

К ВОПРОСУ О РАСХОДАХ ПАРА И ТЕПЛА НА СУДОВУЮ ПАРОСИЛОВУЮ УСТАНОВКУ И НА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А. М. ПОДСУШНЫЙ

Взаимосвязь отдельных потребителей энергии в современной судовой паросиловой установке довольно сложна: главная машина потребляет свежий пар непосредственно от котлов, вспомогательные потребители частью работают свежим паром котельных параметров, частью охлажденным во внутрикотловом охладителе паром пониженных параметров, частью дросселированным паром, частью паром отбора от главной машины. При этом общий расход пара на силовую установку в целом оказывается не равным сумме видимых расходов пара на отдельных потребителей, если под видимым расходом пара понимать количество потребляемого отдельным потребителем пара. Для такого сложного случая уравнение баланса расхода пара на установку в целом нельзя представлять в виде обычно употребляемого уравнения

$$D = D_0 + \Sigma D_k, \quad (1)$$

где D — расход пара на силовую установку,

D_0 — расход пара на главную машину,

D_k — расход пара на отдельного вспомогательного потребителя.

Уравнение (1) справедливо лишь в частном случае, когда каждый вспомогательный потребитель питается свежим паром от котлов.

1. Расходы пара на установку

При тепловой схеме любой сложности взаимодействия отдельных потребителей энергии расход пара на силовую установку следует определять как сумму:

а) расхода пара на главную машину, работающую без отборов или вводов пара в промежуточные ступени при той же мощности;

б) изменения в расходе пара на главную машину в связи с отборами пара на подогрев питательной воды;

в) изменения в расходе пара на главную машину и силовую установку в связи с работой вспомогательных потребителей. Тогда увеличение расхода пара из котлов на силовую установку, вызванное расходом пара на k -того потребителя, следует называть истинным расходом пара на этого потребителя.

Истинные расходы энергии определяют экономичность отдельных потребителей в данной конкретной паросиловой установке, определяют качество связи этого потребителя с остальными элементами паросиловой установки, т. е. в конечном счете экономичность тепловой схемы.

Расход пара на главную машину, работающую без отборов или вводов пара в промежуточные ступени, определяется по известной формуле

$$D'_0 = \frac{632,3 \cdot N_i}{H_i}.$$

В этом случае поток пара D'_0 проходит без изменения (утечками пара пренебрегаем) через все ступени главной машины в конденсатор и является основным потоком пара, понимая под основным потоком пара количество его, выходящее из главной машины в конденсатор. В пределах силовой установки к этому основному потоку пара присоединяются добавочные потоки пара для вспомогательных потребителей.

При работе главной машины с отборами пара или вводами его в промежуточные ступени изменится поток пара как в пределах главной машины, так и во всей силовой установке. Основной поток пара D_{om} в этом случае не будет равным условному потоку пара главной машины без отборов D'_0 . Здесь можно выделить два случая отборов (вводов) пара: случай, когда отборы пара производятся только для подогрева питательной воды по регенеративному циклу, и случай, когда отборы пара производятся как на подогрев питательной воды, так и для работы вспомогательных потребителей.

Расходы пара при отборах только на регенерацию

При отборах пара только на подогрев питательной воды расход пара на главную машину представится уравнением

$$D'_{em} = D_{om} + \Sigma D_{on}, \quad (2)$$

где D_{om} — основной поток пара в этом случае,

D_{on} — отбор пара из n -й ступени отбора от главной машины, ведя нумерацию ступеней отбора соответственно нумерации ступеней подогрева питательной воды по ходу ее от конденсатора к котлам.

Относительные величины отборов пара исчисляем по отношению к основному потоку пара

$$\alpha_{on} = \frac{D_{on}}{D_{om}}.$$

Подставив в (2) α_{on} , получаем выражение для расхода пара на главную машину в виде

$$D'_{em} = D_{om} (1 + \Sigma \alpha_{on}). \quad (3)$$

Из условия сохранения неизменной мощности главной машины при отборах пара и без них составляем равенство внутренних работ в виде

$$D'_0 \cdot H_i = D_{om} \cdot H_i + \Sigma D_{on} \cdot h_{in}, \quad (4)$$

где h_{in} — внутренний теплоперепад, использованный в ступенях главной машины до отбора.

В этом равенстве 1-й член правой части представляет собой работу основного потока пара в главной машине, а 2-й член — работу добавочных потоков пара, идущих в отбор.

Вводя коэффициент относительной загрузки ступеней главной машины до отбора как отношение внутреннего теплоперепада до точки отбора ко всему теплоперепаду в главной машине

$$\psi_n = \frac{h_{in}}{H_i},$$

получаем из (4) значение основного потока пара в этом случае

$$D_{om} = D'_0 - \Sigma D_{on} \cdot \psi_n. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что при работе главной машины с отборами пара величина основного потока пара уменьшается по сравнению с работой главной машины без отборов на величину $\Sigma D_{on} \cdot \psi_n$, меньшую, чем видимый расход пара на подогрев питательной воды. Вследствие уменьшения основного потока пара уменьшается отдача тепла в конденсатор, следовательно, повышается экономичность установки.

Пользуясь формулой (5), уравнение (2) перепишем в виде

$$D'_{zm} = D'_0 + \Sigma D_{on} (1 - \psi_n), \quad (6)$$

показывающем, что отборы пара на подогрев питательной воды при видимом суммарном расходе пара ΣD_{on} увеличивают расход пара на главную машину лишь на $\Sigma D_{on} (1 - \psi_n)$, т. е. эту величину и следует рассматривать как истинный расход пара из котлов на подогрев питательной воды.

Вводя в (6) относительные отборы пара α_{on} , получим выражение

$$D'_{zm} = D'_0 + D_{om} \Sigma \alpha_{on} (1 - \psi_n). \quad (7)$$

Из уравнений (3) и (7) получаем выражение для относительной величины основного потока пара в виде

$$\gamma_{om} = \frac{D_{om}}{D'_0} = \frac{1}{1 + \Sigma \alpha_{on} \psi_n}. \quad (8)$$

Относительное увеличение расхода пара на главную машину в связи с регенерацией найдется из уравнений (7) и (8)

$$\gamma_0 = \frac{D'_{zm}}{D'_0} = 1 + \frac{\Sigma \alpha_{on} (1 - \psi_n)}{1 + \Sigma \alpha_{on} \psi_n} = \frac{1 + \Sigma \alpha_{on}}{1 + \Sigma \alpha_{on} \cdot \psi_n}. \quad (9)$$

Поскольку в рассматриваемом случае вспомогательные потребители работают свежим котельным паром, то уравнение расхода пара на силовую установку получит вид

$$D = D'_0 + \Sigma D_{on} (1 - \psi_n) + \Sigma D_k.$$

Выводы приведенных формул сделаны при допущении, что внутренний к. п. д. главной машины и отдельных ее ступеней, выбранный с учетом отборов пара, остается без изменения и при работе машины без отборов пара.

Расходы пара при отборах на регенерацию и на вспомогательных потребителей

В современных паросиловых установках все большее применение находит пар повышенных параметров, поскольку при этом повышается экономичность силовых установок. В то же время некоторые вспомогательные потребители пара требуют для работы пар низких начальных параметров (например, бытовые потребители, испарительные установки и др.). В этом случае более рентабельной будет работа их не дросселированным котельным паром, а паром отбора от главной машины. В тепловых схемах паросиловых установок турбинных судов с повышенными параметрами пара, разработанных в ЦНИИМФ, предусматривается, в частности, отбор пара от главной машины для работы бытовых потребителей. Возможна работа и ряда других потребителей паром отбора от главной машины. Следовательно, в общем виде при отборах пара на регенерацию и на

вспомогательных потребителей от главной машины равенство работ машины с отборами и без отборов получит вид

$$D'_0 \cdot H_i = D_{om} \cdot H_i + \Sigma D_{on} \cdot h_{in} + \Sigma D_k h_{in},$$

откуда легко получить величину основного потока пара

$$D_{om} = D'_0 - (\Sigma D_{on} \psi_n + \Sigma D_k \psi_n). \quad (10)$$

Расход пара на главную машину следует рассматривать как сумму основного потока пара и добавочных потоков пара на регенерацию и на вспомогательных потребителей:

$$D_{zm} = D_{om} + \Sigma D_{on} + \Sigma D_k,$$

что с учетом (10) дает

$$D_{zm} = D'_0 + \Sigma D_{on} (1 - \psi_n) + \Sigma D_k (1 - \psi_n). \quad (11)$$

Здесь в правой части уравнения 2-й член представляет собой истинный расход пара на подогрев питательной воды, а 3-й член—истинный расход пара на вспомогательных потребителей, работающих от отбора главной машины. Как видно, любой потребитель пара, работающий от главной машины, увеличивает расход пара на главную машину на $D_k(1 - \psi_n)$, т. е. меньше, чем на видимый расход пара D_k . Величина же истинного расхода пара на отдельного потребителя $D_k(1 - \psi_n)$ при работе его паром отбора от главной машины зависит от величины ψ_n , которая определяется качеством связи этого потребителя с главной машиной.

Относительная величина основного потока пара найдется из уравнения (10)

$$\gamma_{om} = \frac{D_{om}}{D'_0} = \frac{1 - \Sigma \zeta_k \psi_n}{1 + \Sigma \alpha_{on} \psi_n}$$

или

$$\gamma_{om} = \frac{\gamma_0 - \Sigma \zeta_k \psi_n}{1 + \Sigma \alpha_{on}} \quad (12)$$

где ζ_k — относительный видимый расход пара на k -того потребителя.

$$\zeta_k = \frac{D_k}{D'_0}.$$

Сопоставляя (6) и (11), получаем

$$D_{zm} = D'_{zm} + \Sigma D_k (1 - \psi_n), \quad (13)$$

т. е. расход пара на главную машину можно рассматривать как сумму расхода пара на главную машину с отборами на подогрев питательной воды и истинного расхода пара на k -тых потребителей. Из уравнения (13) легко определить относительный расход пара на главную машину в этом случае

$$\gamma_{zm} = \frac{D_{zm}}{D'_0} = \gamma_0 + \Sigma \zeta_k (1 - \psi_n). \quad (14)$$

Расход пара на силовую установку в целом имеет тот же вид, что и уравнение (11), если потребители свежего пара от котлов считать работающими от „нулевого“ отбора главной машины, для которого $\psi_n = 0$:

$$D = D'_0 + \Sigma D_{on} (1 - \psi_n) + \Sigma D_k (1 - \psi_n) \quad (15)$$

и в относительном виде:

$$\gamma = \frac{D}{D'_0} = \gamma_0 + \sum \gamma_k (1 - \psi_n). \quad (16)$$

Если объединить видимые расходы пара на регенерацию и на вспомогательных потребителей одним обозначением D_k , то приходим к более простому выражению для расхода пара на силовую установку в целом в самом общем виде:

$$D = D'_0 + \sum D_k (1 - \psi_n) \quad (17)$$

и в относительном виде:

$$\gamma = 1 + \sum \gamma_k (1 - \psi_n). \quad (18)$$

Уравнение (17) и следует применять вместо уравнения (1).

Нетрудно видеть, что это уравнение пригодно при любых тепловых схемах паросиловых установок и при любом включении вспомогательных потребителей в общий цикл паросиловой установки. Это уравнение удобно и для исследований, поскольку устанавливает количественную и качественную связь между отдельными потребителями. Например, если бытовые потребители расходуют D_b кг/час пара, сдросселированного в детандере, то перевод бытовых потребителей на питание отбором от соответствующей ступени главной машины уменьшит расход пара на силовую установку на величину

$$D_b - D_b(1 - \psi_n) = D_b \psi_n.$$

Как видим, экономия в расходе пара на силовую установку зависит от величины ψ_n , т. е. от качества связи бытовых потребителей с главной машиной. Понятно, что чем больше величина ψ_n , тем больше работы совершил добавочный поток пара D_b в главной машине, тем большая экономия получится в расходе пара из котлов на силовую установку в результате перевода бытовых потребителей на питание паром отбора от главной машины.

2. Расход тепла на силовую установку

Общий расход тепла на паросиловую установку в целом удобно рассматривать состоящим из расхода тепла на приготовление D кг/час пара с теплосодержанием i_1 и расхода тепла на разного вида потери. Так как часть вспомогательных потребителей работает паром пониженных параметров и эти потребители по условиям работы нецелесообразно переводить на питание из отборов от главной машины (например, воздушные пароструйные эжекторы), то выгоднее подводить к ним охлажденный во внутрикотловом охладителе пар с начальным теплосодержанием i_n , что уменьшит расход тепла на силовую установку за счет возврата в котлы $(i_1 - i_{1k})$ ккалорий тепла с каждым кг пара, прошедшего через внутрикотловую охладитель. Потери тепла считаем состоящими из 2 видов: потерь тепла главным паропроводом от котла до главной машины ΔQ_0 и потерь тепла, связанных с работой испарителей ΔQ_n . Остальные потери удобнее учитывать увеличением расхода пара на соответствующего потребителя. Тогда уравнение расхода тепла на силовую установку можно записать в виде

$$Q = D (i_1 - i'''_{ns}) - \sum D_k (i_1 - i_{1k}) + \Delta Q_0 + \Delta Q_n. \quad (19)$$

Здесь i'''_{ns} — теплосодержание питательной воды.

Следует иметь в виду, что для вспомогательных потребителей, работающих паром отбора от главной машины, будет иметь место равенство $i_1 = i_{1k}$, т. е. второй член правой части уравнения охватывает потре-

лей, питающихся охлажденным во внутрикотловом охладителе паром. Расход тепла на главную машину без отбора пара определяется равенством

$$Q'_0 = D'_0 (i_1 - i'''_x) = D'_0 \cdot \omega. \quad (20)$$

Обозначим

$$\Delta Z_0 = \frac{\Delta Q_0}{Q'_0} \text{ и } \Delta Z_u = \frac{\Delta Q_u}{Q'_0}.$$

Тогда из формул (19) и (20), учитывая выражение (16), получаем уравнение для относительного расхода тепла на силовую установку

$$Z = \frac{Q}{Q'_0} = \frac{1}{\omega} [Z (i_1 - i'''_{nv}) - \sum \zeta_k (i_1 - i_{1k})] + \Delta Z_0 + \Delta Z_u \quad (21)$$

Относительная величина потерь тепла, связанная с работой испарителя, принимается по опытным данным по формуле

$$\Delta Z_u = \zeta_u \cdot \frac{q_u}{\omega}, \quad (22)$$

где ζ_u — относительное количество пара вторичного пара испарителя

$$\zeta_u = \frac{D_u}{D'_0}.$$

Производительность испарителя в современных установках принимается равной около 1% от производительности котлов, т. е.

$$D_u = 0,01 \cdot D.$$

Тогда относительное количество вторичного пара испарителя определится соотношением

$$\zeta_u = 0,01 \cdot \frac{D}{D'_0} = 0,01 \cdot Z.$$

Расход тепла на получение 1 кг вторичного пара испарителя по опытным данным можно принять в среднем равным $q_u = 50$ ккал/кг. Подставляя ζ_u и q_u в (22), получим выражение для определения относительной величины потерь тепла, связанных с работой испарителя в виде

$$\Delta Z_u = 0,01 \cdot Z \cdot \frac{50}{\omega} = 0,5 \cdot \frac{Z}{\omega}.$$

Подставляя в (21), получаем уравнение относительного расхода тепла на паросиловую установку в окончательном виде как

$$Z = \frac{1}{\omega} [Z (i_1 - i'''_{nv} + 0,5) - \sum \zeta_k (i_1 - i_{1k})] + \Delta Z_0. \quad (23)$$

Относительную величину потерь тепла главным паропроводом в силовых установках можно принять по опытным данным равной $\Delta Z_0 = 0,005$. Определив относительный расход тепла по уравнению (23), легко найти и абсолютный расход тепла на паросиловую установку в целом:

$$Q = Z \cdot Q'_0.$$

Далее нетрудно вычислить и удельный расход топлива на установку по выражению:

$$b_i = k_0 \frac{Q}{N_i \cdot Q_n^p \cdot \gamma_{\text{тк}}} \text{ кг/илсч,}$$

где k_0 — коэффициент увеличения расхода топлива в средних эксплуатационных условиях в связи с износами, коррозией и пр.,

N_i — мощность главной машины в н. л. с.,

Q_H^p — теплотворность топлива,

η_k — к.п.д. котлов.

Полученные уравнения являются более общими, пригодными для любых тепловых схем паросиловых установок, а употребляющиеся до сих пор уравнения следует рассматривать как частные случаи этих уравнений. Кроме того, по этим уравнениям легко производить расчеты силовых установок в относительной форме, что является более удобным.
