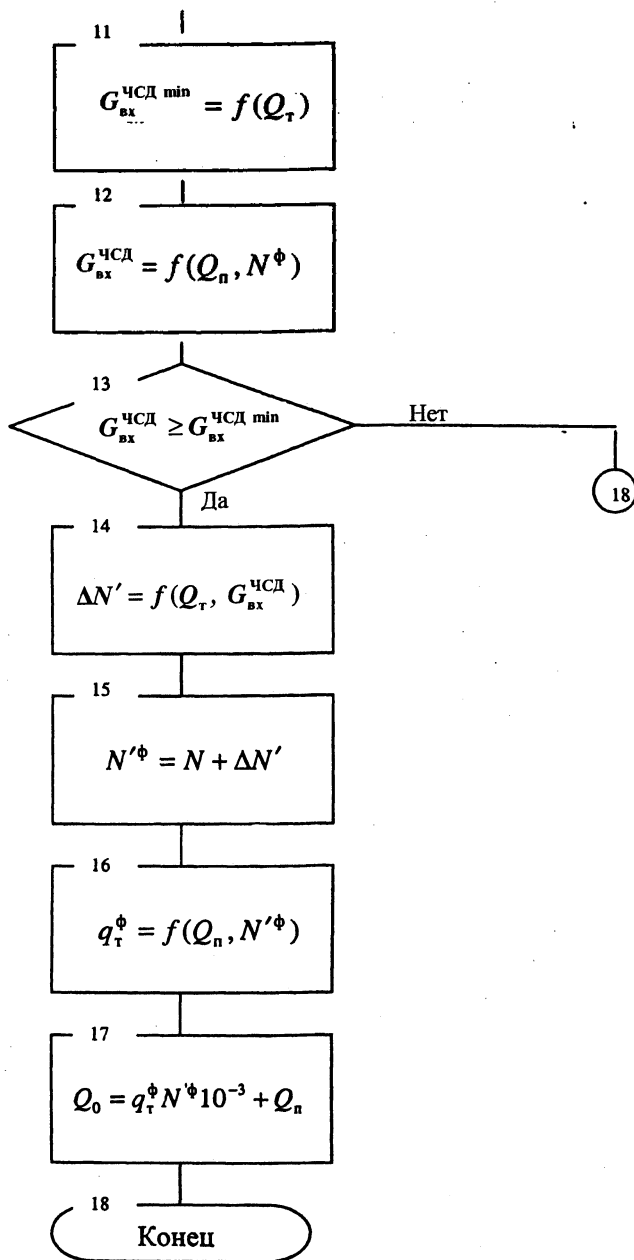


Рис. 3. Схема алгоритма для построения аналитической модели НЭХ

Поскольку рассматриваемая НЭХ действительна только при номинальных значениях давлений в регулируемых отборах, при отклонении хотя бы одного из них необходимо скорректировать полученную аналитическую модель НЭХ. Соответствующую корректировку требуется также проводить в случае полной или частичной утилизации теплоты отработавшего пара, например за счет подогрева в конденсаторах сырой воды. Рассмотрим алгоритмы корректировок аналитической модели НЭХ отдельно для каждого случая.

**Случай 1. Корректировка аналитической модели НЭХ на фактическое значение давления пара в производственном отборе.**

При работе турбины со значением давления в П-отборе, отличным от нормативного, происходит изменение мощности ЧВД, а также расходов теплоты и пара на входе в турбину. Поэтому требуемую корректировку можно осуществить по алгоритму:

1. Вычисляется расход пара на турбину  $D_0$  [т/ч] из соотношения

$$Q_0 = D_0(h_0 - h_{\text{нв}}(D_0)) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $Q_0$  – расход теплоты на турбину, определенный по нескорректированной модели НЭХ, ГДж/ч;  $h_0$  – энтальпия свежего пара – табличная величина, определяемая по начальным параметрам пара (давлению  $p_0$  и температуре  $t_0$ ), кДж/кг;  $h_{\text{нв}}(D_0)$  – энтальпия питательной воды в функции от расхода свежего пара, полученная путем аппроксимации соответствующей кривой НЭХ, кДж/кг.

Уравнение (1) можно решить методом подбора  $h_{\text{нв}}$  или  $D_0$ .

2. Рассчитывается поправка к мощности ЧВД турбины  $\Delta N^{\text{ЧВД}}$  [МВт]

$$\Delta N^{\text{ЧВД}} = D_0 \left( \Delta \bar{N} \left( \frac{p_n}{D_0} \right) - \Delta \bar{N} \left( \frac{p_n^\phi}{D_0} \right) \right), \quad (2)$$

где  $\Delta \bar{N} \left( \frac{p_n}{D_0} \right)$  и  $\Delta \bar{N} \left( \frac{p_n^\phi}{D_0} \right)$  – соответственно относительные поправки к мощности по универсальной кривой для ЧВД турбины при фиксированном для НЭХ значении  $p_n$  и фактическом давлении в П-отборе  $p_n^\phi$ .

3. Определяются уточненные мощность и расход теплоты на турбину для первого рассматриваемого случая при работе турбины:

а) по тепловому графику:

$$N^{\text{ур1}} = N + \Delta N^{\text{ЧВД}}; \quad (3)$$

$$Q_0^{\text{ур1}} = Q_0 + 3,6 \Delta N^{\text{ЧВД}}; \quad (4)$$

б) по электрическому графику:

$$N^{\text{ур1}} = N; \quad (5)$$

$$Q_0^{\text{ур1}} = Q_0 - \Delta N^{\text{ЧВД}}(r_k - r_{\text{тф}}), \quad (6)$$

где  $N$ ,  $Q_0$  – показатели работы турбин по НЭХ без корректировки; 3,6 – термический эквивалент 1 МВт·ч в ГДж;  $r_k, r_{\text{тф}}$  – приросты расхода теплоты на конденсационную и теплофикационную выработки электроэнергии.

По линейным энергетическим характеристикам турбин ПТ-25-90/10 [2, 3] с учетом работы их на МТЭЦ-3 со сниженными начальными параметрами пара можно принять  $r_k \approx 10,5$  ГДж/(МВт·ч) (2,5 Гкал/(МВт·ч)),  $r_{тф} \approx 3,7$  ГДж/(МВт·ч) (0,88 Гкал/(МВт·ч)).

**Случай 2. Корректировка аналитической модели НЭХ на фактическое значение давления пара в теплофикационном отборе.**

При работе турбины со значением давления в Т-отборе, отличным от номинального, корректировку модели НЭХ можно осуществить по следующему алгоритму:

1. Вычисляется расход пара  $D_0$  на турбину из соотношения (1).

2. Находится расход пара на выходе из ЧВД турбины  $D_{\text{вых}}^{\text{ЧВД}} = f(D_0)$ , полученный путем аппроксимации соответствующей кривой НЭХ.

3. Определяется расход пара на входе в ЧСД

$$D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}} \approx D_{\text{вых}}^{\text{ЧВД}} - \frac{Q_{\text{п}}}{q_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где  $q_{\text{п}}$  – удельная (на 1 т/ч расхода пара) нагрузка П-отбора, приближенно равная 2,5 ГДж/(т·ч) (0,6 Гкал/(т·ч)).

4. Рассчитывается поправка к мощности ЧСД турбины  $\Delta N^{\text{ЧСД}}$  [МВт]

$$\Delta N^{\text{ЧСД}} = D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}} \left( F \left( \frac{P_{\tau}}{D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}} \right) - F \left( \frac{P_{\tau}^{\phi}}{D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}} \right) \right), \quad (8)$$

где  $F(\cdot)$  – функция изменения мощности ЧСД турбины в зависимости от относительного давления в теплофикационном отборе, полученная путем аппроксимации соответствующей поправочной кривой.

5. Определяются уточненные мощность и расход теплоты на турбину для второго рассматриваемого случая при работе турбины:

а) по тепловому графику:

$$N^{\text{ут2}} = N + \Delta N^{\text{ЧСД}}; \quad (9)$$

$$Q_0^{\text{ут2}} = Q_0 + 3,6N^{\text{ЧСД}}; \quad (10)$$

б) по электрическому графику:

$$N^{\text{ут2}} = N; \quad (11)$$

$$Q_0^{\text{ут2}} = Q_0 - \Delta N^{\text{ЧСД}}(r_k - r_{тф}). \quad (12)$$

**Случай 3. Корректировка аналитической модели НЭХ на утилизацию теплоты отработавшего пара за счет подогрева в конденсаторах сырой воды.**

При полном использовании охлаждающей воды после конденсатора в качестве сырой обеспечивается утилизация теплоты как минимально-

вентиляционного расхода пара в конденсатор, так и теплоты сливов по линии рециркуляции, т. е. утилизируемая теплота:

$$Q_y = D_k^{\min} (h_k - h'_k) \cdot 10^{-3} + Q_{\text{рец}}, \text{ ГДж/ч}, \quad (13)$$

где  $D_k^{\min}$  – минимально-вентиляционный расход пара в конденсатор, т/ч (его значение указывается в НЭХ);  $h_k$  – энтальпия отработавшего пара (см. ниже);  $h'_k$  – энтальпия насыщения воды при нормативном давлении в конденсаторе;  $Q_{\text{рец}}$  – расход теплоты по линии рециркуляции, принимается по данным НЭХ, ГДж/ч.

Так как при минимальном расходе пара в конденсатор и нормальном вакууме мощность ЧНД близка к нулю, приближенно можно принять  $h_k \approx h_t$ , где  $h_t$  – энтальпия пара в отопительном отборе.

Величина  $h_t$  зависит от режима работы турбины и с использованием ее НЭХ может быть определена по следующему алгоритму:

1. Находится энтальпия пара в П-отборе  $h_n$  в зависимости от расхода свежего пара  $D_0$  при номинальном давлении  $p_n$  по функции, полученной путем аппроксимации соответствующей кривой НЭХ.

2. В случае равенства фактического давления в П-отборе  $p_n^\phi$  и номинального  $p_n$  осуществляется переход к следующему пункту алгоритма, иначе – определяется уточненная энтальпия пара в П-отборе  $h_n^{yt}$

$$h_n^{yt} = h_n + \Delta h_n, \quad (14)$$

где  $h_n$  – энтальпия пара в П-отборе, рассчитанная в п. 1;  $\Delta h_n$  – поправка к энтальпии пара на величину относительного давления в П-отборе, определяемая как

$$\Delta h_n = \Delta h_n^{\text{отн}} \left( \frac{p_n}{D_{\text{вых}}^{\text{ЧВД}}} \right) - \Delta h_n^{\text{отн}} \left( \frac{p_n^\phi}{D_{\text{вых}}^{\text{ЧВД}}} \right). \quad (15)$$

Здесь  $\Delta h_n^{\text{отн}}(\cdot)$  – найденная по НЭХ функция изменения энтальпии пара в П-отборе от относительной величины давления в отборе;  $D_{\text{вых}}^{\text{ЧВД}}$  – расход пара на выходе из ЧВД турбины в зависимости от  $D_0$ , полученный путем аппроксимации соответствующей кривой НЭХ.

3. Вычисляется приближенный расход пара на входе в ЧСД  $D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  по (7).

4. Определяется энтальпия пара в Т-отборе  $h_t$  при номинальном давлении пара в отопительном отборе в зависимости от  $h_n^{yt}$  и  $D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  или  $D_0$  и  $D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  путем аппроксимации имеющихся данных НЭХ.



5. При равенстве значений фактического  $p_{\tau}^{\phi}$  и номинального  $p_{\tau}$  давлений в Т-отборе производится выход из алгоритма, в противном случае необходимо ввести поправку  $\Delta h_{\tau}$ , при этом уточненное значение энтальпии пара в отборе

$$h_{\tau}^{y\tau} = h_{\tau} + \Delta h_{\tau}, \quad (16)$$

где

$$\Delta h_{\tau} = F_{\tau} \left( \frac{p_{\tau}^{\phi}}{D_{\text{вых}}^{\text{ЧСД}}} \right) - F_{\tau} \left( \frac{p_{\tau}}{D_{\text{вых}}^{\text{ЧСД}}} \right). \quad (17)$$

Здесь  $F_{\tau}(\cdot)$  – функция изменения энтальпии пара в теплофикационном отборе от относительной величины давления в нем, полученная путем аппроксимации соответствующей поправочной кривой;  $D_{\text{вых}}^{\text{ЧСД}}$  – расход пара на выходе ЧСД турбины, определяется по данным НЭХ в зависимости от расхода пара на входе в ЧСД  $D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}}$  по функции, полученной путем аппроксимации данных НЭХ.

В случае частичной утилизации теплоты отработавшего пара утилизируемая теплота  $Q_y$  может быть определена как

$$Q_y = C_p^b G_{\text{св}} (t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}), \quad (18)$$

где  $C_p^b$  – теплоемкость воды;  $G_{\text{св}}$  – расход сырой воды;  $t_{\text{в1}}$  – температура воды на входе в конденсатор, задается по фактическим данным;  $t_{\text{в2}}$  – температура воды на выходе из конденсатора, которую можно рассчитать по формуле

$$t_{\text{в2}} = t_{\text{к}}^{\text{н}} - \delta t_{\text{к}}; \quad (19)$$

$t_{\text{к}}^{\text{н}}$  – температура насыщения пара в конденсаторе, определяемая по функциональной зависимости от давления в конденсаторе  $p_{\text{к}}$ ;  $\delta t_{\text{к}}$  – температурный напор в конденсаторе, принимаемый по данным НЭХ.

Учитывая изложенное выше, можно найти уточненные мощность и расход теплоты на турбину для третьего случая при работе турбины:

а) по тепловому графику:

$$N^{y\tau3} = N - Q_y W_{\tau} \cdot 10^{-3}; \quad (20)$$

$$Q_0^{y\tau3} = Q_0 - Q_y \left( 1 + \frac{W_{\tau}}{277} \right); \quad (21)$$

б) по электрическому графику:

$$N^{y\tau3} = N; \quad (22)$$

$$Q_0^{ут3} = Q_0 - Q_y(1 - W_T(r_k - r_{тф})), \quad (23)$$

где  $Q_y$  – утилизируемая теплота при полной или частичной утилизации, определяемая по (13) или (18) соответственно;  $W_T$  – удельная выработка электроэнергии для Т-отбора, полученная по функциональной зависимости от  $D_0$  и  $Q_T$  путем аппроксимации соответствующей кривой НЭХ, кВт·ч/ГДж; 277 – эквивалент 1 ГДж теплоты в кВт·ч.

При отклонении давления в конденсаторе от нормативного, корректировка мощности турбины может производиться известным способом с использованием универсальной кривой поправок на вакуум.

Тестовые расчеты показали, что данная методика корректировки НЭХ обеспечивает удовлетворительную сходимость результатов с методом детальных расчетов и может быть использована при разработке математических моделей теплофикационных турбин. Она была испытана при оптимизации режимов работы турбин первой очереди МТЭЦ-3.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен метод построения аналитических моделей нормативных энергетических характеристик теплофикационных турбин типа ПТ.
2. Разработаны алгоритмы корректировок этих моделей на изменения давления пара в регулируемых отборах от номинальных значений, а также с учетом полной или частичной утилизации теплоты отработавшего пара за счет подогрева в конденсаторах сырой воды.
3. Описанные выше алгоритмы были использованы при разработке программного обеспечения для оптимизации режимов работы турбин первой очереди МТЭЦ-3.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теплоэнергетика электрических станций: Справ. пособие / Под общ. ред. А. М. Леонкова и Б. В. Яковлева. – Мн.: Беларусь, 1974. – 368 с.
2. Технико-экономические основы развития теплофикации в энергосистемах / Под ред. Г. Б. Левенталя и Л. А. Мелентьева. – М.: ГЭИ, 1961. – 319 с.

Представлена кафедрой ПОВТ и АС

Поступила 25.07.2002