

В. В. ЛАХАНИН

**ТЕПЛОЙ РАСЧЕТ ПАРОВЫХ МАШИН МНОГОКРАТНОГО  
РАСШИРЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ТЕОРИИ ПОДОБИЯ**

(Представлено академиком М. В. Кирпичевым 3 I 1953)

К основным задачам теории паровых поршневых машин относятся: 1) нахождение зависимости тепловых характеристик машин многократного расширения от параметров, определяющих их тепловой процесс; 2) построение методики теплового расчета, позволяющей выбирать наиболее рациональный вариант.

Эти задачи решены в общем виде для судовых паровых машин многократного расширения на основе обработки экспериментальных материалов при помощи теории подобия, развитой в трудах М. В. Кирпичева и его школы.

В области поршневых машин метод теории подобия впервые применен П. К. Конаковым к исследованию термодинамического процесса паровозных машин (1). В последующем под руководством М. В. Кирпичева этот метод был распространен на паровые машины узкоколейных паровозов (2) и на судовые машины (3). Здесь излагается новое общее решение двух поставленных задач.

Анализ условий однозначности и обработка на основе теории подобия дифференциальных уравнений теплового процесса паровых машин многократного расширения позволили, согласно 2-й теореме подобия, установить, что для циклов этих машин существуют зависимости:

$$\sigma = f_{\sigma}(\Pi_M); \quad \xi = f_{\xi}(\Pi_M); \quad \frac{\sigma}{\xi} = f(\Pi_M), \quad (1)$$

в которые входят инварианты:

$$\sigma = \frac{u_1 v_1 i_1}{D_n^2 S (1 + s_{об}) i_2} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{p_1}{p_1 - p_2}, \quad (3)$$

$$\Pi_M = \frac{f_n \sqrt{Eg} V \bar{n}_a \varphi_{ен} x_0}{D_n^2 S (1 + s_{об}) n} \quad (4)$$

Инварианты (2) — (4) образованы из параметров:  $u_1$  — расход пара на 1 ход в кг/ход;  $v_1$  — удельный объем пара в м<sup>3</sup>/кг при состоянии перед машиной;  $i_1$  — теплосодержание пара в ккал/кг и  $p_1$  — давление пара в ата при том же состоянии;  $p_2$  — давление в конденсаторе в ата;  $i_2$  — теплосодержание пара в ккал/кг при давлении  $p_2$ ;  $D_n$  — диаметр

цилиндра низкого давления (ц. н. д.) в м;  $S$  — ход поршня в м;  $S_{ов}$  — относительное вредное пространство цилиндра высокого давления (ц. в. д.);  $p_1$  — среднее индикаторное давление в машине, приведенное к ц. н. д. в ат;  $f_в$  — площадь открытия канала для впуска пара в ц. в. д. в м<sup>2</sup>, соответствующая заданной степени наполнения в ц. в. д.  $\epsilon_в$ ;  $E = 427$  кгм/ккал;  $h_a$  — адиабатический теплоперепад в машине в ккал/кг,  $h_a = i_1 - i_2$ ;  $\varphi_{ев}$  — угол поворота мотыля от крайнего положения, соответствующий наполнению в ц. в. д.  $\epsilon_в$ ;  $n$  — число оборотов в минуту;  $x_0$  — отношение объемов цилиндров.

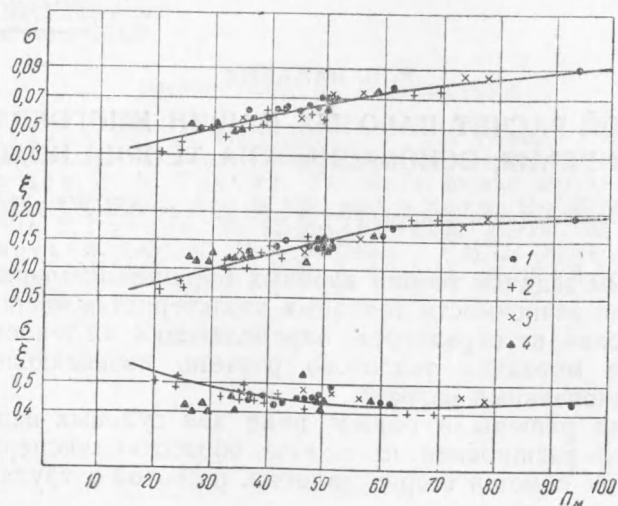


Рис. 1. Графики:  $\sigma = f_{\sigma}(P_M)$ ;  $\xi = f_{\xi}(P_M)$  и  $\sigma/\xi = f(P_M)$ . 1 — машины тройного расширения; 2 — безрисервные клапанные машины двойного расширения; 3 — безрисервные золотниковые машины двойного расширения; 4 — машины четырехкратного расширения высокого давления

Для машин, у которых все цилиндры имеют по две рабочих полости

$$x_0 = x = \frac{D_n^2}{D_v^2};$$

для машин, имеющих однополостные цилиндры,

$$x_0 = x x_1,$$

где  $x_1$  определяется как отношение квадрата диаметра первого однополостного цилиндра к удвоенному квадрату диаметра первого двухполостного цилиндра;  $D_v$  — диаметр ц. в. д. в м.

Для четырех основных типов судовых паровых машин зависимости (1) оказались общими (рис. 1). Опытные точки для разных типов машин хорошо ложатся на общие зависимости. Для получения этих зависимостей использованы материалы испытаний машин, выполненные в ЦНИИВТ'е и ЦНИИРФ'е под руководством В. А. Семека, Ф. Л. Юдицкого, В. Г. Ермилова и М. Н. Брежнева (4).

Расположение опытных точек позволяет выразить зависимости прямыми линиями, удовлетворяющими уравнениям:

а) для значений  $P_M = 20-60$ :

$$\sigma = (1,012 P_M + 17,06) 10^{-3}; \quad (5)$$

$$\xi = (2,805 P_M + 14,27) 10^{-3}; \quad (6)$$

б) для значений  $\Pi_m = 60-90$ ;

$$\sigma = (0,353 \Pi_m + 58,64) 10^{-3}; \quad (7)$$

$$\xi = (0,370 \Pi_m + 16,44) 10^{-3}. \quad (8)$$

Безразмерные критерии  $\sigma$ ,  $\xi$  и  $\Pi_m$  связаны с тепловыми характеристиками машины. Это позволило получить простые и удобные формулы, позволяющие вычислять все основные тепловые характеристики машин: индикаторную мощность  $N_i$ , и. л. с.; среднее индикаторное давление  $p_i$ , ат; удельный расход пара  $d_i$ , кг/илс час; внутренний относительный к. п. д. машины  $\eta_{oi}$ ; использованный в машине теплоперепад  $h_i$ , ккал/кг.

Эти формулы имеют вид:

$$N_i = 3,49 \alpha D_p^2 S (p_1 - p_2) n \xi, \quad (9)$$

$$p_i = (p_1 - p_2) \xi, \quad (10)$$

$$d_i = 34,4 \frac{(1 + s_{об}) i_2 \sigma}{(p_1 - p_2) v_1 i_1 \xi}, \quad (11)$$

$$\eta_{oi} = 18,4 \frac{(p_1 - p_2) v_1 i_1}{(1 + s_{об}) i_2 (i_1 - i_2)} \frac{\xi}{\sigma}, \quad (12)$$

$$h_i = 18,4 \frac{(p_1 - p_2) v_1 i_1}{(1 + s_{об}) i_2} \frac{\xi}{\sigma}. \quad (13)$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от типа машины: для машин тройного расширения  $\alpha = 1$ ; для машин сдвоенных безресиверных  $\alpha = 2$ ; для трехмотылевых четверного расширения с одной полостью ц. в. д.  $\alpha = 0,5$ .

Формулы (9) — (13) дают решение первой основной задачи теории паровых машин. Действительно, если задать параметры, определяющие некоторый тепловой цикл машины, то могут быть вычислены: значение  $\Pi_m$  по выражению (4), значения  $\sigma$  и  $\xi$  по формулам (5), (6) или (7), (8) и тепловые характеристики по формулам (9) — (13).

Формулы (9) — (13) достоверны в границах параметров использованных опытных данных:  $p_1 = 8-48$  ата; начальная температура пара  $t_1 = 200-450^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 0,10-0,40$  ата;  $s_{об} = 0,20-0,75$ ;  $n = 50-180$  об/мин.

Решение второй задачи теории паровых машин основано на выборе такого сочетания определяющих цикл машины параметров, которое обеспечивает работу машины при оптимальных условиях. Эти условия достигаются при определенных значениях аргумента  $\Pi_m$ . Здесь исключается случайный подбор параметров, который бывает при других методах расчета.

Анализ функций (1) и формул (9) и (11) показывает, что при значениях  $\Pi_m < 60$  уменьшается мощность и увеличивается расход пара. Это область невыгодных значений  $\Pi_m$ . Минимум расхода пара достигается при  $\Pi_m = 60$ .

При значениях  $\Pi_m > 60$  расход пара несколько увеличивается по сравнению с минимальным, но увеличивается мощность.

Это позволяет сформулировать два указания для проектирования машин.

1) Если машина будет работать в основном на расчетном режиме или на режимах с большей мощностью, чем заданная расчетная, а с уменьшенной мощностью машине придется работать только кратковременно при маневрах, то следует проектировать машину так, чтобы расчетный режим соответствовал  $\Pi_m = 60$ . Такой расчет называем расчетом на оптимальную экономичность.

2) Если машина должна длительное время работать на режимах с уменьшенной мощностью (по сравнению с расчетной), то следует машину проектировать так, чтобы расчетный режим соответствовал значениям  $\Pi_m > 60$ , например, при  $\Pi_m = 70 - 85$ . При этом как расчетный, так и уменьшенный режимы окажутся в области выгодных значений функции  $\sigma/\xi$ , полого изменяющейся в интервале  $\Pi_m = 50 - 80$ . Этот расчет называем расчетом по повышенному среднему индикаторному давлению.

Если проектировать машину для значений  $\Pi_m > 60$ , ее размеры получаются меньшими, нежели при значениях  $\Pi_m \leq 60$ .

Таблица 1

	Удельный расход пара в % к случаю оптимальной экономичности	Произведение $D_n^2 S$ в % к случаю оптимальной экономичности
Случайный вариант	110	121
Вариант расчета по оптимальной экономичности . . . .	100	100
Вариант расчета по повышенному среднему индикаторному давлению . . . .	104,5	94,5

Обычно при проектировании машины задают  $N_i$ ,  $n$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  и тип машины. Выбрав на основе изложенных здесь указаний значение  $\Pi_m$ , можно вычислить по формулам (6) или (8) соответствующее ему значение  $\xi$ . Тогда по формуле (9) легко вычислить произведение  $D_n^2 S$ , дающее основные размеры машины. Остальные размеры машин должны быть подобраны так, чтобы при выбранном значении  $\Pi_m$  удовлетворялось выражение (4). При этом, конечно, выбираемые величины не должны выходить из границ, установленных практикой для различных типов машин.

Эффективность методики расчета, основанной на теории подобия,

иллюстрируем примером, в котором дано сравнение случайного варианта спроектированной машины, полученного ранее существовавшим методом расчета по коэффициенту полноты, с вариантами, основанными на теории подобия (см. табл. 1).

В случайном варианте даже при значительном увеличении размеров машин ( $D_n^2 S$ ) можно получить не сокращение, а увеличение расхода пара. Расчет по повышенному среднему индикаторному давлению дает увеличение расхода пара при уменьшении размеров.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность акад. М. В. Кирпичеву и проф. П. К. Конакову за их ценные консультации по этой работе.

Поступило  
17 XII 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> П. К. Конаков, Тр. МЭМИИТ, в. 59 (1949). <sup>2</sup> М. В. Кирпичев, В. Н. Сологубов, ДАН, 78, № 5, 893 (1951). <sup>3</sup> В. В. Лаханин, Приложение теории подобия к исследованию работы судовых паровых машин многократного расширения, 1950. <sup>4</sup> Б. А. Семека, Исследование характеристик вертикальных судовых паровых машин, 1936.