

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЗРУШЕННЫХ ТРУБ

Проверенный анализ процесса энергетического разделения газа в ВТ [5] показал, что этот процесс может быть представлен как процесс теплообмена между двумя встречно движущимися осевыми потоками газа: периферийным ( $e$ ), направленным от соплового ввода к дросселю, и внутренним ( $i$ ), направленным от дросселя к диафрагме. На характер теплообмена в турбулентном потоке значительное влияние оказывает вязкость газа. Перенос тепла в турбулентном потоке газа происходит при некотором отклонении реального распределения температуры от распределения, соответствующего адиабатному закону при переменном давлении [1, 2].

Изменение температуры внутреннего потока ( $i$ ) в ВТ при движении его от дросселя к диафрагме

$$\frac{dT_i}{dz} = \frac{C(T_i - T_e + \Delta T_{ад})}{G_i C_p} dF. \quad (1)$$

Изменение температуры периферийного потока ( $e$ ) при движении его от соплового ввода к дросселю происходит как за счет теплообмена с внутренним потоком, так и за счет снижения окружающей составляющей скорости:

$$\frac{dT_e}{dz} = \frac{C(T_i - T_e + \Delta T_{ад})}{G_e C_p} dF - d\left(\frac{U_\varphi^2}{2C_p}\right). \quad (2)$$

Здесь  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $G_i$ ,  $G_e$  - температура и массовый расход осевого и периферийного потоков;  $\Delta T_{ад}$  - перепад температур, соответствующий адиабатному расширению от давления периферийного потока до давления внутреннего;  $C$  - условный коэффициент теплопередачи между потоками;  $F$  - поверхность теплообмена, определяемая на границе осевых потоков;  $U_\varphi$  - окружная составляющая скорости периферийного потока;  $C_p$  - теплоемкость при постоянном давлении;  $Z$  - осевая координата.

Зависимость для величин  $G_i$ ;  $G_e$ ;  $C$ ;  $\Delta T_{ад}$ ;  $F$ ;  $U_\varphi$ , входящих в уравнения (1) и (2), могут быть определены путем анализа экспериментальных данных по замеру внутренних параметров ВТ.

Решение уравнений (1) и (2) дает возможность получить зависимости изменения температуры потоков по длине вихревой камеры. Температура холодного потока ( $T_x$ ) определяется с учетом подмешивания придиафрагменного потока:

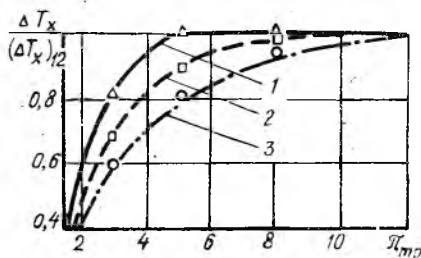
$$T_x = \frac{T_{ic}(G_x - G_n) + T_{\delta x} G_n}{G_x}, \quad (3)$$

где  $G_x, G_n$  - массовые расходы холодного и придиафрагменного потоков;  $T_{ic}$  - температура внутреннего потока ( $i$ ) в сопловом сечении.

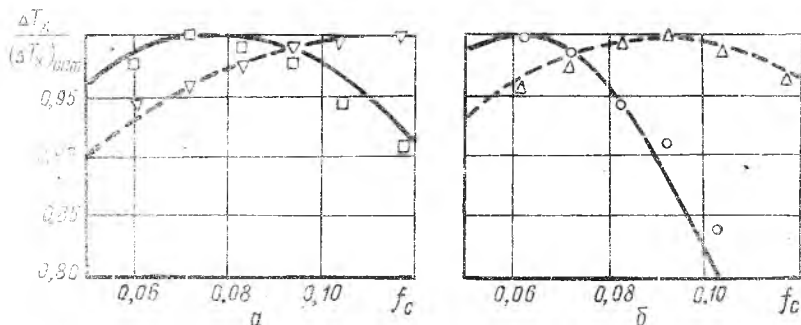
Решение уравнений (1), (2) совместно с (3) дает возможность получить расчетные характеристики ВТ. В силу значительной схематизации процессов, происходящих внутри ВТ, достаточно хорошее совпадение расчетных характеристик с экспериментальными получить затруднительно. Однако такая математическая модель ВТ [3] учитывает изменение эффективности охлаждения при изменении режима работы.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости эффекта охлаждения газа в ВТ ( $\Delta T_x$ ), отнесенного к эффекту охлаждения при степени расширения  $\pi_{tr} = 1 - (\Delta T_x)_{12}$ , от степени расширения газа в ВТ  $\frac{\Delta T_x}{(\Delta T_x)_{12}} = f(\pi_{tr})$ . На этом же рисунке даны значения величины  $\frac{\Delta T_x}{(\Delta T_x)_{12}}$ , полученные в эксперименте. Наблюдается удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента.

Анализ процесса энергетического разделения газа в ВТ показывает, что значительное влияние на эффективность этого процесса оказывает величина относительной площади проходного сечения соплового ввода ( $f_c$ ). Этот параметр оказывает влияние на величину окружной составляющей скорости в сопловом сечении, на закономерность снижения этой составляющей скорости по длине вихревой камеры, на величину расхода периферийного и внутреннего потоков, на относительный расход придиафрагменного потока.



Р и с. 1. Относительный эффект охлаждения ВТ в зависимости от степени расширения: 1-3 соответствуют  $\mu = 0,7; 0,5; 0,3$ ;      расчет;  $\Delta \square \circ$  - эксперимент



Р и с. 2. Относительный эффект охлаждения ЭТ в зависимости от площади сопла: а)  $d_a = 0,525$ ;  $\mu = 0,3$ ; б)  $d_a = 0,595$ ;  $\mu = 0,65$ ; расчет  $\text{---}$   $Pr_{mp} = 5$ ;  $\text{---}$   $Pr_{mp} = 12$ ; эксперимент  $\nabla$   $Pr_{mp} = 5$ ;  $\square$   $Pr_{mp} = 12$

На рис. 2 приведены расчетные зависимости отношения величины эффекта охлаждения, полученной при текущем значении  $f_c$ , к величине  $\Delta T_x$ , полученной при значении  $f_c^{opt}$  ( $\Delta T_x)_{opt}$  в зависимости от значения  $f_c$ . На этом же рисунке приведены значения величины  $\Delta T_x / (\Delta T_x)_{opt}$ , полученные в эксперименте.

#### Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.
2. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. - М., 1963.
3. Делячко А.П. Анализ процесса энергообмена между потоками газа внутри вихревой трубы. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: КуАИ, 1976.