

А.Н.Балалаев, В.В.Бирюк, В.М.Сукчев

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ  
МЕТОДОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

(Самарский аэрокосмический университет)

Предложен метод термодинамического анализа работы вихревой трубы, заключающийся в отыскании и учете условий, приводящих к адиабатному распределению статических параметров газа по радиусу соплового сечения. С учетом этих условий найдена связь теоретической температуры холодного газа, вычисляемой по методу А.П.Меркулова, с температурой холодного газа в идеализированном термодинамическом процессе, приближенно описывающем процесс передачи тепла в вихревой трубе. Приведены результаты расчета вихревой трубы с дополнительным потоком.

Применение вихревых труб (ВТ) в сложных регенеративных термостабилизирующих системах ставит задачу построения математической модели процессов в ВТ при наиболее общих условиях ее работы. К условиям работы, которые должны учитываться в расчетах, относятся: плотность и число Рейнольдса на входе в ВТ, наличие дополнительного потока (ВТДП, двухконтурная ВТ).

Наиболее простым и физически обоснованным методом расчета ВТ является теория А.П.Меркулова, основанная на гипотезе взаимодействия вихрей [1]. Данный метод расчета, дополненный эмпирическими зависимостями для коэффициента расхода тангенциального сопла и коэффициента потерь давления газа при истечении в камеру энергораспределения ВТ, позволяет определить расход газа через ВТ, распределение параметров газа по радиусу в сопловом сечении и осредненную полную температуру газа в сечении диафрагмы.

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект  
и его применение в технике.  
Самара, 1992

Для определения давления подогретого газа дана полуэмпирическая формула

$$P_r = 0.5 (P_{oc} + P_2) + 0.5 (P_1 - P_{oc}) \mu ,$$

предполагающая линейный характер зависимости доли холодного газа от давления подогретого газа и связывающая величину давления последнего с расчетными величинами давления на характерных радиусах ( $Z = 0, Z_2, Z_1$ ) соплового сечения.

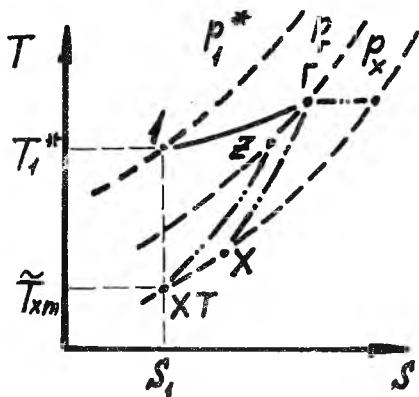
Термодинамический анализ работы ВТ заключается в определении температур охлажденного и подогретого газа путем отыскания и учета условий, приводящих к адиабатному распределению статических параметров по радиусу соплового сечения. Учитывая эти условия, можно найти связь теоретической температуры холодного газа  $T_{xм}$  с температурой холодного газа  $T_x$  в идеализированном процессе, описывающем реальный процесс передачи тепла в ВТ.

Идеализация процесса передачи тепла в ВТ заключается в предположении, что этот процесс протекает по регенеративной схеме и осуществляется следующим образом. Газ, вошедший в ВТ, движется по периферии камеры энергоразделения к дросселю ВТ и получает от приосевых слоев газа некоторое количество тепла  $Q$ , нагреваясь до температуры  $T_r$ . Вблизи дросселя газ делится на два потока: одна его часть  $(1-\mu)$  выходит через дроссель в виде подогретого газа с температурой, а другая часть  $\mu$ , двигаясь к диафрагме, отдает тепло  $Q$  по пути периферийным слоям газа, охлаждаясь до температуры  $T_x$ . При этом давление приосевых слоев газа понижается от  $P_r$  вблизи дросселя до  $P_x$  за диафрагмой. Это первый рассматриваемый термодинамический процесс в ВТ.

Не рассматривая механизм переноса тепла, можно, используя метод термодинамического анализа, рассчитать температуры  $T_r$  и  $T_x$ . При этом считаем, что адиабатное распределение параметров в сопловом сечении достигается при отводе от периферийных слоев газа такого количества тепла, которое подводится к ним от приосевых слоев в действительном процессе.

Рассмотрим второй термодинамический процесс.

Периферийный газ, двигаясь к дросселю, приобретает от приосевых слоев тепло  $Q$  и нагревается до температуры  $T_r$ . От этого газового потока изобарически отводится вблизи дросселя тепло  $Q$ , при этом температура газа снижается от  $T_r$  до некоторой



Р и с. I. Идеализированные термодинамические процессы: I-Г-X - процесс в ВТ; I-Г-z-XТ - процесс в ВТ с изобарным отводом теплоты

температуры  $T_z$ . Часть газа с массовой долей  $\mu$  формирует присевую зону и, двигаясь к диафрагме, отдает периферийному потоку то же тепло  $Q$  за счет вихревого эффекта. Температура этой части газа снижается от величины  $T_z$  до теоретической температуры  $\tilde{T}_{xm}$ . Это второй термодинамический процесс в ВТ. Оба процесса в  $T-S$  координатах показаны на рис. I.

Тепло, отведенное изобарно в единицу времени во втором процессе

$$Q = -G c_p (T_r - T_z). \quad (I)$$

Тепло, переданное в единицу времени от присевых слоев газа периферийным во втором процессе, можно приближенно вычислить через изменение энтропии:

$$Q' = \mu G R \frac{\tilde{T}_{xm} + T_z}{2} \ln \left[ \frac{P_r}{P_x} \left( \frac{\tilde{T}_{xm}}{T_z} \right)^{\frac{K}{K-1}} \right]. \quad (2)$$

Температуру  $T_z$  можно найти методом итераций из баланса энтальпий для второго термодинамического процесса:

$$G c_p T_1^* - G c_p T_z - G_x c_p \tilde{T}_{xm} + Q' = 0. \quad (3)$$

Из равенства  $Q = Q'$  определяем температуру горячего потока  $T_r$  во втором термодинамическом процессе, которая по условию равна температуре горячего потока газа в первом процессе:

$$T_r = T_z + \frac{K-1}{2K} \mu (T_z + \tilde{T}_{xm}) \ln \left[ \frac{P_r}{P_x} \left( \frac{\tilde{T}_{xm}}{T_z} \right)^{\frac{K}{K-1}} \right].$$

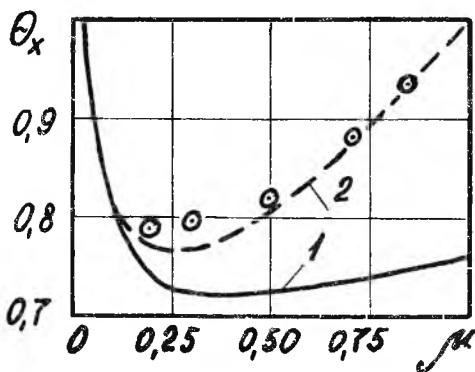
Температура охлажденного газа  $T_x$  первого термодинамического процесса определится из уравнения баланса его энтальпий как

$$G c_p T_1^* - G_r c_p T_r - G_x c_p T_x = 0. \quad (4)$$

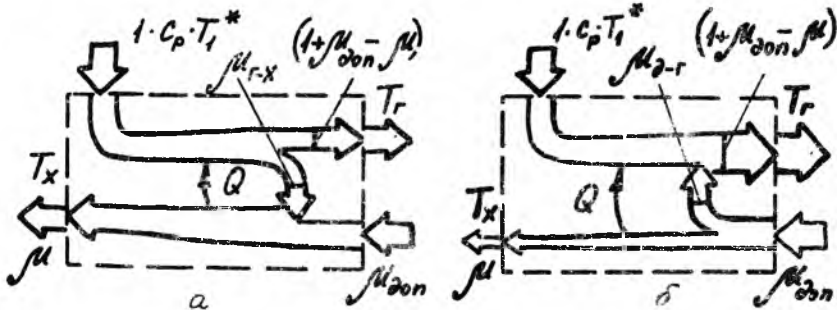
Предложенная методика расчета  $T_x$  по осредненной температуре  $\bar{T}_{xm}$  позволяет достичь хорошего совпадения величины температуры охлажденного газа с опытными значениями (рис. 2).

Приведенный термодинамический анализ можно применять и к более сложным случаям реализации вихревого эффекта, например, к введению дополнительного потока в ВТ. При введении в ВТ со стороны проресселя дополнительного потока с расходом  $G_{доп}$  и температурой  $T_{доп}$  возможны два варианта течения в зависимости от доли кольцевого потока (рис. 3).

Последующие расчеты показали преимущества схемы рис. 3,а по сравнению со схемой рис. 3,б, поэтому приведем термодинамический анализ первой схемы.



Р и с. 2. Расчет зависимости относительной температуры холодного потока ВТ от его массовой доли: 1 - по методу А.П.Меркулова [1]; 2 - по предложенной методике;  $\circ$  - опытные данные при  $T = 5$



Р и с. 3. Энтальпийные диаграммы идеализированного процесса в ВТДП: а - при  $\mu \geq \mu_{доп}$ , б - при  $\mu < \mu_{доп}$

Термодинамический процесс, приводящий к адиабатному распределению параметров газа в сопловом сечении ВТДП, отличается от реального процесса в ВТДП тем, что от подогретого потока газа и от дополнительного потока изобарически отводится тепло, которое в реальном процессе передается периферийному потоку газа от присоединенных слоев.

От подогретого газа расходом  $G$  необходимо отвести в единицу времени тепло

$$Q_1' = -G c_p (T_r - T_{z1}) \quad (5)$$

или, выражая его через изменение энтропии, как это сделано для ВТ:

$$Q_1' = (G - G_r) \frac{\tilde{T}_{xm} + T_{z1}}{2} R \ln \left[ \frac{P_r}{P_x} \left( \frac{\tilde{T}_{xm}}{T_{z1}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right]. \quad (6)$$

От дополнительного потока также следует отвести в единицу времени тепло

$$Q_2' = -G_{\partial on} c_p (T_{\partial on} - T_{z2}) \quad (7)$$

или, выражая эту величину через изменение энтропии, получаем

$$Q_2' = G_{\partial on} \frac{\tilde{T}_{xm} + T_{z2}}{2} R \ln \left[ \frac{P_{\partial on}}{P_x} \left( \frac{\tilde{T}_{xm}}{T_{z2}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right]. \quad (8)$$

Чтобы замкнуть систему уравнений для схемы ВТДП, аналогичную системе (1)–(4) для ВТ, необходимо добавить к выражениям (5)–(8) уравнения баланса энтальпий для двух идеализированных процессов:

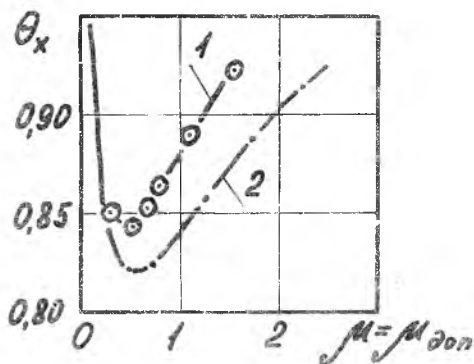
$$G c_p T_1^* + G_{\partial on} c_p T_{\partial on} - G_r c_p T_{z1} - G_x c_p \tilde{T}_{xm} + Q_1' - Q_2' = 0, \quad (9)$$

$$G c_p T_1^* + G_{\partial on} c_p T_{\partial on} - G_r c_p T_r - G_x c_p T_x = 0. \quad (10)$$

Расчеты по предложенной методике велись для конструкции ВТДП и режимов ее работы, описанных в работе [2], и представлены на рис. 4. Сравнение результатов и экспериментов показывает их качественную сходимость.

1. Меркулов А. П.  
Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.

2. Пираллишвили Ш. А., Михайлов В. Г. Экспериментальные исследования вихревой трубы с дополнительным истоком // Некоторые вопросы исследования теплообмена и тепловых машин. Вып. 56. Куйбышев, 1973. С. 64-74.



Р и с. 4. Сравнение результатов расчета и эксперимента для ВТДП: 1 - опытные данные [2]; 2 - результаты расчета для  $\lambda = 4$

УДК 532.537

П. Т. Крамаренко

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА

(Горьковский инженерно-строительный институт)

Показано, что в объеме газа, находящемся в поле внешних сил, хаотическое молекулярное тепловое движение вырождается в направленное по направлению действия внешней силы. Градиент температуры, возникающий при этом - результат перераспределения энергии теплового движения в энергию направленного движения.

В области изучения газов существует целый ряд опытных данных, которые не согласуются с теорией и могут быть объяснены введением дополнительных гипотез. К таким данным можно отнести: градиент тем-

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект  
и его применение в технике.  
Самара, 1992