

К ВЫБОРУ ТОЧЕК ОТБОРА ПАРА ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ В ТЕПЛОСИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ

И.Н. БУТАКОВ

Для любого n -го смешивающего подогревателя можно написать тепловой баланс в случае отбора насыщенного пара в таком виде

$$x_n \cdot r_n = y_n (T_n - T_{n-1}), \quad (1)$$

где, x_n – количество отбираемого пара в кг, r_n – скрытая теплота его парообразования ккал/кг, T_n и T_{n-1} – абсолютные температуры воды при выходе из подогревателя и при входе в него, y_n – количество проходящего через n -й подогреватель конденсата в кг. Можно допустить, что y_n мало меняется при переходе от одного подогревателя к другому, почему, принимая $y_n = 1$, имеем

$$x_n = \frac{T_n - T_{n-1}}{r_n} \quad (2)$$

Работа, которую мог бы произвести по циклу Ранкина отъемный пар, определяется по формуле (3)

$$W_n = x_n [r_n (1 - T_2 / T_n) + T_n - T_2 - T_2 \ln T_n / T_2], \quad (3)$$

где T_2 – абсолютная температура холодного источника. Формулу (3) можно представить в таком виде (3')

$$W_n = x_n \cdot r_n (1 - T_2 / T_n) \left[1 + \frac{T_n - T_2 - T_2 \cdot \ln T_n / T_2}{r_n (1 - T_2 / T_n)} \right]. \quad (3')$$

Второе слагаемое в прямых скобках представляет небольшую дробь, так что, если ее игнорировать, этим самым мы уменьшим величину W_n . Это, однако, не отразится заметно на результате, так как фактически расход пара x_n будет меньше, чем принято по формуле (2). Это оттого, что основной конденсат будет дополняться конденсатами обогреваемого пара в порядке постепенности при переходе от одного подогревателя к другому, достигая полной единицы лишь после последнего подогревателя. Поэтому с достаточным приближением к действительности можно принять

$$W_n + x_n \cdot r_n (1 - T_2 / T_n), \quad (4)$$

или после подстановки сюда значения x_n из выражения (2)

$$W_n = \frac{(T_n - T_{n-1})(T_n - T_2)}{T_n} = T_n - T_{n-1} - T_2 + \frac{T_{n-1} \cdot T_2}{T_n}. \quad (5)$$

Если число подогревателей будет K , то общая работа, которую мог бы произвести отъемный пар всех K подогревателей, будет ΣW_i , причем для подогревателя K низкого давления имеем

$$\begin{aligned} W_K &= \frac{(T_K - T_2)(T_K - T_2)}{T_K} = T_K - T_2 - T_2 + \frac{T_2 \cdot T_2}{T_K}; \\ W_{K-1} &= \frac{(T_{K-1} - T_K)(T_{K-1} - T_2)}{T_{K-1}} = T_{K-1} - T_K - T_2 + \frac{T_K \cdot T_2}{T_{K-1}}; \\ &\vdots \\ W_{II} &= \frac{(T_{II} - T_{III})(T_{II} - T_2)}{T_{II}} = T_{II} - T_{III} - T_2 + \frac{T_{III} \cdot T_2}{T_{II}}; \\ W_I &= \frac{(T_I - T_{II})(T_I - T_2)}{T_I} = T_I - T_{II} - T_2 + \frac{T_{II} \cdot T_2}{T_I}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\Sigma W_i = T_I - (K+1) T_2 + \frac{T_2 \cdot T_2}{T_K} + \frac{T_K \cdot T_2}{T_{K-1}} + \dots + \frac{T_{III} \cdot T_2}{T_{II}} + \frac{T_{II} \cdot T_2}{T_I} \quad (6)$$

Температура T_1 – максимальная температура регенеративного подогрева питательной воды обычно оказывается величиной, заданной на основе технико-экономических соображений, поэтому изменяющимися величинами в выражении (6) являются последние члены. Для нас важно, чтобы величина ΣW_i была минимальной, т. е. чтобы потеря работы, обусловленная отсутствием использования тепловых перепадов от давлений в точках отъемов пара до давления в конденсаторе, оказалась наименьшей. Это же будет иметь место, когда сумма последних членов выражения (6) будет минимальной. Заметим, что произведение этих членов является величиной постоянной, равной $T_2^{k+1}/T_1 = \text{const}$. Если мы имеем произведение из переменных величин x, y и z в виде некоторой постоянной величины $x \cdot y \cdot z = C$ и требуется найти максимум или минимум их суммы $\Sigma = x + y + z$, то берут частные производные по каждому переменному с приравниванием их нулю, а потом определяют с использованием произведения C значения x, y и z . Оказывается, что тогда $x = y = z = \sqrt[3]{C}$ или в применении к разбираемому частному случаю

$$\frac{T_2 \cdot T_{II}}{T_1} = \frac{T_2 \cdot T_{III}}{T_{II}} \dots = \frac{T_k \cdot T_2}{T_{k-1}} = \frac{T_2 \cdot T_2}{T_k} = \sqrt[k]{\frac{T_2^{k+1}}{T_1}},$$

или

$$T_{II}/T_1 = T_{III}/T_{II} \dots = T_k/T_{k-1} = T_2/T_k = \sqrt[k]{T_2/T_1}. \quad (7)$$

Таким образом, для получения минимума работы ΣW_i с K подогревателями надо распределять абсолютные температуры отъемного пара $T_{II}, T_{III}, \dots, T_{k-1}, T_k$ с таким расчетом, чтобы они образовывали геометрическую прогрессию со знаменателем прогрессии $\sqrt[k]{T_2/T_1}$.

В случае применения поверхностных подогревателей при каскадном способе ведения линии конденсата обогреваемого пара отборов расход последнего x_n , вследствие поступления конденсата с более высокой температурой из вышестоящего подогревателя, уменьшается. То же мы имеем и при наличии мелких перекачивающих конденсатных насосов и в других случаях ведения линий конденсата обогреваемого пара. Поэтому и при поверхностных подогревателях остаются в силе те принципиальные положения, которые выше были формулированы для смешивающих подогревателей (формулы 4, 5 и 6). Разница будет только в том, что при поверхностных подогревателях имеет место разность ΔT температур между обогреваемым паром и уходящей из подогревателя питательной водой ($5^\circ - 10^\circ\text{C}$). Поэтому формулы (4–7) для случая поверхностных подогревателей переписываются в таком виде:

$$W_n = x_n \cdot r_n \left(1 - \frac{T_2}{T_n + \Delta T} \right) \dots \quad (4')$$

$$W_n = \frac{T_n - T_{n-1}}{r_n} \cdot r_n \left(1 - \frac{T_2}{T_n + \Delta T} \right) = \frac{(T_n - T_{n-1}) [(T_n + \Delta T) - T_2]}{T_n + \Delta T}. \quad (5')$$

Суммарная же работа будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Sigma W_i = & T_1 - (k+1) T_2 + \frac{T_2(T_{II} + \Delta T)}{T_1 + \Delta T} + \frac{T_2(T_{III} + \Delta T)}{T_{II} + \Delta T} + \dots \\ & + \frac{T_2(T_k + \Delta T)}{T_{k-1} + \Delta T} + \frac{T_2(T_2 + \Delta T)}{T_k + \Delta T} \dots \end{aligned} \quad (6')$$

Произведение из последних членов выражения (6')

$$\frac{T_2^k (T_2 + \Delta T)}{T_1 + \Delta T} = \text{const},$$

поэтому

$$\frac{T_{II} + \Delta T}{T_1 + \Delta T} = \frac{T_{III} + \Delta T}{T_{II} + \Delta T} = \dots = \frac{T_k + \Delta T}{T_{k-1} + \Delta T} = \frac{T_2 + \Delta T}{T_k + \Delta T} = \sqrt[k]{\frac{T_2 + \Delta T}{T_1 + \Delta T}}. \quad (7')$$

Подогреватели, обогреваемые отъемным паром повышенного давления, могут получать пар в перегретом состоянии особенно в случае применения пара высоких начальных параметров. Тогда в формуле (3') в прямых скобках появится еще одно третье слагаемое, отвечающее фазе перегрева диаграммы Ранкина. Это слагаемое будет малой дробью, позволяющей думать о возможности ее игнорирования, тем более, что в данном случае фактический расход пара x_n в подогревателях, питаемых перегретым паром, будет меньше вследствие более высокого теплосодержания обогреваемого пара. Принимая же x_n по формуле (2), мы тем самым увеличиваем x_n и, следовательно, этим компенсируем уменьшение W_n из-за игнорирования перегрева пара в этих подогревателях. Таким образом, наличие перегретого пара в некоторых подогревателях не может сказываться на результатах выбора точек отбора пара, которые и в этих случаях будут подчиняться закону геометрической прогрессии абсолютных температур.

БУТАКОВ ИННОКЕНТИЙ НИКОЛАЕВИЧ

(1881–1970)



Родился в Забайкалье (Александровский завод), в 1900 году поступил в только что открывшийся Томский технологический институт (ныне Томский политехнический университет) и в 1906 в составе первого выпуска окончил его. Инженерная производственная деятельность проходила на Сибирской железной дороге, откуда с должности начальника службы тяги в 1921 году был избран по конкурсу профессором ТТИ. С 1923 года возглавил открывшуюся теплотехническую специальность, а впоследствии кафедру тепловых установок, которой заведовал до 1967 года. В разные годы занимал должности проректора по учебной работе, зам. директора по учебно-научной работе. В 1935 году И.Н. Бутакову присуждена ученая степень доктора технических наук, в 1944 году присвоено звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР". При создании Сибирского филиала АН СССР был назначен и до 1950 года по совместительству работал в должности директора Транспортно-энергетического института СО АН СССР.

И.Н. Бутаковым опубликовано около 200 работ, в том числе несколько монографических изданий, по различным вопросам теплоэнергетики, экономики, педагогики высшей школы. Он подготовил 40 кандидатов наук, 6 докторов наук. Плодотворная инженерно-техническая и научно-педагогическая деятельность снискали И.Н. Бутакову признание основателя сибирской теплотехнической школы.

Результаты его работы в ТПУ и Сибири были отмечены двумя орденами Ленина, тремя орденами Трудового Красного Знамени, званиями "Почетный железнодорожник", "Отличник энергетики", "Отличник угольной промышленности".