

СРЕДНЕ-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

ФУКС Г. И.

Профессор, доктор технических наук

Вычисление средне-термодинамической температуры

Средне-термодинамическая температура ¹⁾ процесса есть температура изотермического процесса, дающего тот же тепловой эффект, что и рассматриваемый. Введение этого понятия упрощает рассмотрение вопросов технической термодинамики, а в некоторых случаях придает доказательствам очевидность.

Пусть АВ — изображение процесса в TS координатах, ΔS — приращение энтропии рабочего тела (рис. 1). Тепло, сообщенное рабочему телу, изобразится площадью АВба. Для нахождения с-тт процесса строится равновеликий этой площади прямоугольник с абсциссой ΔS . Высота этого прямоугольника будет T_c — с-тт процесса. Если тепло процесса АВ будет q , то

$$T_c = \frac{q}{\Delta S} \quad (1)$$

Пусть теплоемкость в процессе АВ будет c . Тогда

$$q = \int_A^B c dT \quad (2)$$

и

$$\Delta S = \int_A^B c \frac{dT}{T} \quad (3)$$

Следовательно,

$$T_c = \frac{\int_A^B c dT}{\int_A^B c \frac{dT}{T}} \quad (4)$$

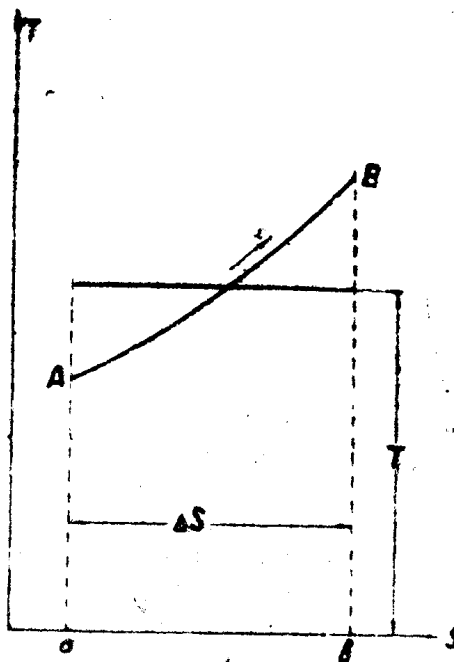


Рис. 1

При постоянной теплоемкости процесса АВ выражение (4) может быть написано так:

$$T_c = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (5)$$

¹⁾ В дальнейшем обозначается сокращенно с-тт

Ясно, что соотношение (5) может быть применено к любому процессу при условии $C = \text{Const}$, в частности, для изохорического, изобарического и политропического процессов газа (при $C_v = \text{Const}$).

При неизменной теплоемкости процесса его с-тт вычисляется как средне-логарифмическая из конечной и начальной абсолютных температур процесса.

Если сообщение тепла идет несколькими процессами, то можно поставить вопрос о с-тт сообщения тепла рабочему телу. Пусть (рис. 2) сообщение тепла идет в процессах АВ и ВС в количестве q_1 и q_2 при с-тт каждого процесса $T_{c'}$ и $T_{c''}$. С-тт процессов ABC будет

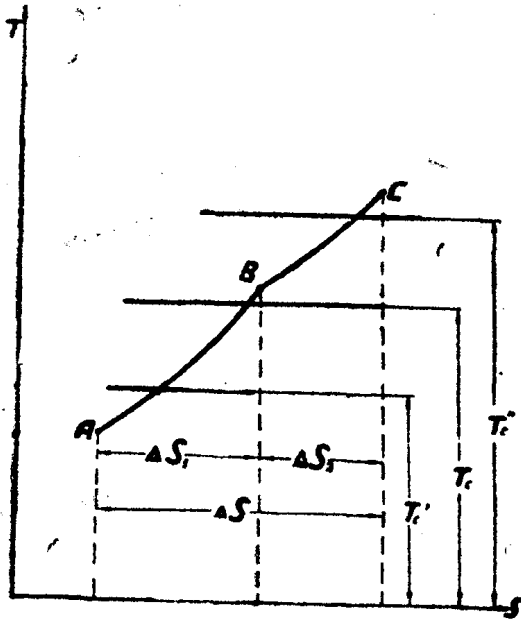


Рис. 2

$$T_c = \frac{q_1 + q_2}{\Delta S_1 + \Delta S_2} \quad (6)$$

Согласно определению

$$T_{c'} = \frac{q_1}{\Delta S_1}, \quad (1')$$

$$T_{c''} = \frac{q_2}{\Delta S_2}. \quad (1'')$$

Следовательно,

$$T_c = \frac{q_1 + q_2}{\frac{q_1}{T_{c'}} + \frac{q_2}{T_{c''}}}, \quad (7)$$

откуда

$$\frac{T_c}{T_{c'}} = \frac{1 + m}{1 + m \frac{T_{c'}}{T_{c''}}}, \quad (9)$$

где

$$m = \frac{q_2}{q_1}. \quad (9)$$

Из последнего соотношения следует, что с-тт сообщения тепла рабочему телу в двух процессах является средней между с-тт первого и второго процесса. В частности, если к данному процессу сообщения тепла добавляется второй, идущий при более высокой с-тт, чем первый, то с-тт сообщения тепла рабочему телу всегда повышается. Эти выводы будут использованы ниже.

Не представляет также труда написать соотношение, аналогичное (8), при сообщении рабочему телу тепла в 3 и более процессах.

Коэффициент полезного действия

Пусть дан произвольный цикл из обратимых процессов (рис. 3). Нанесем на диаграмму с-тт сообщения тепла рабочему телу $T_{c'}$ и отъема тепла $T_{c''}$. Тогда сообщенное и отнятое тепло будут соответственно

$$q_1 = T_{c'} \Delta S \quad (10)$$

и

$$q_2 = T_{c''} \Delta S. \quad (11)$$

Следовательно, к.п.д.

$$\eta_t = \frac{T_c' - T_c''}{T_c'} = 1 - \frac{T_c''}{T_c'} \quad (12)$$

На основе этого соотношения получается наглядный прием сравнения циклов по к.п.д. Так, для цикла Отто и Дизеля при одинаковых наибольших давлениях имеем (см. рис. 4) одинаковую с-тт отъема тепла от рабочего тела и разные с-тт сообщения тепла $T_{c'o}$ и $T_{c'x}$. Так как в данном случае

$$T_{c'x} > T_{c'o},$$

то, очевидно,

$$\eta_{tx} > \eta_{to}.$$

Этим приемом можно производить сравнение циклов по к.п.д. в более сложных случаях, когда обычный метод не дает решения. Так, вопрос о сравнении по к.п.д. циклов 123 и 141, нанесенных на рис. 5, решается так. С-тт сообщения тепла обоих циклов, очевидно, одинакова. Согласно (5), одинакова также с-тт процессов 31 и 41 ($C_v = \text{Const}$). Следовательно, к.п.д. сравнительных циклов одинаковы.

Введение перегрева повышает к.п.д. парового цикла, так как при неизменной с-тт отъема тепла от рабочего тела, мы, на основании (8), имеем более высокую с-тт сообщения тепла пару.

Введение промежуточного перегрева пара может рассматриваться, как сообщение рабочему телу добавочного количества тепла при с-тт T_c'' ,

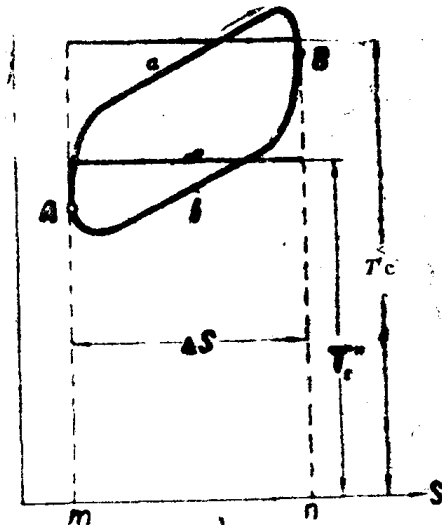


Рис. 3

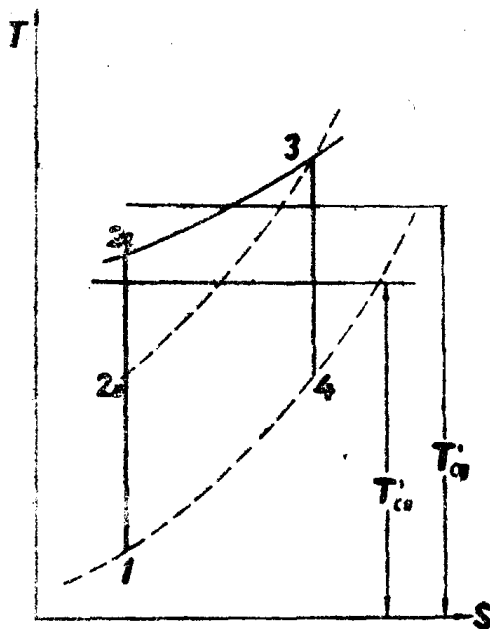


Рис. 4

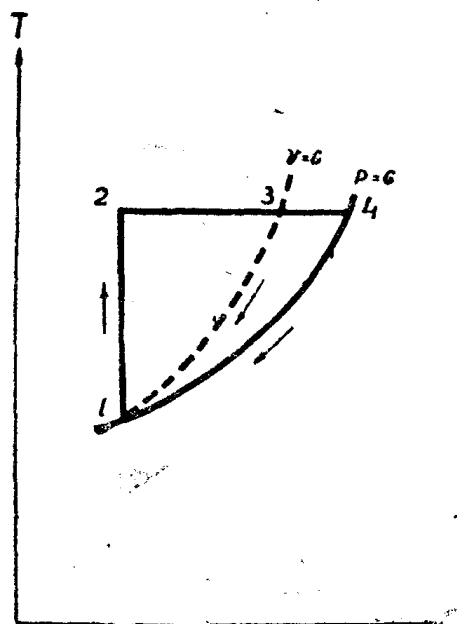


Рис. 5

отличной от с-тт основного процесса нагрева, при одной и той же с-тт отъема тепла от рабочего тела.

Условием повышения к.п.д. при промежуточном перегреве, согласно (8), будет наличие неравенства

$$1 + m > 1 + m \frac{T'_c}{T''_c},$$

откуда

$$T''_c > T'_c.$$

Следовательно, промежуточный перегрев пара повышает к.п.д. цикла в том случае, если с-тт промежуточного перегрева выше с-тт сообщения тепла основного цикла.

Но, с другой стороны, повышение к.п.д., достигаемое введением промежуточного перегрева пара, не всегда обозначает увеличение экономичности установки, т. е. уменьшение расхода топлива. Так, в случае парового промежуточного перегрева, поскольку с-тт греющего пара всегда выше с-тт нагреваемого, увеличение к.п.д. цикла не может дать экономии в топливе.

В некоторых случаях соотношение (12) позволяет сразу написать выражение для η_t цикла без промежуточных вычислений. На рис. 6 а и

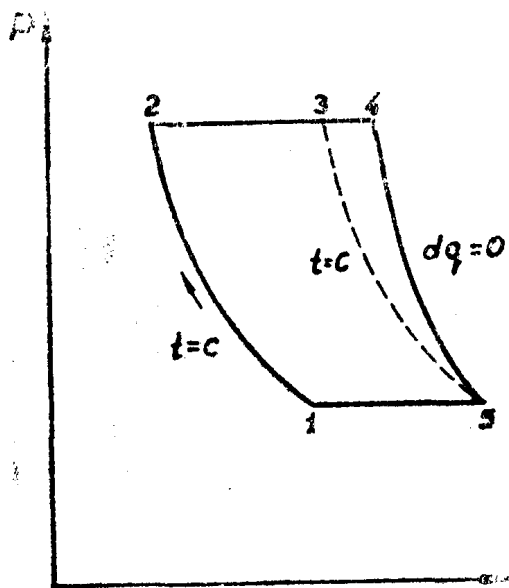


Рис. 6а

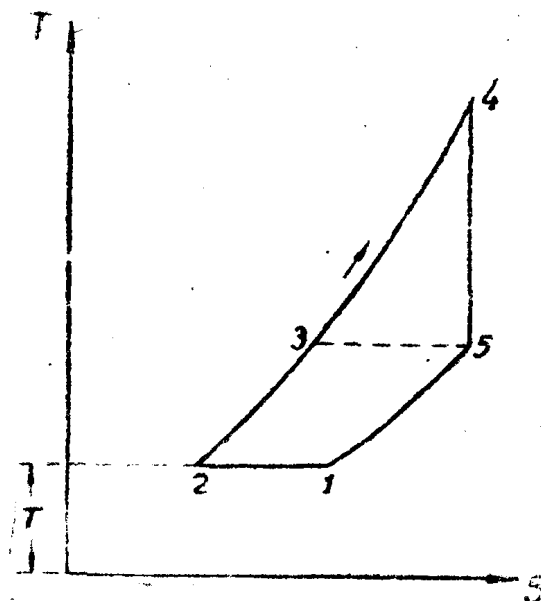


Рис. 6б

6 б нанесен цикл идеальной газовой турбины с горением при $p = \text{Const.}$ (2—3 и 5—1—процессы в регенераторе).

Отъем тепла от рабочего тела происходит в процессе 1—2 при постоянной температуре T_1 . Сообщение тепла идет при $p = \text{Const.}$ (процесс 3—4). При постоянной теплоемкости с-тт сообщения тепла по (5)

$$T = \frac{T_4 - T_3}{\ln \frac{T_4}{T_3}}. \quad (5')$$

Термический к.п.д. цикла по (12)

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_4 - T_3} \ln \frac{T_4}{T_3}. \quad (13)$$

Если в цикле имеются необратимые процессы (например, цикл паросиловой установки на рис. 7, где расширение 12 нанесено на диаграмме условно), то, очевидно,

$$q_1 = T'_c \Delta S_1, \quad (14)$$

$$q_2 = T''_c \Delta S_2. \quad (15)$$

К.п.д. этого цикла будет

$$\eta = 1 - \frac{T''_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1}. \quad (16)$$

Это выражение удобно применять в ходе некоторых доказательств. Для вычислений ему можно придать иной вид.

Необратимость процесса расширения ведет к тому, что изменение энтропии в процессе отъема тепла от рабочего тела ΔS_2 больше ее изменения в процессе сообщения тепла ΔS_1 . Назовем

$$\delta S = \Delta S_2 - \Delta S_1. \quad (17)$$

Тогда из (16)

$$\eta = 1 - \frac{T'_c}{T'_c} - \frac{T'_c \cdot \delta S}{T'_c \Delta S_1}. \quad (18)$$

Но

$$T'_c \cdot \delta S = \delta q, \quad (19)$$

где δq — добавочный, благодаря необратимости в работе машины, отброс тепла в конденсатор. Из (14), (16) и (19) имеем

$$\eta = 1 - \frac{T'_c}{T'_c} - \frac{\delta q}{T_1}. \quad (20)$$

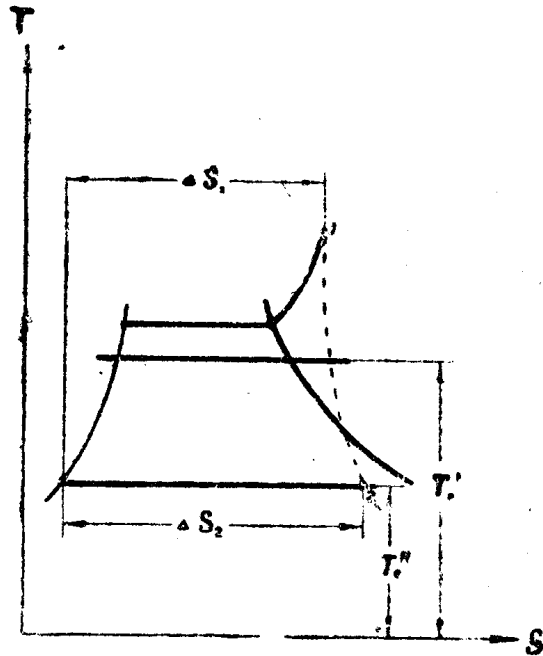


Рис. 7

Отличие реального цикла от теоретического оценивается относительным к.п.д. цикла η_{io} . Очевидно,

$$\eta_{io} = \frac{q_1 - q'_2 - \delta q}{q_1 - q'_2} = 1 - \frac{\delta q}{q_1 - q'_2}, \quad (21)$$

где q'_2 — отъем тепла от рабочего тела в теоретическом цикле.

Для теоретического цикла

$$\eta_t = \frac{q_1 - q'_2}{q_1} = 1 - \frac{T''_c}{T'_c}. \quad (22)$$

Из (20), (21) и (22)

$$\eta = \eta_{io} \left(1 - \frac{T'_c}{T_1} \right). \quad (23)$$

Если количество вещества, участвующее в цикле, меняется (например, отбор пара для нагрева питательной воды), но установка выдает исключительно механическую работу, то выражение для к.п.д. составит следующим образом.

Пусть в котле сообщается тепло g_1 кг рабочего тела в количестве q_1 ккал/кг. Полное количество сообщенного рабочему телу тепла будет

$$Q_1 = g_1 q_1 = q_1 T'_c \Delta S_1, \quad (24)$$

где T'_c и ΔS_1 — с-тт и приращение энтропии рабочего тела на кг при сообщении ему тепла.

Аналогично, отнятое тепло

$$Q_2 = g_k q_2 = g_k T''_c \Delta S_2. \quad (25)$$

К.п.д. цикла

$$\eta = 1 - \frac{g_k T''_c \Delta S_2}{g_1 T'_c \Delta S_1}. \quad (26)$$

Это выражение можно рассматривать как общее выражение к.п.д. для чисто силовой установки, из которого легко получить частные формулы (12) и (16). Оно будет использовано в дальнейшем для исследования регенеративного цикла паросиловой установки.

Более общим будет случай, когда количество рабочего вещества в машине меняется не только за счет внутреннего теплообмена установки, но и за счет отбора рабочего вещества для теплофикационных целей. В этом случае к.п.д. цикла

$$\eta = 1 - \frac{g_k T'_c \Delta S_2}{g_1 T'_c \Delta S_1} - \frac{\sum g T_c \Delta S}{g_1 T'_c \Delta S_1}. \quad (27)$$

Здесь g , T_c и ΔS — количество теплофикационного отбора, его с-тт и изменение его энтропии на 1 кг. Соотношение (27) дает, конечно, термический к.п.д. силовой части, а не всей установки в целом.

По внешнему виду выражения (27) нельзя установить разницы влияния на к.п.д. отборов для внутреннего и внешнего (теплофикационного) нагрева. Эта разница сказывается в том, что отбор для внутреннего нагрева влияет на величину с-тт сообщения тепла (T'_c), повышая ее. Теплофикационные отборы прямого влияния на T'_c не оказывают.

Регенеративный процесс паросиловой установки

Пусть имеется регенеративный цикл с одной точкой отбора пара (см. рис. 8) в точке 10. Пусть в машину поступает, считая на 1 кг топлива, g_1 кг пара, а в конденсатор — g_k кг пара. Согласно (28), к.п.д. этого цикла будет

$$\eta_p = 1 - \frac{g_k T''_c \Delta S_2}{g_1 T'_c \Delta S_1}. \quad (26)$$

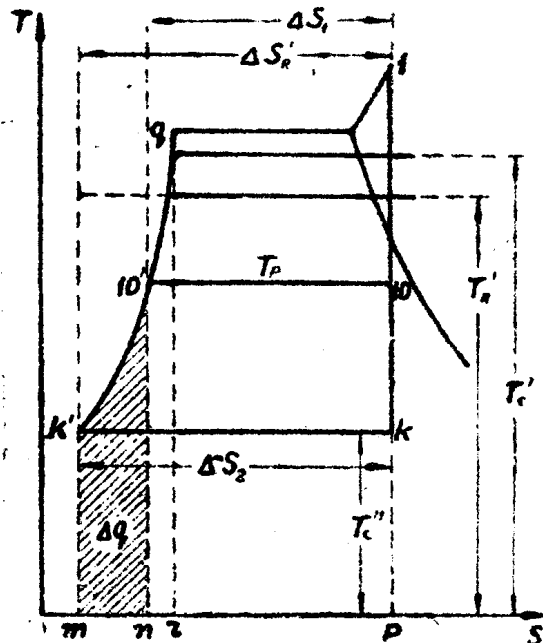


Рис. 8

Величины g_1 и g_k определяются из теплового баланса подогревателя. При смешивающих подогревателях последний записывается так:

$$g_k \Delta q = (g_1 - g_k) T_p \Delta S_p, \quad (28)$$

откуда

$$g_k = g_1 \frac{T_p \Delta S_p}{\Delta q + T_p \Delta S_p}. \quad (29)$$

Здесь Δq — количество тепла, идущее на подогрев 1 кг воды в подогревателе. Из (26) и (29) имеем

$$\eta_p = 1 - \frac{T'_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1} \frac{T_p \Delta S_p}{\Delta q + T_p \Delta S_p}. \quad (30)$$

Последняя дробь правой части (30) — правильная. Прибавим в числителе и знаменателе этой дроби одно и то же число

$$i_1 - i_{01}.$$

Тогда абсолютное значение этой дроби увеличится, т. е.

$$\eta_p > 1 - \frac{T'_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1} \frac{T_p \Delta S_p + (i_1 - i_{01})}{\Delta q + T_p \Delta S_p + (i_1 - i_{01})}. \quad (31)$$

Но $T_p \Delta S_p + (i_1 - i_{01})$ равно площади $10'q1p10'$, т. е. представляет собою тепло, затрачиваемое на 1 кг пара в котле в цикле с регенерацией, или

$$T_p \Delta S_p + (i_1 - i_{01}) = T'_c \Delta S_1. \quad (32)$$

Аналогично, величина

$$\Delta q + T_p \Delta S_p + (i_1 - i_{01}),$$

измеряемая площадью $mk'01'q1pm$, дает затрату тепла на кг пара в цикле без регенерации, т. е.

$$\Delta q + T_p \Delta S + (i_1 - i_{01}) = T'_R \Delta S'_R, \quad (33)$$

где значок R относится к циклу Ренкина. Из (31), (32) и (33) имеем

$$\eta_p > 1 - \frac{T'_c \Delta S_2}{T'_R \Delta S'_R}, \quad (34)$$

что с учетом (16) дает

$$\eta_p > \eta_R. \quad (35)$$

Таким образом, отбор пара для подогрева питательной воды дает повышение к.п.д. установки. Но абсолютная величина этого повышения зависит от давления (температуры) отбора. Так, если отбор проводить при котельном давлении, то

$$T_p = T'_1,$$

$$\Delta S_p = \Delta S_1^1, \quad (a)$$

$$\Delta q = q \sim \text{пл. тк}'qtm.$$

При этом (30) переходит в

$$\eta_p = 1 - \frac{T'_c \Delta S_2}{T'_1 \Delta S_1^1} \frac{T_1^1 \Delta S_1^1}{q + T_1^1 \Delta S_1^1}. \quad (36)$$

Но

$$q + T_1^1 \Delta S_1^1 = T'_R \Delta S'_R, \quad (37)$$

откуда, с учетом (16), получается

$$\eta_p = \eta_R,$$

т. е. отбор острого пара для подогрева питательной воды бесполезен.

Равным образом не имеет смысла отбор пара для подогрева питательной воды при конденсаторном давлении. В этом случае

$$\Delta q = 0. \quad (b)$$

Из балансового уравнения подогревателя (29) следует, что

$$g_k = g_1; \quad (c)$$

Далее

$$T'_{c'} = T'_{R}, \quad (d)$$

$$\Delta S_1 = \Delta S'_{R}.$$

Следовательно, из (26) и (16)

$$\eta_p = \eta_R.$$

При всех промежуточных давлениях отборов

$$\eta_p > \eta_R.$$

Наиболее удобное для непосредственного применения выражение для к.п.д. регенеративного цикла с одной точкой отбора можно получить из (30). Учитывая, что (см. рис. 8)

$$T''_c \Delta S'' = i_k - i_{k'},$$

$$T_p \Delta S_p = i_{01} - i_{01'}, \quad (38)$$

$$T'_c \Delta S_1 = i_1 - i_{01'},$$

$$\Delta q + T_p \Delta S_p = i_{01} - i_{k'},$$

имеем

$$\eta_p = 1 - \frac{i_{01} - i_{01'} \cdot i_k - i_{k'}}{i_1 - i_{01'} \cdot i_{10} - i_{k'}}. \quad (39)$$

Из этого соотношения еще раз подтверждается, что отбор пара при котельном и конденсаторном давлениях не дает выгоды. В самом деле, в первом случае

$$i_1 = i_{01},$$

а во втором

$$i_{01} = i_k$$

и

$$i_{01'} = i_{k'},$$

что в обоих случаях дает

$$\eta_p = \eta_R.$$

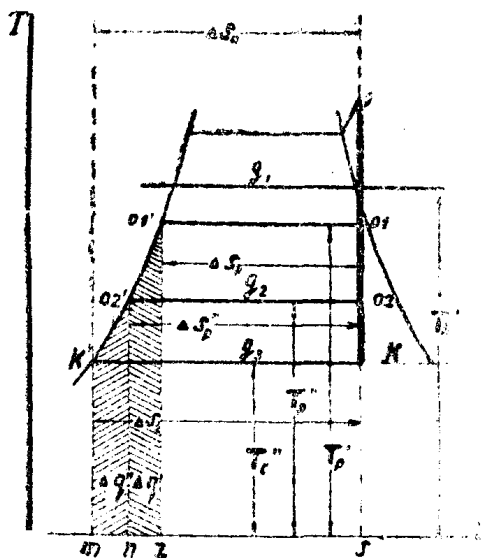


Рис. 9

Переходя к установке с несколькими точками отборов пара, покажем прежде всего, что добавление второй точки отбора (после первой) ведет к повышению к.п.д. установки. Пусть в установке с двумя точками отбора, процесс которой изображен на рис. 9, работает в первой части, считая на 1 кг топлива, g_1 кг пара, во второй — g_2 и в третьей — g_k кг. К.п.д. этой установки по (26) будет

$$\eta_p = 1 - \frac{g_k T''_c \Delta S_2}{g_1 T'_c \Delta S_1}. \quad (40)$$

Составим тепловые балансы подогревателей:

$$g_k \Delta q'' = (g_2 - g_k) T''_p \Delta S''_p. \quad (41)$$

$$g_2 \Delta q' = (g_1 - g_2) T'_p \Delta S'_p. \quad (42)$$

Здесь

$$\Delta q'' \sim \text{пл. } k^1 02' \text{ птк}^1,$$

$$\Delta q' \sim \text{пл. } n 02' 01' \text{ п.}$$

Из (40), с учетом (41) и (42), имеем

$$\eta_{ip} = 1 - \frac{T''_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1} \frac{T'_p \Delta S'_p}{\Delta q' + T'_p \Delta S'_p} \frac{T''_p \Delta S''_p}{\Delta q'' + T''_p \Delta S''_p}. \quad (43)$$

Обе последние дроби правой части, очевидно, правильные. Если к числителю и знаменателю последней дроби прибавить одно и то же число

$$i_{01} - i_{02},$$

то абсолютное значение этой дроби увеличится, т. е.,

$$\eta_{ip} > 1 - \frac{T''_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1} \frac{T'_p \Delta S'_p}{\Delta q' + T'_p \Delta S'_p} \frac{T''_p \Delta S''_p + (i_{01} - i_{02})}{\Delta q'' + T''_p \Delta S''_p + (i_{01} - i_{02})}. \quad (44)$$

Но

$$T''_p \Delta S''_p + (i_{01} - i_{02}) \sim \text{пл. п } 02' 01' O / \text{sn} \sim \Delta q' + T'_p \Delta S'_p, \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \Delta q'' + T''_p \Delta S''_p + (i_{01} - i_{02}) &\sim \text{пл. мк}' 02' 01' 01 \text{ sm} \sim \\ &\sim \Delta q' + \Delta q'' + T'_p \Delta S'_p = \Delta q + T'_p \Delta S'_p. \end{aligned} \quad (46)$$

Таким образом,

$$\eta_{ip} > 1 - \frac{T''_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1} \frac{T'_p \Delta S'_p}{\Delta q + T'_p \Delta S'_p}. \quad (47)$$

Согласно (30), правая часть последнего соотношения равна величине к.п.д. цикла с 1 точкой отбора. Следовательно, добавление второй точки отбора при с-тт T_p''

$$T_p' > T_p'' > T_k \quad (48)$$

дает повышение к.п.д. установки. Можно аналогичным приемом показать, что добавление третьего отбора дает дальнейшее увеличение к.п.д.

Однако это увеличение имеет предел, который нетрудно вычислить. При бесконечно большом числе точек отбора пара к.п.д. по (26) будет

$$\eta_{ip} = 1 - \frac{g_k}{g_1} \frac{T''_c \Delta S_2}{T'_c \Delta S_1}. \quad (26)$$

При бесконечно большом числе точек отбора теплообмен в каждом подогревателе происходит при бесконечно малой разности температур, т. е., квазистатически, без приращения энтропии. Если и расширение будет идти квазистатически, то не должна изменяться энтропия всех тел „системы“, т. е.,

$$g_k \Delta S_2 = g_1 \Delta S_1. \quad (49)$$

Из (26) и (49) следует, что

$$\eta_{ip} = 1 - \frac{T''_c}{T'_c} \quad (\text{при } n = \infty). \quad (50)$$

Таким образом, если подвод и отвод тепла идут изотермически, то при бесконечно большом числе точек отбора к.п.д. цикла будет тот же, что и для цикла Карно.

Для вычисления к.п.д. регенеративного цикла при двух точках отбора имеем

$$\eta_{ip} = 1 - \frac{T'_p \Delta S'_p}{T'_c \Delta S_1} \frac{T''_p \Delta S''_p}{\Delta q' + T'_p \Delta S'_p} \frac{T'_c \Delta S_2}{\Delta q' + T''_p \Delta S''_p}. \quad (43)$$

По рис. 9

$$\begin{aligned} T'_p \Delta S'_p &= i_{0'} - i'_{01}, \\ T''_p \Delta S''_p &= i_{02} - i'_{02}, \\ T'_c \Delta S_2 &= i_k - i'_k, \\ T'_c \Delta S_1 &= i_1 - i'_{01}. \end{aligned} \quad (51)$$

$$\Delta q' + T'_p \Delta S'_p = i_{01} - i'_{01},$$

$$\Delta q'' + T''_p \Delta S''_p = i_{02} - i'_{02}.$$

Следовательно,

$$\eta_p = 1 - \frac{i_{01} - i'_{01}}{i_1 - i'_{01}} \frac{i_{02} - i'_{02}}{i_{01} - i'_{02}} \frac{i_k - i'_{0k}}{i_{02} - i'_{0k}}. \quad (52)$$

Используя указанный прием, можно написать общее выражение для к.п.д. регенеративного цикла при любом числе точек отбора

$$\eta_p = 1 - \frac{i_{01} - i'_{01}}{i_1 - i'_{01}} \frac{i_{02} - i'_{02}}{i_{01} - i'_{02}} \dots \frac{i_{0n} - i'_{0n}}{i_{0(n-1)} - i'_{0n}} \frac{i_k - i'_{0k}}{i_{0n} - i'_{0k}}. \quad (53)$$

Выражение (53) можно написать иначе. Так, для цикла 1 O1 O1' 1 (рис. 9) имеем:

$$\eta_{11} = \frac{i_1 - i_{01}}{i_1 - i'_{01}}, \quad (54)$$

откуда

$$1 - \eta_{11} = \frac{i_{01} - i'_{01}}{i_1 - i'_{01}}. \quad (55)$$

Аналогично для цикла O1 O2 O2' O1' O1:

$$1 - \eta_{22} = \frac{i_{02} - i'_{02}}{i_{01} - i'_{02}} \quad (56)$$

и т. д. Из (53), (55), (56) и т. д. получается

$$1 - \eta = (1 - \eta_{11})(1 - \eta_{22}) \dots (1 - \eta_{nn})(1 - \eta_{n+1}), \quad (57)$$

где $\eta_{11}, \eta_{22}, \dots, \eta_{nn}, \eta_{n+1}$ — к.п.д. циклов от первого до $(n+1)$, на которые разбивается основной цикл изобарами отборов.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_0	$-i_{02}$
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	$\dots \frac{i_0^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
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	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K,}$	$/273 + 25 = 293 \text{ K,}$