

## Влияние чисел Маха и Рейнольдса на коэффициенты расхода перегретого пара

Канд. техн. наук Э. Г. БРАТУТА, инженеры М. С. КОЛОМИЕЦ, Д. Н. ПЯСИК, С. П. ШАТИЛОВ, Ю. Э. ЮШКЕВИЧ

ХТГЗ им. С. М. Кирова — ХПИ им. В. И. Ленина

Высокие требования, предъявляемые в настоящее время к точности теплового расчета проточной части современных паровых турбин, обусловили развитие исследовательских работ, связанных с экспериментальным определением характеристик решеток профилей. Как известно, одной из наименее изученных характеристик турбинных решеток, в особенности при течи перегретого пара, является коэффициент расхода. Следует отметить, что в области исследования раздельного влияния критериев Маха и Рейнольдса на пропускную способность решеток, кроме работы [Л. 1]\*, результаты которой ограничиваются зависимостью  $\mu = f(\text{Re})$  при сверхзвуковом режиме, более подробная информация отсутствует.

В связи с этим на экспериментальном пародинамическом стенде ХТГЗ им. С. М. Кирова в широком диапазоне изменения критериев Маха и Рейнольдса были проведены опыты по определению коэффициентов расхода плоской сопловой решетки, составленной из восьми профилей типа ТН-2 (II), с относительным шагом  $\bar{t} = 0,676$ , относительным удлинением  $\bar{l} = 1,08$  и углом установки  $\beta = 41^\circ 30'$ .

Приципиальная схема установки показана на рис. 1. Пар из магистрального паропровода через дроссельный 1 и регулировочный 2 вентиля поступает в пароохладитель 3, где путем впрыска конденсата осуществляется регулирование начальной температуры пара. Далее пар поступает в водоотделитель 4, а затем в рабочую часть установки. Заданный уровень начального давления предварительно устанавливается вентилем 2, а тонкая регулировка в зависимости от того, будет ли перед исследуемой решеткой вакуум или избыточное давление осуществляется вентилями 5 и 7.

Исследуемая решетка профилей 8 крепится на специальном фланце между выхлопным и напорным патрубками «Обработавший» пар через регулировочный вентиль 9 поступает в поверхностный конденсатор 10, откуда конденсат направляется в мерный бак 11. После окончания очередного опыта конденсат из мерного бака откачивается насосом 12 в конденсатосборник 13. Отсос воздуха из конденсатора и создание необходимого уровня разрежения за исследуемой решеткой обеспечивается вакуумным насосом 14 либо эжектором (на схеме не показан). Для измерения количества конденсата, образовавшегося в результате тепловых потерь, предусмотрен второй мерный бак 15.

Измерение температуры пара перед решеткой проводилось с помощью четырех хромель-копелевых термопар и потенциометра ППТВ (класс точности 0,1) 16.

Начальное давление пара и перепад давлений на решетку измерялись с помощью пятиметровых ртутных дифференциальных манометров 17. Для предотвращения конденсации в импульсных линиях последние были размещены в трубопроводе парового обогрева 18.

Пространство над ртутью до уравнительных бачков 19 заполнялось водой, постоянный уровень которой обеспечивался патрубками перелива, соединенными с емкостями 20.

Изменение критерия Рейнольдса осуществлялось за счет изменения плотности рабочего тела. В связи с этим на экспериментальной установке были проведены семь групп опытов, отличавшихся друг от друга величиной начального давления, изменявшегося от 0,685 до 5,4 бар. В каждой группе опытов выдерживались одинаковые при всех начальных давлениях значения отношения давлений  $\epsilon$ , равные 0,94; 0,85; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3 соответственно. В каждом режиме при  $\epsilon = \text{const}$  проводились опыты с различной степенью перегрева  $\Delta t_{\text{п}}$ .

При обработке экспериментальных данных в качестве коэффициента расхода  $\mu$  принималось отношение

$$\mu = G_d / G_T, \quad (1)$$

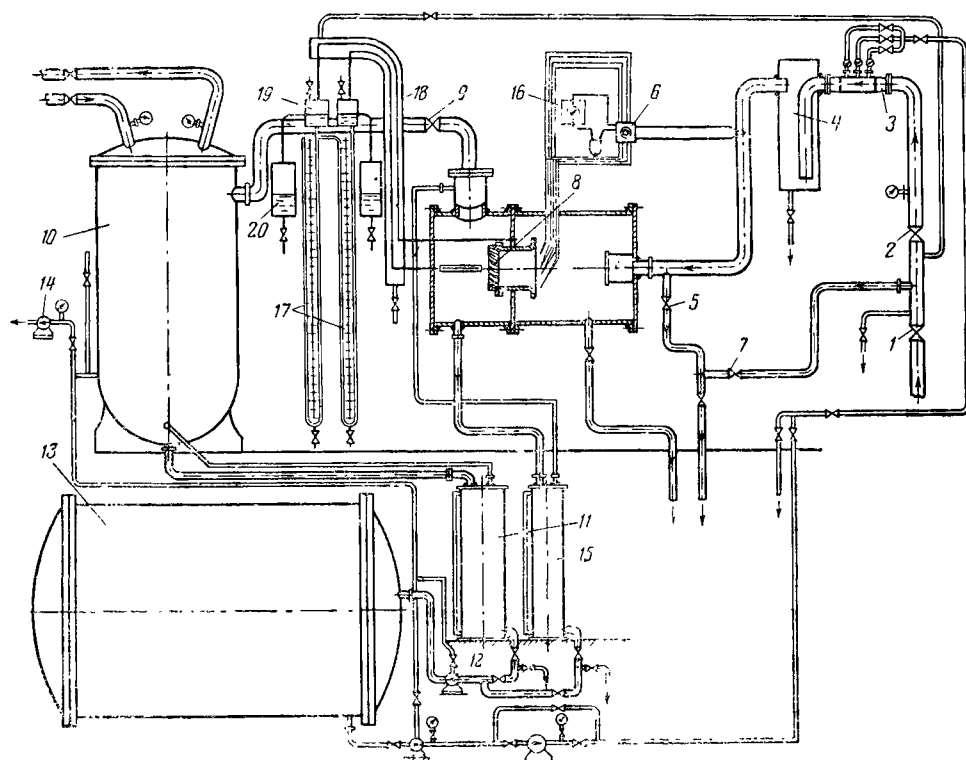


Рис. 1. Схема пародинамического стенда ХТГЗ для продувок плоских решеток профилей.

\* Л. Я. Лазарев, В. П. Ницкесвич. «Теплоэнергетика» № 7, 1965

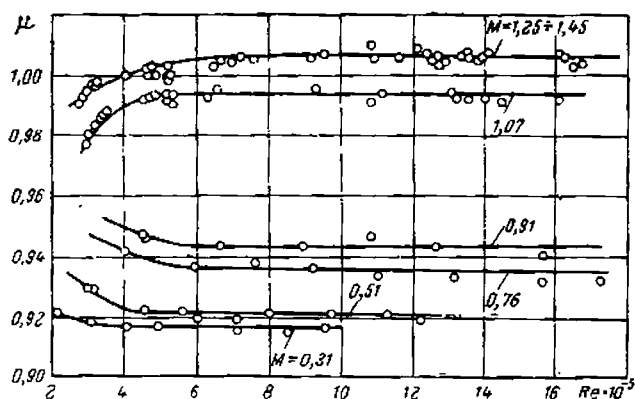


Рис. 2. Зависимость коэффициентов расхода от критериев Маха и Рейнольдса.

где  $G_d$  — действительный расход пара, найденный по измерению расхода конденсата с помощью мерных баков;

$G_r$  — теоретический расход при изэнтропийном расширении пара:

$$G_r = f \left[ 2 \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{v_0} \left( \epsilon^{\frac{2}{k}} - \epsilon^{\frac{k+1}{k}} \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $f$  — суммарная площадь горловых сечений лопаточных каналов, измеренная с помощью калибров;

$k$  — показатель адиабаты, принимаемый равным 1,30.

Необходимо заметить, что определение  $G$  с помощью крупномасштабной  $is$ -диаграммы при значениях  $\epsilon = 0,95 \div 0,9$  связано с погрешностями, иногда превышающими погрешности эксперимента, что и обусловило расчет  $G_r$  по уравнению (2).

Число Маха определялось из выражения

$$M = \left[ \frac{2}{k-1} \left( \epsilon^{-\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

и критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{c_{1r} b}{\nu_1}, \quad (4)$$

где  $c_{1r}$  — скорость в конце изэнтропийного расширения при дозвуковых режимах или критическая скорость в случае, когда  $M_1 \geq 1$ ;

$\nu_1$  — кинематическая вязкость пара;

$b$  — хорда профиля.

Результаты опытов показаны на рис. 2. Рассмотрение представленных зависимостей позволяет установить следующее.

При постоянном значении критерия  $Re$  обнаружен интесивный рост коэффициентов расхода по мере увеличения критерия Маха.

Рост коэффициентов расхода имеет место и в том случае, когда достигнуто значение  $M_1 = 1$ . Для исследуемой решетки лишь при  $M_1 = 1,25$  дальнейшее увеличение критерия Маха не приводит к увеличению коэффициентов расхода.

Нижним пределом влияния сжимаемости на коэффициент расхода можно считать значение  $M_1 = 0,3$ .

Область автомодельности по критерию  $Re$  как для дозвуковых, так и для сверхзвуковых режимов соответствует величинам  $Re > 6 \cdot 10^5$ .

В области, где  $Re < 6 \cdot 10^5$ , зависимость  $\mu = f(Re)$  имеет различный характер. При сверхзвуковых режимах увеличение чисел  $Re$  связано с увеличением коэффициентов расхода вплоть до зоны автомодельности. При  $M < 1$  рост чисел  $Re$  сопровождается некоторым падением пропускной способности решетки.

Установленная область автомодельности, а также характер изменения коэффициентов расхода в функции критерия Рейнольдса при сверхзвуковом режиме истечения совпадают с результатами, полученными в [Л. 1].

○