

К. П. Д. И ДАВЛЕНИЯ ОТБОРОВ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЦИКЛА

ФУКС Г. И.

Профессор, доктор технических наук

Коэффициент полезного действия

В работе „Средне-термодинамическая температура“ была получена общая формула для подсчета к.п.д. регенеративного цикла

$$\eta_p = 1 - \frac{g_k}{g_1} \frac{T_k \Delta S_k}{T' \Delta S'} \quad (1)$$

Далее было показано, что это выражение может быть написано так:

$$\eta_p = 1 - \frac{i_{01} - i'_{01}}{i_1 - i'_{01}} \cdot \frac{i_{02} - i'_{02}}{i_{01} - i'_{02}} \dots \frac{i_{0n} - i'_{0n}}{i_{0(n-1)} - i'_{0n}} \cdot \frac{i_k - i'_k}{i_{0n} - i'_k} \quad (2)$$

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n)(1 - \eta_{(n+1)}) \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

g_k и g_1 — количество пара, идущее в конденсатор и вырабатываемое в котле (на 1 кг топлива); T_k и ΔS_k — средне-термодинамическая температура и изменение энтропии пара в конденсаторе; T' и $\Delta S'$ — те же величины для котельной установки; i_1, i'_1, i_k, i'_k — энтальпии пара и воды в котле и конденсаторе. Энтальпии пара и воды в отборах отмечены значком 0 с цифрой, показывающей № отбора (от котла). Так, i_{02} и i'_{02} обозначают энтальпию пара при давлении 2-го отбора и энтальпию воды при давлении 3-го отбора.

Формулы (2) и (3) выведены при следующих ограничениях:

а) адиабатическое расширение пара в машине;

б) применение смешивающих подогревателей.

Нетрудно, однако, показать, что эти формулы могут быть обобщены. При смешивающих подогревателях и любой линии расширения пара 1 К (см. рис. 1) имеем балансовые уравнения подогревателей:

$$(g_1 - g_2)(i_{01} - i'_{01}) = g_2(i'_{01} - i_{02}')$$

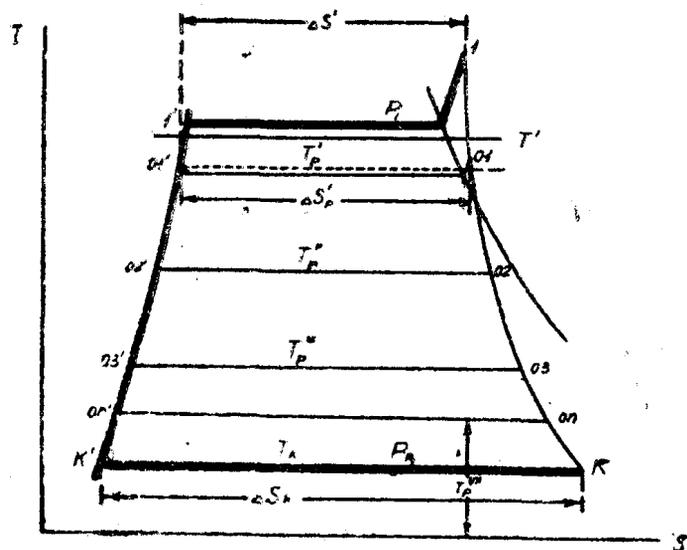


Рис. 1

$$(g_2 - g_3)(i_{02} - i_{02}') = g_3(i_{02}' - i_{03}'), \quad (4)$$

⋮

$$(g_n - g_k)(i_{0n} - i_{0n}') = g_k(i_{0n}' - i_{k'}),$$

откуда

$$\frac{g_k}{g_1} = \frac{i_{01} - i_{01}'}{i_{01} - i_{03}'} \frac{i_{02} - i_{02}'}{i_{02} - i_{03}'} \dots \frac{i_{0n} - i_{0n}'}{i_{0n} - i_{k'}}. \quad (5)$$

Так как согласно определению средне-термодинамической температуры

$$T_k \Delta S_k = i_k - i_{k'}$$

и

$$T' \Delta S' = i_1 - i_{01}', \quad (6)$$

то из (1), (5) и (6) получается

$$\eta_p = 1 - \frac{i_{01} - i_{01}'}{i_1 - i_{01}'} \frac{i_{02} - i_{02}'}{i_{01} - i_{02}'} \dots \frac{i_{0n} - i_{0n}'}{i_{0(n-1)} - i_{0n}'} \frac{i_k - i_{k'}}{i_{0n} - i_{k'}}. \quad (2)$$

С другой стороны, для каждого из циклов 1 01 01' 1' 1, 01 02 02' 01' 01 и т. д. имеем:

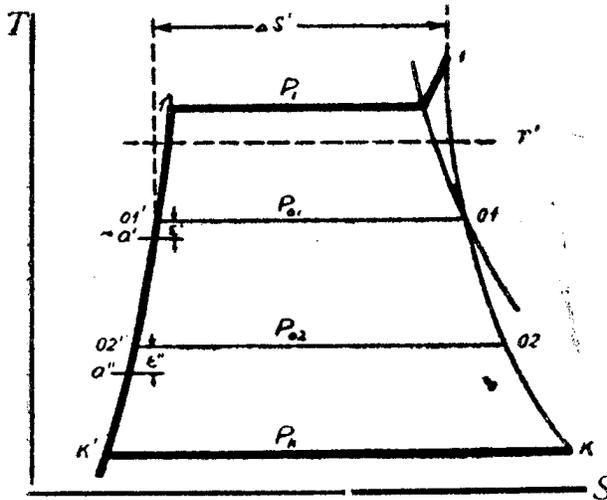


Рис. 2

$$\eta_{11} = \frac{i_1 - i_{01}}{i_1 - i_{01}'}, \quad (7)$$

$$\eta_{12} = \frac{i_{01} - i_{02}}{i_{01} - i_{02}'}$$

Из (2) и (7) получается соотношение (3).

Если в установке поставлены не смешивающие, а поверхностные подогреватели, причем дренаж (конденсат) каждого отбора подается насосом в питательную линию возле подогревателя (безразлично, впереди или после подогревателя), то в каждом подогревателе используется тепло

конденсации пара и тепло конденсата, как и в смешивающих подогревателях. Разница заключается в том, что здесь неизбежно будет иметься недогрев воды до температуры отбора ε', ε''... и т. д. (см. рис. 2). Таким образом, состояние воды после подогревателей будет изображено точками a', a''... (рис. 2).

Балансовые уравнения подогревателей в этом случае запишутся так:

$$(g_1 - g_2)(i_{01} - i'_{a'}) = g_2(i'_{a'} - i'_{a''}),$$

$$(g_2 - g_3)(i_{02} - i'_{a''}) = g_3(i'_{a''} - i'_{a'''}),$$

⋮

$$(g_n - g_k)(i_{0n} - i'_{a^{(n)}}) = g_k(i'_{a^{(n)}} - i_{k'}), \quad (8)$$

откуда

$$\frac{g_k}{g_1} = \frac{i_{01} - i'_{a'}}{i_{01} - i'_{a''}} \frac{i_{02} - i'_{a''}}{i_{02} - i'_{a'''}} \dots \frac{i_{0n} - i'_{a^{(n)}}}{i_{0n} - i_{k'}}. \quad (9)$$

Далее, очевидно,

$$T_k \Delta S_k = i_k - i'_k, \quad (10)$$

$$T' \Delta S' = i_1 - i'_a.$$

Из (1) с учетом (9) и (10)

$$\eta_p = \frac{i_{01} - i'_a}{i_1 - i'_a} \frac{i_0^2 - i_a''}{i_{01} - i'_a} \dots \frac{i_k - i'_k}{i_{0n} - i_k} \quad (11)$$

Далее, очевидно, соотношение (3) применимо и в данном случае, так как для отдельных циклов

$$\eta_1 = \frac{i_1 - i_{01}}{i_1 - i'_a}, \quad (12)$$

$$\eta_2 = \frac{i_{01} - i_{02}}{i_{01} - i'_a}$$

и т. д.

Наконец, соотношения (3) и (11) принципиально применимы также при каскадном включении подогревателей с отводом всех дренажей в любую точку на питательной линии или в следующий по порядку подогреватель. В этих случаях надо вести расчет по „условным“ недогревам, которые получились бы при подаче дренажа в питательную линию возле самого подогревателя. Условные недогревы вычисляются в зависимости от особенностей данной схемы включения подогревателей. При схеме по рис. 3, по которой дренаж всех подогревателей отводится в питательную линию за последним подогревателем или непосредственно в конденсатор, условные недогревы вычисляются из следующих соображений.

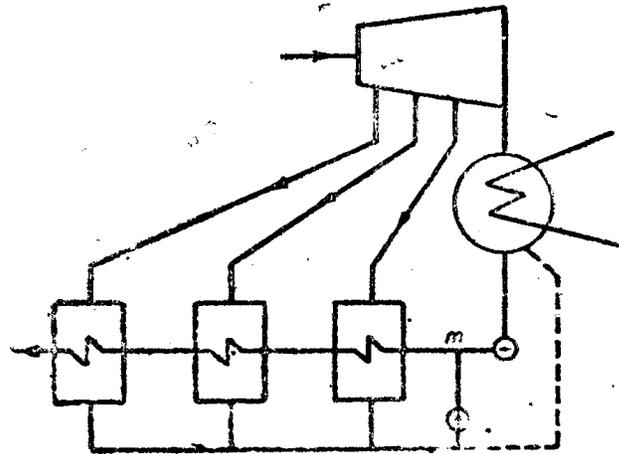


Рис. 3

При данных отборах пара окончательный результат нагрева питательной воды не зависит от точки включения дренажей в питательную линию, т. е., действительный и условный недогрев первого подогревателя одинаковы, или

$$y' = \epsilon'. \quad (13)$$

Для подсчета условного недогрева 2-го подогревателя составляем уравнения.

1. Балансовое уравнение первого подогревателя

$$(g_1 - g_2) T'_p \Delta S'_p = g_1 (\Delta q' - \epsilon' + \epsilon''). \quad (14)$$

2. Условное балансовое уравнение 1-го подогревателя (составляется при тех же количествах g_1 и g_2 , что имеет место фактически, и подаче дренажа непосредственно около 1-го подогревателя)

$$(g_1 - g_2) (T'_p \Delta S'_p + \epsilon') = g_2 (\Delta q' - \epsilon' + y''). \quad (15)$$

Исключая из (14) и (15) g_1 и g_2 , получим

$$y'' = \frac{\epsilon'' + \Delta q' a_1}{1 - a_1}, \quad (16)$$

где

$$a_1 = \frac{\Delta q' - \varepsilon' + \varepsilon''}{T'_p \Delta S'_p} = \frac{\Delta q_1}{T'_p \Delta S'_p}, \quad (17)$$

или

$$a_1 = \frac{i'_{a'} - i'_{a''}}{i_{01} - i'_{01}} \quad (17')$$

(см. рис. 2).

Для определения условного недогрева 3-го подогревателя записывается балансовое уравнение 2-го подогревателя

$$(g_2 - g_3) T''_p \Delta S_p'' = g_1 (\Delta q'' - \varepsilon'' + \varepsilon''') \quad (18)$$

и условное балансовое уравнение этого же подогревателя

$$(g_2 - g_3) (T''_p \Delta S_p'' + y'') = g_3 (\Delta q'' - y'' + y'''). \quad (19)$$

Исключая из (18) и (19) g_2 и g_3 , получим, с учетом (16) и (17),

$$y'' = \frac{\varepsilon''' + (\Delta q' + \Delta q'') a_1 + \Delta q'' a_2}{1 - (a_1 + a_2)}, \quad (20)$$

где

$$a_2 = \frac{\Delta q'' - \varepsilon'' + \varepsilon'''}{T''_p \Delta S''_p} = \frac{\Delta q_2}{T''_p \Delta S''_p}, \quad (21)$$

или

$$a_2 = \frac{i'_{a''} - i'_{a'''} }{i_{02} - i'_{02'}}. \quad (21')$$

Для условного недогрева четвертого подогревателя получаем из балансовых уравнений 3-го подогревателя

$$y^{iv} = \frac{\varepsilon^{iv} + (\Delta q' + \Delta q'' + \Delta q''') a_1 + (\Delta q'' + \Delta q''') a_2 + \Delta q''' a_3}{1 - (a_1 + a_2 + a_3)}, \quad (22)$$

где

$$a_3 = \frac{i'_{a'''} - i'_{a^{iv}}}{i_{03} - i'_{03}}. \quad (23)$$

Вообще для условного недогрева n -ного подогревателя из балансовых уравнений $(n-1)$ подогревателя получится

$$y^{(n)} = \frac{\varepsilon^{(n)} + (\Delta q' + \Delta q'' + \dots + \Delta q^{(n-1)}) a_1 + (\Delta q'' + \Delta q''' + \dots + \Delta q^{(n-1)}) a_2 + \dots + \Delta q^{(n-1)} a_{n-1}}{1 - (a_1 + a_2 + \dots + a_{n-1})}, \quad (24)$$

где

$$a_{n-1} = \frac{i_a^{(n-1)} - i_a^{(n)}}{i_{0(n-1)} - i'_{0(n-1)}}. \quad (25)$$

При вычисленных таким образом недогревах для подсчета к.п.д. можно применить общие соотношения (11) и (3).

При каскадном включении подогревателей с отводом дренажей в последующий подогреватель по схеме рис. 4 для вычисления недогревов 1-го и 2-го подогревателя применяются те же соотношения (13) и (16), что для предыдущего случая. Балансовые уравнения 2-го подогревателя запишутся так:

1) Действительное:

$$(g_2 - g_3) T_p'' \Delta S_p'' + (g_1 - g_2) \Delta q' = g_1 (\Delta q'' - \varepsilon'' + \varepsilon'''). \quad (26)$$

2) Условное:

$$(g_2 - g_3) (T_p'' \Delta S_p'' + y'') = g_3 (\Delta q'' - y'' + y'''). \quad (19)$$

Из (26) и (19) с учетом (13) и (16) получится

$$y'' = \frac{\varepsilon''' + \Delta q'' [a_2 + (1 - a') a_1]}{1 - [a_2 + (1 - a') a_1]}. \quad (27)$$

Аналогично для условного недогрева 4-го подогревателя получится

$$y^{iv} = \frac{\varepsilon^{iv} + \Delta q''' \{a_3 + (1 - a'') [a_2 + (1 - a') a_1]\}}{1 - \{a_3 + (1 - a'') [a_2 + (1 - a') a_1]\}} \quad (28)$$

и т. д.

Здесь, кроме обозначений, указанных выше, принято:

$$a' = \frac{\Delta q'}{T_p'' \Delta S_p''};$$

$$a'' = \frac{\Delta q''}{T'''_p \Delta S_p'''} \quad (29)$$

и т. д.

После подсчета условных недогревов $y', y'', y''' \dots$ к.п.д. можно подсчитать по (3) или (11).

Очевидно, указанный прием вычисления условных недогревов может служить для приведения схем с любым методом включения подогревателей к простейшей. Это обозначает, что соотношения (3) и (11) могут быть применены для вычисления к.п.д. в разнообразных случаях. Но само собою разумеется, возможно избежать вычисления условных недогревов $y', y'' \dots$, а непосредственно использовать для подсчета к.п.д. соотношение (1), составив формулу для вычисления $\frac{g_k}{g_1}$.

Для схемы по рис. 3 имеем из действительных балансовых уравнений подогревателей (14), (18) и последующих

$$\frac{g_2}{g_1} = 1 - a_1,$$

$$\frac{g_3}{g_1} = 1 - (a_1 + a_2),$$

$$\vdots$$

$$\frac{g_k}{g_1} = 1 - (a_1 + a_2 + \dots + a_n) \quad (30)$$

Подстановка в (1) с учетом (10) дает

$$\eta_p = 1 - \left[1 - (a_1 + a_2 + \dots + a_n) \right] \frac{i_k - i'_k}{i_1 - i'_{01}}. \quad (31)$$

Для непосредственного подсчета к.п.д. при заданных давлениях отборов использование соотношений (31)—(34) и (36)—(37) проще, чем предварительный подсчет условных недогревов, хотя по объему вычислительной работы разница невелика. Но принципиальная возможность свести подсчет к.п.д. во всех случаях к использованию однотипного соотношения (11) важна потому, что позволяет наметить простое решение некоторых общих вопросов, в частности вопроса о подборе наивыгоднейших давлений отборов.

Наивыгоднейшие давления отборов

Вопрос о выборе наивыгоднейших давлений отборов пара при регенеративном процессе служил предметом значительного количества исследований¹⁾. Точного решения этой задачи, однако, до сих пор не имеется.

В случае установки со смешивающими подогревателями этот вопрос решается следующим образом.

Балансовые уравнения подогревателей в данном случае можно записать так:

$$\begin{aligned} (g_1 - g_2) T'_p \Delta S'_p &= g_2 \Delta q', \\ (g_2 - g_3) T''_p \Delta S''_p &= g_3 \Delta q'', \\ &\vdots \\ (g_n - g_k) T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p &= g_k \Delta q^{(n)} \end{aligned} \quad (38)$$

(см. рис. 1),
откуда

$$\frac{g_k}{g_1} = \frac{T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p}{T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p + \Delta q^{(n)}} \cdots \frac{T''_p \Delta S''_p}{T''_p \Delta S''_p + \Delta q''} \frac{T'_p \Delta S'_p}{T'_p \Delta S'_p + \Delta q'}. \quad (39)$$

Из (39) и (1) имеем

$$\eta_p = 1 - \frac{T_k \Delta S_k}{T' \Delta S'} \frac{T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p}{T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p + \Delta q^{(n)}} \cdots \frac{T''_p \Delta S''_p}{T''_p \Delta S''_p + \Delta q''} \frac{T'_p \Delta S'_p}{T'_p \Delta S'_p + \Delta q'}. \quad (40)$$

При неизменном состоянии пара, выходящего в конденсатор, максимум к.п.д. (η_p) совпадает с максимумом функции:

$$U = \frac{T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p + \Delta q^{(n)}}{T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p} \cdots \frac{T''_p \Delta S''_p + \Delta q''}{T''_p \Delta S''_p} \frac{T'_p \Delta S'_p + \Delta q'}{T'_p \Delta S'_p} T' \Delta S'. \quad (41)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} T'_p \Delta S'_p &= b_1, \\ T''_p \Delta S''_p &= b_2, \\ &\vdots \\ T^{(n)}_p \Delta S^{(n)}_p &= b_n. \end{aligned} \quad (42)$$

Величина $T' \Delta S'$ (рис. 1) представляет собою количество тепла, сообщаемое 1 кг пара в котельной установке. Оно складывается из тепла испарения жидкости и перегрева пара

$$r + \Delta i_n = b_0,$$

которое остается неизменным при неизменных параметрах пара, и тепла подогрева жидкости

$$\Delta q_0 = i_1' - i_0'.$$

¹⁾ См. список литературы, стр. 243.

которое изменяется, если меняется давление в первом отборе. В целом

$$T' \Delta S' = b_0 + \Delta q_0. \quad (43)$$

Далее, обозначаем (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} \Delta q^{(n)} &= i_{0n}' - i_k' = X, \\ \Delta q^{(n-1)} &= i'_{0(n-1)} - i_{0n}' = Y - X, \\ &\vdots \\ \Delta q'' &= i_{02}' - i_{03}' = W - V, \\ \Delta q' &= i_{01}' - i_{02}' = Z - W, \\ \Delta q_0 &= i_1' - i_{01}' = A - Z. \end{aligned} \quad (44)$$

Очевидно, A представляет собою полное количество тепла, необходимое для подогрева 1 кг воды от состояния в конденсаторе до начала кипения в котле. При заданных параметрах установки A —постоянная величина.

Учитывая введенные обозначения, выражение (41) можно переписать так:

$$U = \left(1 + \frac{X}{b_n}\right) \left(1 + \frac{Y-X}{b_{n-1}}\right) \dots \left(1 + \frac{W-V}{b_2}\right) \left(1 + \frac{Z-W}{b_1}\right) \left(1 + \frac{A-Z}{b_0}\right). \quad (45)$$

Здесь X, Y, \dots, V, W, Z —независимые переменные, так как давления отборов можно выбрать произвольно. Величины $b_n, b_{n-1}, \dots, b_2, b_1$ должны рассматриваться также, как переменные, причем

$$\begin{aligned} b_n &= \varphi_n (X), \\ b_{n-1} &= \varphi_{n-1} (Y), \\ &\vdots \\ b_2 &= \varphi_2 (W), \\ b_1 &= \varphi_1 (Z). \end{aligned} \quad (46)$$

Это следует из того, что величины X, Y, \dots, W, Z представляют собою, по смыслу обозначений (44) и рис. 1, каждая количество тепла, необходимое для нагрева 1 кг воды от состояния в конденсаторе до состояния кипения в соответствующем подогревателе, т. е., например,

$$\begin{aligned} W &= i_{02}' - i_k', \\ Z &= i_{01}' - i_k' \end{aligned}$$

и т. д. При заданном характере кривой расширения значение X определяет собою $b_n, Y - b_{n-1}, \dots, Z - a_1$ и т. д., что и выражено символически соотношением (46).

Условиями максимума (45) будут

$$\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right) = 0; \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right) = 0; \dots \frac{\partial U}{\partial Z} = 0. \quad (47)$$

С учетом (46) это можно записать так:

$$\frac{U}{1 + \frac{X}{b_n}} \frac{b_n - X}{b_n^2} \frac{db_n}{dX} = \frac{U}{1 + \frac{Y-X}{b_{n-1}}} \frac{1}{b_{n-1}},$$

$$\frac{U}{1 + \frac{Y-X}{b_{n-1}}} \frac{b_{n-1} - (Y-X) \frac{db_{n-1}}{dY}}{b_{n-1}^2} = \frac{U}{1 + \frac{P-Y}{b_{n-2}}} \frac{1}{b_{n-2}},$$

$$\frac{U}{1 - \frac{Z-W}{b_1}} \frac{b_1 - (Z-W) \frac{db_1}{dZ}}{b_1^2} = \frac{U}{1 - \frac{A-Z}{b_0}} \frac{1}{b_0}.$$
(48)

После несложных преобразований легко получить

$$\frac{b_n + X}{1 - \frac{X}{b_n} \frac{db_n}{dX}} + X = b_{n-1} + Y,$$

$$\frac{b_{n-1} + (Y-X)}{1 - \frac{Y-X}{b_{n-1}} \frac{db_{n-1}}{dY}} + Y = b_{n-2} + P,$$

$$\vdots$$

$$\frac{b_1 + (Z-W)}{1 - \frac{(Z-W)}{b_1} \frac{db_1}{dZ}} + Z = A + b_0.$$
(49)

Полученные уравнения (49), число которых равно числу неизвестных X, Y, \dots, Z , представляют собою принципиальное решение поставленной задачи. В первую очередь целесообразно рассмотреть некоторые приближенные решения.

Иногда при рассмотрении вопроса об определении оптимальных давлений отборов делается предположение, что количество тепла, выделяющееся при конденсации пара во всех подогревателях, одно и то же [3], т. е.

$$b_0 = b_1 = b_2 = \dots = b_n = b \quad (50)$$

При этом условии уравнения (49) дают

$$\begin{aligned} 2X &= Y, \\ 2Y - X &= P, \\ &\vdots \\ 2Z - W &= A. \end{aligned}$$
(51)

Если учесть (44), то последние условия можно сформулировать так:

$$\Delta q_0 = \Delta q' = \Delta q'' = \dots = \Delta q^{(n)} = \frac{A}{n+1} \quad (52)$$

Таким образом, если принять условия, выраженные равенствами (50), то оптимальные давления отборов определяются равенством нагрева воды во всех подогревателях.

В наиболее четкой форме это решение было дано в работах Я. М. Рубинштейна [2] и Г. И. Петелина [3].

Но условия (50) можно истолковать иначе и получить другое решение того же вопроса. В самом деле, из (50) следует, что

$$\frac{db_n}{dX} = \frac{db_{n-1}}{dY} = \dots = \frac{db_1}{dZ} = 0. \quad (53)$$

Если ввести величины энтальпии, согласно рис. 1, то условие (53) можно записать в общем виде так:

$$\frac{d(i_0 - i_0')}{d(i_0' - i_k')} = 0, \quad (54)$$

где i_0 — энтальпия пара в произвольной точке на линии расширения 1 К, а i_0' — энтальпия кипящей воды при соответствующем давлении. Таким образом, для любого промежуточного давления по линии расширения

$$i_0 - i_0' = C. \quad (55)$$

Постоянную интегрирования нетрудно определить, если применить уравнения (55) для конденсаторного давления:

$$C = i_k - i_k'. \quad (56)$$

Следовательно,

$$i_0 - i_k = i_0' - i_k'. \quad (57)$$

Последнее обозначает, что принятие условия (53) или (50) равносильно тому, что принимается вполне определенная линейная зависимость между изменениями энтальпии на кривой расширения и на левой пограничной кривой. А так как условие (50) привело нас при отыскании максимума к.п.д. к равенству нагревов воды во всех подогревателях, то отсюда из (57) следует также равенство теплоперепадов между точками отборов, т. е.

$$i_1 - i_{01} = i_{01} - i_{02} = \dots = i_{0n} - i_k = \frac{i_1 - i_k}{n + 1}. \quad (58)$$

Это решение впервые было дано Laurichler'ом [8]. В действительности, конечно, условие (50) и вытекающие из него (53) и (54) соблюдаются лишь приближенно, поэтому подбор оптимальных давлений отборов по (52) и (58) дает различные результаты. При обычном давлении в конденсаторе и не слишком малой величине внутреннего относительного к.п.д. машины прирост энтальпии воды, считая от условий в конденсаторе, идет вначале медленнее, чем прирост энтальпии пара на линии расширения. При высоких давлениях наблюдается обратное явление. При этом соблюдение равенства подогревов воды (52) будет давать более высокие давления отборов пара, чем соблюдение равенства теплоперепадов на линии расширения (58). Действительные оптимальные значения давлений отборов оказываются промежуточными между теми, что определяются указанными выше условиями. Поэтому, например, метод определения максимальных давлений отборов пара, предложенный Гохштейном [4], несмотря на то, что вывод этого метода основан автором на целом ряде явно неверных допущений¹⁾, все-таки дает в общем приемлемые результаты. В самом деле, если считать теплоемкость воды на левой пограничной кривой постоянной, то соотношение (52) можно переписать так:

$$T_1 - T_{01} = T_{01} - T_{02} = \dots = T_{0n} - T_k = \frac{T_1 - T_k}{n + 1}, \quad (59)$$

¹⁾ При выводе Гохштейном принимаются: а) равенство количества воды, протекающей через все подогреватели; б) постоянная теплоемкость кипящей воды.

откуда легко получить формулу для подсчета температуры в подогревателе номера i при n ступенях отбора:

$$T_i = \frac{(n+1-i)T_1 + iT_k}{n+1} \quad (60)$$

Соответственная формула Гохштейна [4]

$$T_i = \sqrt[n+1]{T_1^{n+1-i} T_k^i} \quad (61)$$

очевидно, будет давать при тех же значениях температур меньшие результаты, чем (60). Но так как разница между предельными температурами в цикле паровой установки невелика в сравнении с абсолютными значениями этих температур, то и разница в результатах подсчетов по (60) и (61) получается небольшой.

Отсюда, между прочим, следует, что нет оснований рекомендовать для отыскания оптимальных давлений отборов метод, предложенный Гохштейном, так как он не имеет никаких преимуществ в сравнении с более простым методом равенства нагревов воды во всех ступенях подогрева (52), а подсчеты по (61) не проще, чем по (52).

Применение точных соотношений (49) для подсчета оптимальных давлений отборов затрудняется тем, что не представляется возможным наметить аналитический вид зависимости

$$i_0 - i_0' = f(i_0' - i_k'),$$

т. е. нельзя получить выражений для

$$\frac{db_n}{dX} \cdot \frac{db_{n-1}}{dY} \cdots \frac{db_1}{dZ}$$

Ясно, что вид этой зависимости будет меняться с изменением параметров машины и величины внутреннего относительно к.п.д. η_{10} . К тому же попытки подставить даже простую зависимость этой функции в (49) привело к столь громоздким и сложным уравнениям, что решение их стало возможным только путем подбора.

Между тем, надо считать возможность точного решения поставленной задачи принципиально важной, так как:

а) в некоторых случаях точное решение важно потому, что каждая сотая доля процента выигрыша в к.п.д. установки может дать ощутительную величину в экономии расхода топлива;

б) выбор того или иного приема приближенного решения нельзя сделать сознательно, если нет возможности сравнить результаты этого приема с соответствующими результатами точных вычислений.

На первый взгляд может показаться, что для последней цели можно обойтись подсчетами η_p при разных давлениях отборов, найдя затем по графику максимум η_p . Однако при числе отборов пара $n \geq 3$ необходимо сделать так много вычислений для построения соответственных кривых, что этот прием трудно признать рациональным.

Исходя из этих соображений, мы считаем рациональным дать графоаналитический метод подбора оптимальных давлений по (49), с подсчетом производных, стоящих в знаменателях, графически. Практически этот метод, как показали пробы, дает совершенно точное решение вопроса.

Согласно обозначениям на рис. 1 имеем

$$b_n = i_{0n} - i'_{0n},$$

$$X = i'_{0n} - i_k',$$

следовательно,

$$\frac{db_n}{dX} = \frac{di_{0n}}{di_{0n}'} - 1. \quad (62)$$

Далее

$$b_{n-1} + Y = i_{0(n-1)} - i_{k'}. \quad (63)$$

Из первого уравнения соотношения (49) с учетом (62) и (63) получается:

$$i_{0(n-1)} - i_{k'} = (i_{0n} - i_{0n}') \frac{i_{0n} - i_{k'}}{(i_{0n} - i_{k'}) - (i_{0n}' - i_{k}')} \frac{di_{0n}}{di_{0n}'} + (i_{0n}' - i_{k}'). \quad (64)$$

Аналогичное преобразование для второго уравнения соотношения (49) дает

$$i_{0(n-2)} - i_{k'} = (i_{0(n-1)} - i'_{0(n-1)}) \frac{(i_{0(n-1)} - i'_{0(n-1)}) + (i'_{0(n-1)} - i'_{0n})}{(i_{0(n-1)} - i'_{0n}) - (i'_{0(n-1)} - i'_{0n})} \frac{di_{0(n-1)}}{di'_{0(n-1)}} + (i'_{0(n-1)} - i_{k'}). \quad (65)$$

Наконец, для первого от котла подогревателя получается

$$i_1 - i_{k'} = (i_{01} - i'_{01}) \frac{(i_{01} - i'_{01}) + (i'_{01} - i'_{02})}{(i_{01} - i'_{02}) - (i'_{01} - i'_{02})} \frac{di_{01}}{di'_{01}} + (i_{01}' - i_{k'}). \quad (66)$$

Более удобными для записи формулы получатся, если переменить порядок нумерации подогревателей, т. е. считать первым подогреватель низкого давления и номер подогревателя ставить указателем при скобках. Тогда для подогревателя № 2:

$$(i - i_{k'})_2 = \left[(i - i_{k'}) - (i' - i_{k'}) \right]_1 \frac{(i - i_{k'})_1}{(i - i_{k'})_1 - (i' - i_{k'})_1} \left(\frac{di}{di'} \right)_1 + (i' - i_{k'})_1. \quad (67)$$

Для подогревателя № 3:

$$(i - i_{k'})_3 = \left[(i - i_{k'}) - (i' - i_{k'}) \right]_2 \frac{(i - i_{k'})_2 - (i' - i_{k'})_1}{(i - i_{k'})_2 - (i' - i_{k'})_1 - \left[(i' - i_{k'})_2 - (i' - i_{k'})_1 \right] \left(\frac{di}{di'} \right)_2} + (i' - i_{k'})_2. \quad (68)$$

Для подогревателя № 4:

$$(i - i_{k'})_4 = \left[(i - i_{k'}) - (i' - i_{k'}) \right]_3 \frac{(i - i_{k'})_3 - (i' - i_{k'})_2}{(i - i_{k'})_3 - (i' - i_{k'})_2 - \left[(i' - i_{k'})_3 - (i' - i_{k'})_2 \right] \left(\frac{di}{di'} \right)_3} + (i' - i_{k'})_3. \quad (69)$$

На этой основе намечается следующий метод.

По кривой расширения пара в is координатах отсчитываются соответственные значения энтальпии и давлений (i_0 и p), а по давлениям, по паровым таблицам—соответствующие значения энтальпии кипящей воды (i'_0). По этим данным наносится кривая

$$i_0 - i_{k'} = f(i'_0 - i_{k'})$$

(см. рис. 5).

По этой кривой для ряда точек подсчитывается

$$\frac{di_0}{di_0'} \sim \frac{\delta i_0}{\delta i_0'}$$

и полученные значения наносятся в функции от соответствующих значений $(i_0' - i_k')$ ¹⁾.

Подготовив такой график, переходим к подсчету оптимальных давлений в отборах. Давлением в подогревателе низкого давления (№ 1) задаемся на-глаз или из приближенных соотношений. По этому давлению по паровым таблицам отсчитывается энтальпия жидкости i_0' , и значение $(i_0' - i_k')$ откладывается на чертеже (рис. 5, точка а). Далее, построением abc и abdf отсчитываются $(i_0 - i_k)_1$ и $\left(\frac{di_0}{di_0'}\right)_1$.

Подставляя полученные величины в уравнение (67), подсчитываем $(i_0 - i_k)_2$ и это значение откладываем на графике (точка g). Построениями gkm и gknl определяются

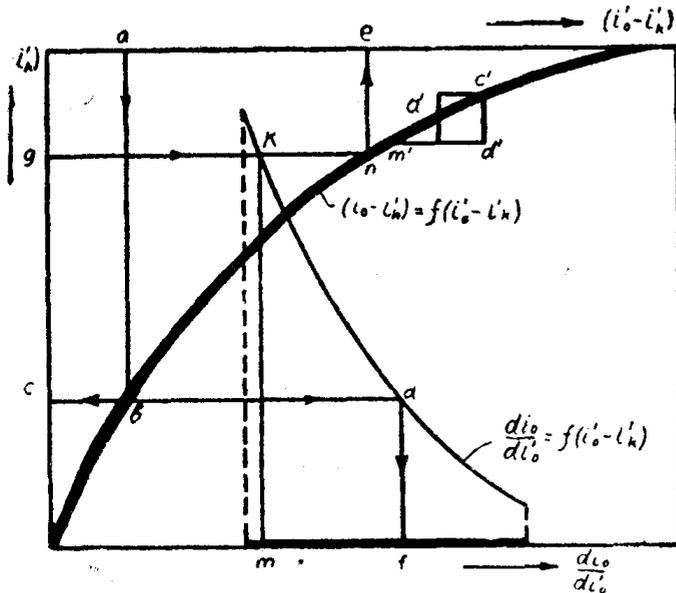


Рис. 5

$$\left(\frac{di_0}{di_0'}\right)_2 \text{ и } (i_0' - i_k')_2,$$

что дает возможность по (68) подсчитать

$$(i - i_k)_3.$$

Если продолжить эти построения и вычисления, то для последнего подогревателя высокого давления получится

$$(i_0 - i_k)_1 = i_1 - i_k',$$

если давление в подогревателе низкого давления (№ 1) задано верно. В противном случае надо вести подсчеты, задаваясь новыми значениями давлений в подогревателе № 1, до совпадения. Когда оно достигнуто, по паровым таблицам отсчитывают по i_0' соответствующие значения давлений отборов пара.

В таблице № 1 даны результаты соответственных подсчетов для случая: котельное давление $p_1 = 80$ ата, t перегрева— 425°C , давление в конденсаторе $p_k = 0,04$ ата, $\eta_{i_0} = 0,82$, при числе отборов от 1 до 5.

Приняты следующие обозначения:

L — расчет по формуле (58) (Laupichler);

¹⁾ Так, для точки а' (см рис. 5).

$$\frac{di_0}{di_0'} \sim \frac{\delta i_0}{\delta i_0'} = \frac{c'd'}{m'd'}$$

П — расчет по формуле (52) (Петелин);
 Т — расчет по формулам (67), (68), (69) и рис. 5 (точный метод);
 Г — расчет по формуле (61) (Гохштейн).
 В графе С давления отборов подсчитаны как средне-арифметические из граф Л и П.

Таблица 1

	Л	П	С	Г	Т
1 точка отбора					
P_0	3,7	8,0	5,8	3,7	5,8
η_p	36,07	36,11	36,12	36,07	36,12
2 точки отбора					
P_{01}	11,8	21,0	16,4	11,8	16,4
P_{02}	0,87	2,25	1,56	1,05	1,50
η_p	37,00	37,16	37,20	37,19	37,21
3 точки отбора					
P_{01}	19,5	31,0	25,2	20,0	29,0
P_{02}	3,70	8,0	5,8	3,7	5,60
P_{03}	0,48	1,05	0,76	0,50	0,68
η_p	37,62	37,60	37,65	37,62	37,66
4 точки отбора					
P_{01}	26,0	39,0	32,5	26,7	34,0
P_{02}	7,7	14,7	11,2	7,6	11,3
P_{03}	1,70	3,90	2,8	1,72	2,70
P_{04}	0,30	0,60	0,45	0,44	0,42
η_p	37,98	37,93	38,00	37,98	38,00
5 точек отбора					
P_{01}	32,0	45,0	38,5	33,0	40,0
P_{02}	12,0	21,0	16,5	11,7	17,0
P_{03}	3,7	8,2	6,0	3,7	5,9
P_{04}	0,98	2,30	1,64	1,00	1,55
P_{05}	0,21	0,41	0,31	0,22	0,282
η_p	38,20	38,21	38,24	38,19	38,24

Из этой таблицы видно, что к.п.д. регенеративного цикла, при тех пределах изменений давлений отборов, которые даются методами равновеликих теплоперепадов на линии расширения и равновеликих подогревов воды в подогревателях, изменяется незначительно. Эти методы действительно дают крайние значения давлений отборов. Но так как за этим относительно узким интервалом давлений, который дают эти методы, к.п.д. сильно падает, то выбор давлений отбора не может быть произвольным. Желательно, конечно, выбрать давление отборов при нормальной нагрузке возможно ближе к оптимальным, так как это дает наименьшее снижение к.п.д. установки при неизбежных в практике колебаниях нагрузки.

С другой стороны, из таблицы 1 видно, что если применить выбор давлений по графе С, то определенные таким путем давления практически не отличаются от оптимальных, определенных точным способом. Так как подбор давлений отбора по обоим крайним методам L и П весьма прост, а давление по методу С подсчитывается, как среднее арифметическое из L и П, то указанный метод надо считать весьма ценным и простым методом подбора оптимальных давлений отборов. В частности, при подборе оптимальных давлений по точным соотношениям рекомендуется прежде всего подсчитать давление в подогревателе низкого давления по методу С и этой величиной задаться при первом варианте точного расчета.

Поверхностные подогреватели

При поверхностных подогревателях с подачей дренажа в питательную линию непосредственно возле подогревателя ¹⁾ будет иметь место недогрев воды до температуры конденсации отборного пара. Обозначим эти недогревы, согласно рис. 2,

$$\begin{aligned}\epsilon' &= i_{01}' - i_{a'}', \\ \epsilon'' &= i_{02}' - i_{a''}', \\ \epsilon^{(n)} &= i_{0n}' - i_{a^{(n)}}'.\end{aligned}\quad (69)$$

Аналогично предыдущему случаю, при тех же обозначениях, можно составить выражение для функции U' , максимум которой совпадает с максимумом к.п.д., в виде

$$\begin{aligned}U' &= \left(1 + \frac{X - \epsilon^{(n)}}{b_n + \epsilon^{(n)}}\right) \left(1 + \frac{Y - \epsilon^{(n-1)} - (X - \epsilon^{(n)})}{b_{n-1} + \epsilon^{(n-1)}}\right) \dots \left(1 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{Z - \epsilon' - (W - \epsilon'')}{b_n + \epsilon'}\right) \left(1 + \frac{A - (Z - \epsilon')}{b_0}\right).\end{aligned}\quad (70)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}b_n + \epsilon^{(n)} &= b'_n, \\ b_{n-1} + \epsilon^{(n-1)} &= b'_{(n-1)}, \\ &\vdots \\ b_1 + \epsilon' &= b'_1,\end{aligned}\quad (71)$$

¹⁾ Безразлично, до или после подогревателя

и

$$\begin{aligned}
 X - \varepsilon^{(n)} &= x', \\
 Y - \varepsilon^{(n-1)} &= y', \\
 &\vdots \\
 Z - \varepsilon' &= z'.
 \end{aligned}
 \tag{72}$$

Тогда

$$U' = \left(1 + \frac{x'}{b'_n}\right) \left(1 + \frac{y' - x'}{b'_{n-1}}\right) \dots \left(1 + \frac{z' - w'}{b'_1}\right) \left(1 + \frac{A - z'}{b_0}\right).
 \tag{73}$$

Сравнивая полученное выражение с (45) легко установить их идентичность. Следовательно, условия максимума (73) также будут идентичны с (45), т. е. будут

$$\begin{aligned}
 \frac{b'_n + x'}{1 - \frac{x'}{b'_n} \frac{db'_n}{dx'}} + x' &= b'_{n-1} + y', \\
 \frac{b'_{n-1} + y' - x'}{1 - \frac{y' - x'}{b'_{n-1}} \frac{db'_{n-1}}{dy'}} + y' &= b_{n-2} + p', \\
 &\vdots \\
 \frac{b'_1 + (z' - w')}{1 - \frac{z' - w'}{b'_1} \frac{db'_1}{dz'}} + z' &= A + b_0.
 \end{aligned}
 \tag{74}$$

Целесообразно, прежде всего, вывести приближенные простые соотношения для определения оптимальных давлений отборов. Принимая по-прежнему тепло конденсации пара во всех подогревателях одинаковым, т. е. условие (50), и одинаковую величину недогрева воды во всех подогревателях

$$\varepsilon' = \varepsilon'' = \dots = \varepsilon^{(n)} = \varepsilon,
 \tag{75}$$

получим в силу (71)

$$b_1' = b_2' = \dots = b_n' = b'.
 \tag{76}$$

При этих условиях уравнения (74) дают:

$$\begin{aligned}
 x' &= \frac{A - \varepsilon}{n + 1} \\
 y' &= \frac{2}{n + 1} (A - \varepsilon). \\
 &\vdots \\
 z' &= \frac{n}{n + 1} (A - \varepsilon).
 \end{aligned}
 \tag{77}$$

Действительные подогревы воды в отдельных подогревателях связаны с величинами $x', y', \dots z'$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta q_1 &= z' - w', \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \Delta q_{n-1} &= y' - x', \\ \Delta q_n &= x'. \end{aligned} \quad (78)$$

Из (77) и (78) получается

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \dots = \Delta q_n = \frac{A - \varepsilon}{n + 1}. \quad (79)$$

Таким образом, при указанных допущениях действительные подогревы воды во всех подогревателях оказываются одинаковыми, но меньшими, чем при смешивающих подогревателях (ср. ур-ние 52).

Давления в отборах определяются по приросту энтальпии кипящей воды в подогревателях. Учитывая (72), имеем

$$\Delta q^0 = \Delta q' = \Delta q'' = \dots = \Delta q^{(n-1)} = \Delta q^{(n-2)} = \frac{A - \varepsilon}{n + 1}, \quad (80)$$

$$\Delta q^{(n)} = \frac{A + n\varepsilon}{n + 1}. \quad (81)$$

Далее, в данном случае между теплоперепадами в отдельной ступени расширения и приростом энтальпии кипящей воды в подогревателях сохраняется та же линейная зависимость, что и в предыдущем случае (57). Следовательно, при оптимальных давлениях отборов

$$i_1 - i_{01} = i_{01} - i_{02} = \dots = i_{0(n-1)} - i_{0n} = \frac{i_1 - i_k - \varepsilon}{n + 1}, \quad (82)$$

и для теплового перепада последней ступени низкого давления

$$i_{0n} - i_k = \frac{i_1 - i_k + n\varepsilon}{n + 1}. \quad (83)$$

В случае неравных подогревов воды в разных подогревателях и сохранения условия (50), величины $b_1', b_2' \dots$ не будут равны друг другу, но, тем не менее, будут постоянными. В этом случае из (74) с учетом (71) и (78) получим:

$$\begin{aligned} \Delta q_1 &= \frac{A - n\varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n + 1}, \\ \Delta q_2 &= \frac{A + \varepsilon' - n\varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n + 1}, \\ &\vdots \\ \Delta q_n &= \frac{A + \varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' \dots + \varepsilon^{(n-1)} - n\varepsilon^{(n)}}{n + 1}. \end{aligned} \quad (84)$$

Давления в отборах определяются по приросту энтальпии кипящей воды в подогревателях:

$$\begin{aligned} \Delta q^0 = \Delta q_1 &= \frac{A - n\varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n+1}, \\ \Delta q' = \Delta q_2 &= \frac{A + \varepsilon' - n\varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n+1}, \\ &\vdots \\ \Delta q^{(n-1)} = \Delta q_n &= \frac{A + \varepsilon' + \varepsilon'' + \dots + \varepsilon^{(n-1)} - n\varepsilon^{(n)}}{n+1}. \end{aligned} \quad (85)$$

А для ступени низкого давления

$$\Delta q^{(n)} = \frac{A + \varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n+1}. \quad (86)$$

Так как в данном случае также сохраняется линейная связь между приростом энтальпии кипящей воды в подогревателях и теплоперепадами (57), то при оптимальных давлениях отборов теплоперепады между отборами вычисляются так:

$$\begin{aligned} i_1 - i_{01} &= \frac{i_1 - i_k - n\varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n+1}, \\ i_{01} - i_{02} &= \frac{i_1 - i_k + \varepsilon' - n\varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n+1}, \\ &\vdots \\ i_{0(n-1)} - i_{0n} &= \frac{i_1 - i_k + \varepsilon' + \varepsilon'' + \dots + \varepsilon^{(n-1)} - n\varepsilon^{(n)}}{n+1}, \\ i_{0n} - i_k &= \frac{i_1 - i_k + \varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' + \dots + \varepsilon^{(n)}}{n+1}. \end{aligned} \quad (87)$$

Если недогревы во всех ступенях одинаковы

$$\varepsilon' = \varepsilon'' = \dots = \varepsilon^{(n)} \neq 0,$$

то соотношение (84) переходит в (79), (85) и (86)—в (80) и (81) и (87)—в (82) и (83).

В предельном случае недогревов, равных нулю, мы переходим к предыдущему случаю смешивающих подогревателей.

Точное решение поставленной задачи в данном случае, так же как в предыдущем, возможно графоаналитическим подбором с предварительным построением по рис. 5.

Из (71) и (72) и рис. 2 имеем

$$b'_1 + z' = b_1 + Z = i_{01} - i'_k,$$

⋮

$$b'_{n-1} + y' = b_{n-1} + Y = i_{0(n-1)} - i'_k, \quad (88)$$

$$b'_n + x' = b_n + X = i_{0n} - i'_k.$$

Так как недогревы ϵ' , ϵ'' , ..., $\epsilon^{(n)}$ надо считать заданными постоянными величинами, то на основе (71), (72) и (88)

$$\frac{db'_1}{dz'} = \frac{db_1}{dZ} = \frac{di_{01}}{di'_{01}} - 1,$$

⋮

$$\frac{db'_{n-1}}{dy'} = \frac{db_{n-1}}{dY} = \frac{di_{0(n-1)}}{di'_{0(n-1)}} - 1,$$

$$\frac{db'_n}{dx'} = \frac{db_n}{dX} = \frac{di_{0n}}{di'_{0n}} - 1.$$

(89)

Из (74) получаем, переименовав порядок нумерации подогревателей (т. е. считая за первый подогреватель низкого давления):

$$\begin{aligned} (i_1 - i'_k)_2 &= [(i - i'_k) - (i' - i'_k)]_1 \frac{(i - i'_k)_1}{(i - i'_k)_1 - [(i' - i'_k) - \epsilon]_1} \left(\frac{di}{di'}\right)_1 + \\ &+ [(i' - i'_k) - \epsilon]_1, \\ (i - i'_k)_3 &= [(i - i'_k) - \\ - (i' - i'_k)]_2 &\frac{(i - i'_k)_2 - [(i' - i'_k) - \epsilon]_1}{(i - i'_k)_2 - [(i' - i'_k) - \epsilon]_1 - [(i' - i'_k - \epsilon)_2 - (i' - i'_k - \epsilon)_1]} \left(\frac{di}{di'}\right)_1 + \\ &+ [(i' - i'_k - \epsilon)_2], \end{aligned} \quad (90)$$

и т. д. Если давление 1-го отбора (низкого давления) задано правильно, то для последнего подогревателя (высокого давления) должно получиться

$$(i - i'_k)_n = i_1 - i'_k.$$

В противном случае расчет следует повторить до совпадения.

В таблице № 2 приведены результаты подсчетов давлений отборов и к. п. д. при тех же параметрах пара, что и в таблице № 1, при недогреве в подогревателе высокого давления $\epsilon' = 10$ ккал/кг, во всех остальных — 6 ккал/кг. Подсчеты по формулам (87) помечены буквой Л, по формулам (85) и (86) — буквой П.

В графе С давления отборов подсчитаны как средне-арифметические из Л и П. Наконец, в графе Т даны результаты подбора давлений отборов по формулам (90) с использованием рис. 5.

Таблица 2

	Л	П	С	Т
1 точка отбора				
P_{01}	4,4	9,4	6,9	6,45
η_p	35,77	34,36	35,87	35,93
2 точки отбора				
P_{01}	13,1	36,0	24,5	18,0
P_{02}	1,15	5,8	3,5	1,80
η_p	36,71	36,64	36,81	36,88
3 точки отбора				
P_{01}	22,0	34,0	28,0	28,8
P_{02}	4,4	9,0	6,7	6,6
P_{03}	0,57	1,25	0,90	0,85
η_p	37,37	37,31	37,37	37,38
4 точки отбора				
P_{01}	29,5	41,0	35,2	37,0
P_{02}	8,5	16,0	12,2	12,8
P_{03}	2,1	4,4	3,2	3,3
P_{04}	0,37	0,75	0,56	0,54
η_p	37,70	37,09	37,75	37,79
5 точек отбора				
P_{01}	35,0	47,0	41,0	42,0
P_{02}	13,2	23,0	18,1	19,0
P_{03}	4,4	9,0	6,7	6,6
P_{04}	1,15	2,6	1,9	1,85
P_{05}	0,26	0,52	0,39	0,38
η_p	37,80	37,84	37,94	37,95

Таблица № 2 подтверждает заключения, которые были даны выше на основе табл. № 1. Подбор давлений отборов по графе С и в данном случае дает результаты, весьма близко сходящиеся с результатами подсчетов по точным соотношениям (Т).

При иных схемах включения подогревателей, чем разобранные выше основные, всегда возможно, как это было указано, сосчитать условные

недогревы и, таким образом, привести их к основной схеме. Поэтому во всех случаях возможно воспользоваться указанными приемами для определения оптимальных давлений отборов. Трудность, которая здесь встречается, заключается в том, что величина условного недогрева является функцией от давлений отборов, которые как раз и являются искомой величиной, см. (16), (17), (20), (21), (22), (23), (24), (27), (28) и (29). Поэтому здесь при вычислениях оптимальных давлений отборов нужно идти путем постепенных приближений. Сначала задаются оптимальными давлениями отборов на-глаз¹⁾. Затем вычисляют соответствующие условные недогревы, а по ним, пользуясь правилом С, подсчитывают и соответственные оптимальные давления отборов. Расчеты приходится повторять²⁾ до достаточного совпадения величин задаваемых и подсчитываемых оптимальных давлений отборов.

В таблице 3 приведены результаты подсчетов для установки по схеме рис. 3, в таблице 4—для установки по схеме рис. 4, при тех же параметрах установки, что приняты при подсчете таблицы 2. Для надежности некоторые из результатов были проверены по точным соотношениям, причем во всех случаях было получено очень хорошее совпадение.

Таблица 3

y^I	y^{II}	y^{III}	y^{IV}	P_{01}	P_{02}	P_{03}	P_{04}	η_p	Примечание
1 точка отбора									
10	—	—	—	6,45	—	—	—	35,96	$\varepsilon' = 10$ кал/кг
2 точки отбора									
10	21,3	—	—	16,0	2,25	—	—	36,58	$\varepsilon' = 10$ кал/кг $\varepsilon'' = 6$ кал/кг
3 точки отбора									
10	17,3	34,5	—	23,2	5,4	1,20	—	36,95	$\varepsilon' = 10$ кал/кг $\varepsilon'' = \varepsilon''' = 6$ кал/кг
4 точки отбора									
10	15,1	28,2	42,2	28,0	8,3	2,6	0,90	37,04	$\varepsilon' = 10$ кал/кг $\varepsilon'' = \varepsilon''' = \varepsilon^{IV} = 6$ кал/кг

Таблица 4

y^I	y^{II}	y^{III}	y^{IV}	P_{01}	P_{02}	P_{03}	P_{04}	η_p	Примечание
1 точка отбора									
10	—	—	—	6,45	—	—	—	35,96	$\varepsilon' = 10$ кал/кг

1) В наших подсчетах мы задавались оптимальными давлениями отборов по правилу С, принимая вначале действительные недогревы за условные.

2) Обычно 2—3 раза.

2 точки отбора

10	21,3	—	—	16,0	2,25	—	—	36,58	$\epsilon' = 10$ кал/кг $\epsilon'' = 6$ „
----	------	---	---	------	------	---	---	-------	---

3 точки отбора

10	10,5	23,2	—	24,0	6,0	1,15	—	37,05	$\epsilon' = 10$ кал/кг $\epsilon'' = \epsilon''' = 6$ кал/кг
----	------	------	---	------	-----	------	---	-------	--

4 точки отбора

10	13,6	18,9	23,8	31,0	10,5	3,0	0,74	37,29	$\epsilon' = 10$ кал/кг $\epsilon'' = \epsilon''' = \epsilon^{IV} = 6$ кал/кг
----	------	------	------	------	------	-----	------	-------	--

Из рассмотрения таблиц № 3 и 4 и сравнения с таблицей № 2 следует.

1. При одной точке отбора метод включения подогревателя с термической стороны значения не имеет.

2. При двух точках отбора включения по схемам рис. 3 и 4 дают одинаковые результаты.

3. Особенно невыгодно с термической стороны включение подогревателей по схеме рис. 3 (т. е. отвод всех дренажей прямо в конденсатор) при большом количестве точек отбора.

Так как предлагаемый расчетный прием определения оптимальных давлений отборов сложнее, чем предлагавшиеся ранее, естественно, возник вопрос о сравнении результатов по этим методам. Для сравнения была взята схема включения по рис. 3 при трех точках отбора с равными недогревами ($\epsilon' = \epsilon'' = \epsilon''' = 6$ кал/кг), для какого случая в работе Г. И. Петелина [3] приведена формула (37а). В результате подсчетов получено:

По Г. И. Петелину:

$$P_{01} = 22,0; \quad P_{02} = 8,5; \quad P_{03} = 2,5 \text{ ата}$$

и соответствующее

$$\eta_p = 36,83\%$$

По предлагаемому методу

$$P_{01} = 22,0; \quad P_{02} = 5,2; \quad P_{03} = 1,2 \text{ ата}$$

и соответствующее

$$\eta_p = 36,95\%$$

По этим данным видно, что предлагаемый метод действительно дает более точные результаты.

Наличие теплофикационных отборов

Предлагаемый метод подсчета оптимальных давлений отборов пара является общим методом. Это позволяет применять его в разнообразнейших случаях. Покажем применение его в одном частном случае.

При наличии регулируемых отборов для теплофикационного или технологического пара последние обычно используются также и для регенеративного подогрева питательной воды. Но обычно устраивают для последней цели также и специальные, нерегулируемые отборы.

Давление технологического или теплофикационного пара, естественно, задается потребителем. Таким образом, может возникнуть вопрос об оптимальных давлениях отборов для регенеративного подогрева питатель-

ной воды при наличии отбора (одного или нескольких) фиксированного давления. Чтобы показать методику решения этого вопроса, рассмотрим частный случай процесса, данного на рис. 6. Здесь предположен отбор при фиксированном давлении P_0 и возможность выбора давлений P_{01} и P_{02} в части высокого давления и P_{03} и P_{04} — в области низкого. Предполагаются поверхностные подогреватели с отводом дренажа в питатель-

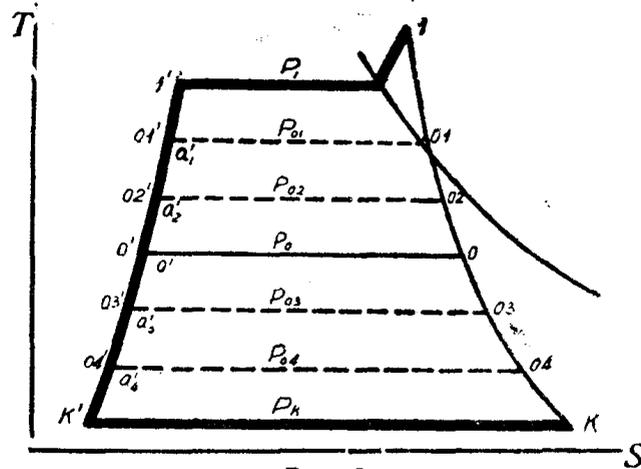


Рис. 6

ную линию непосредственно возле подогревателя. Величина недогрева воды в каждом подогревателе является известной.

При указанных условиях для подсчета к.п.д. при известных давлениях отборов может быть применено соотношение (3) или (11), а для функции U , максимум которой совпадает с максимальным значением τ_p , соотношение (73), которое переписывается так:

$$U = \left(1 + \frac{x'}{b'_4}\right) \left(1 + \frac{y' - x'}{b'_3}\right) \left(1 + \frac{m' - y'}{n'}\right) \left(1 + \frac{w' - m'}{b'_2}\right) \left(1 + \frac{z' - w'}{b'_1}\right) \left(1 + \frac{A - z'}{b_0}\right). \quad (91)$$

Здесь, кроме обозначений, приведенных выше, имеем

$$n' = n + \varepsilon^0, \quad (92)$$

где

$$n = i_0 - i_0'$$

и ε^0 — недогрев воды в подогревателе с давлением P_0 ,

$$m' = i_a' - i_k'. \quad (93)$$

Условие максимума (91) при независимых переменных x' , y' , w' , z' будет:

$$1 + \frac{b'_4 + x'}{b'_1} \frac{db'_4}{dx'} + x' = b'_3 + y', \quad (94)$$

$$\frac{b'_3 + (y' - x')}{b'_3} \frac{db'_3}{dy'} + y' = m' + n'.$$

и

$$\frac{b_2' + (w' - m')}{1 + \frac{w' - m'}{b_2'} \frac{db_2'}{dw'}} + w' = b_1' + z',$$

$$\frac{b_1' + (z' - w')}{1 + \frac{z_1' - w'}{b_1'} \frac{db_1'}{dz'}} + z' = A + b_0. \quad (95)$$

Если принять равными друг другу теплоты конденсации пара и недогрева во всех подогревателях, т. е. условия (50), (75) и (76), то получится

$$x' = \frac{m'}{3},$$

$$y' = \frac{2}{3} m',$$

$$w' = \frac{A + 2m' - \varepsilon}{3},$$

$$z' = \frac{2A + m' - 2\varepsilon}{3}, \quad (96)$$

откуда, с учетом (78), имеем для действительных подогревов

$$\Delta q_5 = \Delta q_4 = \Delta q_3 = \frac{m'}{3}, \quad (97)$$

$$\Delta q_2 = \Delta q_1 = \frac{A - m - \varepsilon}{3}, \quad (98)$$

Для прироста энтальпии кипящей воды имеем

$$\Delta q^0 = \Delta q' = \Delta q'' = \frac{A - m}{3}, \quad (99)$$

$$\Delta q''' = \Delta q^{IV} = \frac{m - \varepsilon}{3}, \quad (100)$$

$$\Delta q^V = \frac{m + 2\varepsilon}{3}, \quad (101)$$

или через энтальпии

$$\Delta q^0 = \Delta q' = \Delta q'' = \frac{i_1' - i_0'}{3}, \quad (99)$$

$$\Delta q''' = \Delta q^{IV} = \frac{i_3' - i_k'}{3}, \quad (100)$$

$$\Delta q^V = \frac{i_0' - i_k' + 2\varepsilon}{3}. \quad (101)$$

В силу того, что здесь сохраняется соотношение (57), имеем для тепловых перепадов

$$i_1 - i_{01} = i_{01} - i_{02} = i_{02} - i_0 = \frac{i_1 - i_0}{3}, \quad (102)$$

$$i_0 - i_{03} = i_{03} - i_{04} = \frac{i_0 - i_k - \varepsilon}{3}, \quad (103)$$

$$i_{04} - i_k = \frac{i_0 - i_k + 2\varepsilon}{3}. \quad (104)$$

Как уже было показано, весьма точные результаты получаются при подсчете по методу С.

В данном случае это обозначает, что давление отборов надо брать как средне-арифметические из определяемых по (99)—(102), (100)—(103) и (101)—(104). Не представляет принципиальных затруднений найти точное решение поставленной задачи, используя (94) и (95) и график по рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шицман. Выбор мест отбора пара для подогрева питательной воды. Бюллетень Инжколлектива МОГЭС, 1928, стр. 63.
2. Рубинштейн. Исследование регенеративного процесса в паротурбинных установках. Известия ВТИ, 1929, №№ 1—9.
3. Петелин. Регенеративный подогрев питательной воды. 1932.
4. Гохштейн. Попытка использования основного неравенства 2-го закона термодинамики в практической теплотехнике. Советское Котлотурбостроение. 1939, № 9.
5. Orrok. The commercial economy of the pressure and high superheat in the central power stations. Power, 1922, pp. 648, 913.
6. Zerkowitz. Das Gegendruckverfahren und seine Anwendung bei der Dampfturbine. III Teil. Das Gegendruckverfahren als Regenerativverfahren. VDI, 1924, s. 1093.
7. Lauffer. Where to bleed a Turbine. Power, 1926, p. 363.
8. Laupichler. Günstigste Anzapfdrucke der Verlustlosen Dampfturbinen bei Dampfentnahme aus beliebig vielen Stufen zur Vorwärmung des Speisewassers. Wärme, 1927, s. 227.
9. Kaizling. Die Wahl des geeigneten Druckes bei Anzapfdampfvorwärmung. Wärme. 1934, s. 433.
10. Chambadal. Le fractionnement du réchauffage de l'eau d'alimentation des chaudières. Chaleur et Industrie. 1937, p. 279.
11. Kinkeldei. Die Bestimmung der günstigsten Anzapfvorwärmung unter Berücksichtigung des Gütegrades der Dampfturbine. Wärme, 1933, S. 97.
12. Schult. Der Erfolg der Drucksteigerung bei Kondensations und Gegendruck Dampfanlagen. VDJ, 1939, S. 405.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_{02}	$-i_{02}$
95	19 снизу	Z	Z_T
97			В уравнении (27) α является показателем степени
98	19 снизу	$Z_m \Delta$	$Z_m V$
101	15 снизу	окружающей	окружностей
178	17 снизу	$s = \frac{n}{n}$	$s = \frac{n}{n_0}$
193	4 сверху	$I_2^2 = \frac{E}{1 + Z^2}$	$I_2^2 = \frac{\varepsilon}{1 + Z^2}$
203	12 сверху	$I = I_M \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_M}{L_M} t} \right) = \dots$	$I = I_M \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_M}{L_M} t} \right) = \dots$
203	17 снизу	закрывающихся	закрывающийся
214	8 снизу	(28)	(26)
221	4 сверху	$\dots \frac{i_{02}^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
318	Подпись к рис. 5	Потери тепла неполноты горения.	Потери тепла от неполноты горения.
318	14 снизу	(рис. 3)	(рис. 4)
323	1 сверху	аттуру	пературу
323	1 сверху	$r = 58$	$r = 587$
325	На рис. 6	$Q'_{\text{вод}} \text{ и } Q''_{\text{вод}}$	$Q'_{\text{вод}} \text{ и } Q''_{\text{вод}}$
326	33 сверху	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K,}$	$/273 + 25 = 293 \text{ K,}$