

А. Л. КЛЯЧКИН

ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ МНОГОПРОЦЕССНОГО ИЗОБАРНОГО ЦИКЛА СО СТУПЕНЧАТЫМ СЖАТИЕМ И РАСШИРЕНИЕМ 4-ПРОЦЕССНОМУ ИЗОБАРНО-ПОЛИТРОПНОМУ ЦИКЛУ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 6 V 1952)

1. Идеальные циклы (рис. 1). Рассмотрим идеальный обратимый изобарный цикл со ступенчатым сжатием и расширением. Будем полагать, что процессы промежуточного охлаждения при сжатии и подогрева при расширении осуществляются по изобарам, а процессы сжатия и расширения — по адиабатам. Пусть во всех ступенях сжатия, равно как и расширения, соответственно равны температуры начала и конца частных процессов, т. е. $T_1 = T_g = T_e$; $T_2 = T_f = T_n$; $T_3 = T_b = T_a$; $T_4 = T_a = T_c$.

Докажем, что в этом случае многопроцессный изобарный цикл со ступенчатым сжатием и расширением термодинамически эквивалентен 4-процессному изобарно-политропному циклу с равными параметрами газа в начале и конце процессов сжатия и расширения. Термодинамическая эквивалентность циклов при

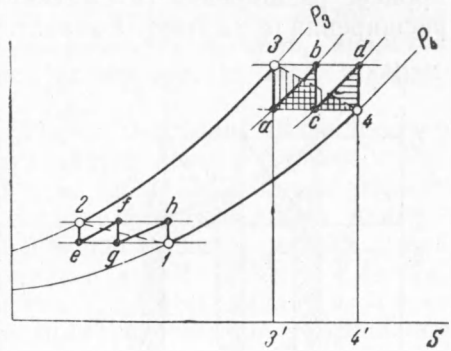


Рис. 1. Идеальный многопроцессный изобарный цикл

данных условиях означает равенство термодинамических кпд (η_t), подведенных и отведенных теплот (q_1 и q_{II}) и работ цикла (L_t).

Для доказательства этого достаточно показать, что ступенчатый (адиабатно-изобарный) процесс сжатия (или расширения) термодинамически эквивалентен политропному процессу сжатия (или расширения) с равными начальными и конечными состояниями.

Пусть: $3 - a - b - c \dots d$ — 4-ступенчатый процесс расширения, состоящий из z процессов тепла и $z + 1$ процессов расширения; $3 - 4$ — политропный процесс расширения.

Внешнее тепло, подведенное в ступенчатом процессе, равно

$$q_{ст} = z c_p (T_3 - T_4), \quad (1)$$

а в политропном процессе

$$q_{пол} = c (T_3 - T_4) = -c_v \frac{n-k}{n-1} (T_3 - T_4). \quad (2)$$

Выразим показатель эквивалентной политропы n через z . Имеем:

$$P_a = P_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad P_c = P_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{2 \frac{k}{k-1}}, \quad \dots, \quad P_4 = P_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{(z+1) \frac{k}{k-1}}. \quad (3)$$

С другой стороны:

$$P_4 = P_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{n}{n-1}}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) находим:

$$(z+1) \frac{k}{k-1} = \frac{n}{n-1}, \quad (5)$$

откуда

$$z = \frac{n}{n-1} \frac{k-1}{k} - 1 = - \frac{n-k}{k(n-1)}; \quad (5')$$

при $z \rightarrow \infty$ $n \rightarrow 1$; при $z \rightarrow 0$ $n \rightarrow k$.

Следовательно, из (1), (2) и (5') находим, что $z c_p (T_3 - T_4) = c (T_3 - T_4)$ и $q_{ст} = q_{пол}$. Графически это означает, что площади $3'-3-4-4'$ и $3'-a-b-c-d-4'$ равновелики.

Применяя к ступенчатому и политропному процессам уравнение 1-го начала $q = \Delta i - \int v dp$, где $\Delta i_{ст} = \Delta i_{пол}$, находим, что в указанных процессах равны работы расширения. Следовательно, ступенчатый процесс расширения (и сжатия) эквивалентен политропному процессу расширения (и сжатия), а значит, эквивалентны рассматриваемые циклы.

Отсюда следует важный вывод, что термодинамические соотношения, полученные для идеальных 4-процессных изобарно-политропных циклов, могут быть распространены на идеальные многопроцессные циклы со ступенчатым сжатием и расширением.

2. Реальные циклы (рис. 2). Перейдем теперь к сравнению указанных циклов при наличии потерь (трения).

Пусть реальный ступенчатый процесс расширения изобразится кривой $3-a'-b-c'-d-4'$ (с ростом энтропии в частных процессах расширения и падением давления в подогревателях), а реальный политропный процесс — кривой $3-4'$. Легко

видеть, что потери в политропном процессе (изображаемые площадью $3-4'-n-m-4-3$) меньше, чем в ступенчатом процессе (сумма площадок $g-3-a'-b-e-h+k-b-c'-d-f-l+m-d-4'-n$). Следовательно, реальные процессы $3-4'$ и $3-a'-b-c'-d-4'$ термодинамически уже неэквивалентны. Неэквивалентны и соответствующие реальные циклы. Работа и кпд 4-процессного цикла оказываются значительно большими, чем многопроцессного.

Таким образом, из термодинамических соображений, а также соображений веса и габаритов двигателя всегда следует на практике стремиться осуществлять циклы с непрерывными процессами сжатия и расширения.

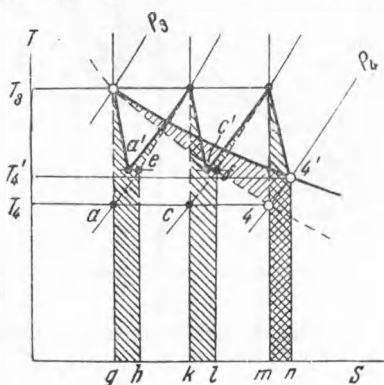


Рис. 2. Сравнение действительных ступенчатого и политропного процессов расширения