

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛОПЕРЕПАДОВ ПО ЦИЛИНДРАМ ПОРШНЕВОЙ МАШИНЫ СУДОВОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ С ОТБОРАМИ ПАРА НА ПОДОГРЕВ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

А. М. ПОДСУШНЫЙ

За последнее время компаундаж поршневых паровых машин с турбинами отработавшего пара, как средство повышения экономичности паросиловых установок морских судов, получает значительное распространение. Наиболее распространенными комбинированными установками, обладающими наилучшей экономичностью, являются установки с поршневой машиной 3-го расширения и турбиной отработавшего пара, работающими на один вал с машиной через двойную зубчатую передачу с гидромuftой (система Бауэр-Вах). Однако вопрос о распределении теплоперепадов по цилиндрам машины, о распределении мощности как между машиной и турбиной, так и по цилиндрам, до последнего времени не получил полного и законченного освещения в литературе. Вопрос решен в частном простейшем случае, когда машина работает без отборов пара. При отсутствии отборов пара из ресиверов машины поток пара во всех цилиндрах машины будет одинаковым, если пренебречь утечками пара через уплотнения штоков. В этом случае индикаторные мощности цилиндров будут пропорциональными индикаторным теплоперепадам цилиндров

$$\frac{N_{iv}}{N_{iM}} : \frac{N_{ic}}{N_{iM}} : \frac{N_{in}}{N_{iM}} = \frac{h_{is}}{H_{iM}} : \frac{h_{ic}}{H_{iM}} : \frac{h_{in}}{H_{iM}}. \quad (1)$$

При наличии отборов пара из ресиверов или ввода пара в ресиверы машины это уравнение не будет справедливо в силу изменчивости количества работающего пара в отдельных цилиндрах машины. Пусть в частном случае судовая комбинированная установка с машиной 3-го расширения и турбиной отработавшего пара имеет 3-х ступенчатый подогрев питательной воды. Отборы пара производятся из всех ресиверов, причем из ресивера турбины отработавшего пара отбирается  $D_{01}$  кг/час, из ресивера ЦНД— $D_{02}$  кг/час, из ресивера ЦСД— $D_{03}$  кг/час пара. Основной поток пара—количество пара, выходящего из турбины в конденсатор—будет  $D_{om}$  кг/час. Относительные отборы пара исчисляем по отношению к основному потоку пара:

$$\alpha_{01} = \frac{D_{01}}{D_{om}}; \alpha_{02} = \frac{D_{02}}{D_{om}}; \alpha_{03} = \frac{D_{03}}{D_{om}}. \quad (2)$$

Тогда отношение индикаторных мощностей цилиндров паровой машины 3-го расширения следует определять соотношением

$$\frac{N_{iv}}{N_{im}} : \frac{N_{ic}}{N_{im}} : \frac{N_{in}}{N_{im}} = \frac{1 + \sum^3 \alpha_{on}}{L_{im}} h_{iv} : \frac{1 + \sum^2 \alpha_{on}}{L_{im}} h_{ic} : \frac{1 + \sum^1 \alpha_{on}}{L_{im}} h_{in}, \quad (3)$$

где  $L_{im} = (1 + \sum^3 \alpha_{on}) h_{iv} + (1 + \sum^2 \alpha_{on}) h_{ic} + (1 + \sum^1 \alpha_{on}) h_{in}$ ,

где  $L_{im}$  — индикаторная работа машины, совершенная всем количеством пара, прошедшего через цилиндры, и приходящаяся на 1 кг пара основного потока,

$1 + \sum^3 \alpha_{on} = 1 + \alpha_{01} + \alpha_{02} + \alpha_{03}$  — относительный поток пара в ЦВД,

$1 + \sum^2 \alpha_{on} = 1 + \alpha_{01} + \alpha_{02}$  — относительный поток пара в ЦСД,

$1 + \sum^1 \alpha_{on} = 1 + \alpha_{01}$  — относительный поток пара в ЦНД.

Распределение мощности между машиной и турбиной комбинированной установки в известной мере характеризуется относительной загрузкой машины

$$\psi_1 = \frac{H_{im}}{H_{ic}}. \quad (4)$$

Для получения большей экономичности парового двигателя с регенеративными отборами пара ряд авторов [1; 2; 3] рекомендует обеспечивать равномерный нагрев питательной воды в каждой ступени подогрева. В случае, когда задано давление в 1-й ступени подогрева (в данном случае задано  $\psi_1$ ), то эти авторы рекомендуют принимать соотношение между относительными нагрузками цилиндров в виде

$$\psi_2 = \frac{h_{iv} + h_{ic}}{H_{ic}} \approx \frac{1}{3} \psi_1 \quad \text{и} \quad \psi_3 = \frac{h_{iv}}{H_{ic}} = \frac{2}{3} \psi_1. \quad (5)$$

Однако в судовых машинах при применении перегретого пара и особенно в машинах комбинированных установок при регенеративных отборах пара, приходится перегружать ЦВД и недогружать ЦНД, чтобы обеспечить нормальные степени наполнений цилиндров (больше 50%) среднего и низкого давлений. В комбинированных установках это диктуется также тем обстоятельством, что при маневрировании и на заднем ходу поршневая машина работает на конденсатор, вакуум в котором уменьшается весьма мало против расчетного режима переднего хода. В этом случае наблюдается перегрузка ЦНД вследствие понижения противодавления за машиной. Исходя из этих соображений, приходится отказываться от равномерного распределения мощности по цилиндрам поршневой машины. А. В. Голынский, например, рекомендует [4; 5] в машинах 3-го расширения с отборами пара из ресиверов и работе на перегретом паре загружать ЦВД до 36—40% от мощности машины, а ЦСД—до 33—35%. Учитывая сказанное и работы ЦНИИМФ [6], можно принять в нашем рассматриваемом случае для машины 3-го расширения комбинированной установки, работающей паром нормальных и повышенных параметров, распределение мощности по цилиндрам равным

$$\frac{N_{iv}}{N_{im}} : \frac{N_{ic}}{N_{im}} : \frac{N_{in}}{N_{im}} = 0,38 : 0,34 : 0,28. \quad (6)$$

На основании исследования опытного материала и расчетов автора установлено, что значения множителей при  $h_{ic}$  в уравнении (3) лежат в пределах

$$\begin{aligned} \frac{1 + \sum^3 \alpha_{on}}{L_{im}} &= 1,11-1,08, \text{ принято } 1,095, \\ \frac{1 + \sum^2 \alpha_{on}}{L_{im}} &= 1,02-0,96, \text{ принято } 1,0, \\ \frac{1 + \sum^1 \alpha_{on}}{L_{im}} &= 0,930-0,875, \text{ принято } 0,90. \end{aligned} \quad (7)$$

Эти значения установлены для комбинированных установок с машиной 3-го расширения при мощности установки 2000 л. с. Для установок иного типа указанные множители следует установить особо.

Из уравнения (3) имеем соотношения между индикаторными теплоперепадами цилиндров в виде:

$$h_{is} : h_{ic} : h_{in} = \frac{\frac{N_{is}}{N_{im}}}{1 + \sum^3 \alpha_{on}} : \frac{\frac{N_{ic}}{N_{im}}}{1 + \sum^2 \alpha_{on}} : \frac{\frac{N_{in}}{N_{im}}}{1 + \sum^1 \alpha_{on}}. \quad (8)$$

Подставляя сюда принятые значения относительных мощностей цилиндров по (6) и значения знаменателей по (7), получим

$$h_{is} : h_{ic} : h_{in} = 0,35 : 0,34 : 0,31. \quad (9)$$

При этом относительные загрузки цилиндров станут равными

$$\begin{aligned} \psi_3 &= 0,35 \psi_1, \\ \psi_2 &= 0,69 \psi_1 \end{aligned} \quad (10)$$

вместо (5).

В общем случае паровая машина может быть  $k$  кратного расширения, а отборы пара могут осуществляться не только из ресиверов, но и из промежуточных ступеней турбины отработавшего пара. Считая в этом случае за ступень двигателя часть двигателя между соседними отборами пара, можем выразить отношение мощностей ступеней двигателя через отношение теплоперепадов ступеней в общем виде уравнением:

$$\begin{aligned} &\frac{N_{i(n+1)}}{N_{ic}} : \frac{N_{in}}{N_{ic}} : \frac{N_{i(n-1)}}{N_{ic}} : \dots : \frac{N_{i1}}{N_{ic}} = \\ &= \frac{1 + \sum^n \alpha_{on}}{L_{ic}} h_{i(n+1)} : \frac{1 + \sum^{n-1} \alpha_{on}}{L_{ic}} h_{in} : \frac{1 + \sum^{n-2} \alpha_{on}}{L_{ic}} h_{i(n-1)} : \dots : \frac{h_{i1}}{L_{ic}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $N_{i(n+1)}, N_{in}, N_{i(n-1)}, \dots, N_{i1}$  — индикаторная мощность соответствующей ступени главного двигателя;

$N_{ic}$  — индикаторная мощность главного двигателя;

$h_{i(n+1)}, h_{in}, h_{i(n-1)}, \dots, h_{i1}$  — индикаторный теплоперепад соответствующей ступени расширения главного двигателя;

$$1 + \sum_{\alpha_{0n}}^n = 1 + \alpha_{01} + \alpha_{02} + \alpha_{03} + \dots + \alpha_{0(n-1)} + \alpha_{0n},$$

$$1 + \sum_{\alpha_{0n}}^{n-1} = 1 + \alpha_{01} + \alpha_{02} + \alpha_{03} + \dots + \alpha_{0(n-1)} \quad \text{и т. д. —}$$

.....  
 — относительный поток пара в соответствующей ступени главного двигателя;

$$L_{ik} = (1 + \sum_{\alpha_{0n}}^n) h_{i(n+1)} + (1 + \sum_{\alpha_{0n}}^{n-1}) h_{in} + (1 + \sum_{\alpha_{0n}}^{n-2}) h_{i(n-1)} + \dots + h_{i1}.$$

$L_{ik}$  — суммарная индикаторная работа главного двигателя;

$n$  — порядковый номер отбора пара от главного двигателя, ведя нумерацию по ходу питательной воды от конденсатора к котлам.

Уравнение (11) может быть применено к паровому двигателю любого типа с любым числом отборов пара. Из этого уравнения легко определить отношение теплоперепадов при любом заданном соотношении мощностей ступеней двигателя при известных значениях относительных величин отборов пара от главного двигателя. Уравнение (3) является частным случаем уравнения (11) в применении к машине 3-го расширения комбинированной установки при отборах пара только из ресиверов. Уравнение (1) тоже можно рассматривать как частный случай уравнения (11) при работе машины без отборов пара. Этими уравнениями можно пользоваться и для нахождения соотношения мощностей ступеней двигателя по известным величинам отборов пара от главного двигателя и заданным величинам теплоперепадов.

Таким образом, уравнение (11) является наиболее общим уравнением связи величин теплоперепадов и мощностей ступеней двигателя и величин отборов пара от главного двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рубинштейн Я. М. Исследование регенеративного процесса в паротурбинных установках. Изв. ВТИ, № 1 (44), № 9 (52), 1929.
2. Петелин Г. И. Регенеративный подогрев питательной воды. ОНТИ, 1932.
3. Фукс Г. И. К.п.д. и давления отборов регенеративного цикла. Изв. ТПИ, т. 63. 1945.
4. Гольнский А. В. Тепловой расчет паровых поршневых машин. Л.К.И. ч. 1, 1938, ч. 2, 1939.
5. Гольнский А. В. Теория и тепловой расчет судовых паровых машин. „Морской транспорт“, 1951.
6. Семяка В. А., Кутьин Л. Н. Выбор типа паросиловых установок морских судов, подлежащих постройке, с установками 1500 и л. с. и меньше. ЦНИИМФ, Ленинград, 1950.