

газа в вихревой трубе с точностью до $1-2^{\circ}\text{C}$ в любом интервале π и в интервале μ от 0,3 до 1. Эта методика справедлива не только для идеальных газов, но и для газов, физические свойства которых далеки от идеальности.

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. Бродянский В.И., Лейтес И.Л. О градиенте температур в трубе Ранка - Хилла. ИФЖ, 1960, т.3, № 12, с.72.
3. Бродянский В.И., Лейтес И.Л. Зависимость величины эффекта Ранка от свойств реальных газов. ИФЖ, 1962, т.5, №5, с.38.
4. Соколов Е.Я. Характеристика вихревой трубы. "Теплоэнергетика", 1966, №7.
5. Комарова Г.А., Лейтес И.Л. и др. Способ выделения аммиака из продувных газов синтеза. "Химическая промышленность", 1975, №4, с.37.
6. Hilsch R. Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeld als Kälteprozess - "Zeitschrift für Naturforschung", 1946, №1, s. 208.
7. Ентов В.М., Калашников В.Н., Райских Ю.Д. О параметрах определяющих вихревой эффект. Известия АН СССР, "Механика жидкости и газа", 1967, № 3, с.32.

Ш.А. Пиралишвили

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ОКРУЖНОЙ СКОРОСТИ ВЫНУЖДЕННОГО ВИХРЯ

Принятые обозначения

\mathcal{U} - окружной момент количества движения	p - давление
v - скорость	K - показатель изоэнтропы
μ - относительная доля холодного потока	M - число Маха
r - радиус	R - газовая постоянная
ρ - плотность	n - показатель степени закрутки вынужденного вихря
T - температура	π - степень расширения газа

И н д е к с ы

1 - параметры на входе	x - холодный поток
c - сопловое сечение	* - параметры торможения
g - дополнительный поток, диафрагма	z - граница разделения вихрей

Согласно гипотезе взаимодействия вихрей присоединяемый поток раскручивается периферийным. В предельном случае, когда энергообмен завершен, в граничных сечениях трубы должно соблюдаться равенство:

$$J_r = J_\theta = 0, \quad J_r = J_x. \quad (I)$$

При этом в сопловом сечении устанавливается адиабатное распределение параметров.

При определении теоретических характеристик вихревых труб важным моментом следует считать предполагаемый профиль скорости вращательного движения вынужденного вихря в сечении сопла. В большинстве теоретических работ [1, 2] вращение вынужденного вихря принимается по закону твердого тела, с постоянной угловой скоростью по радиусу.

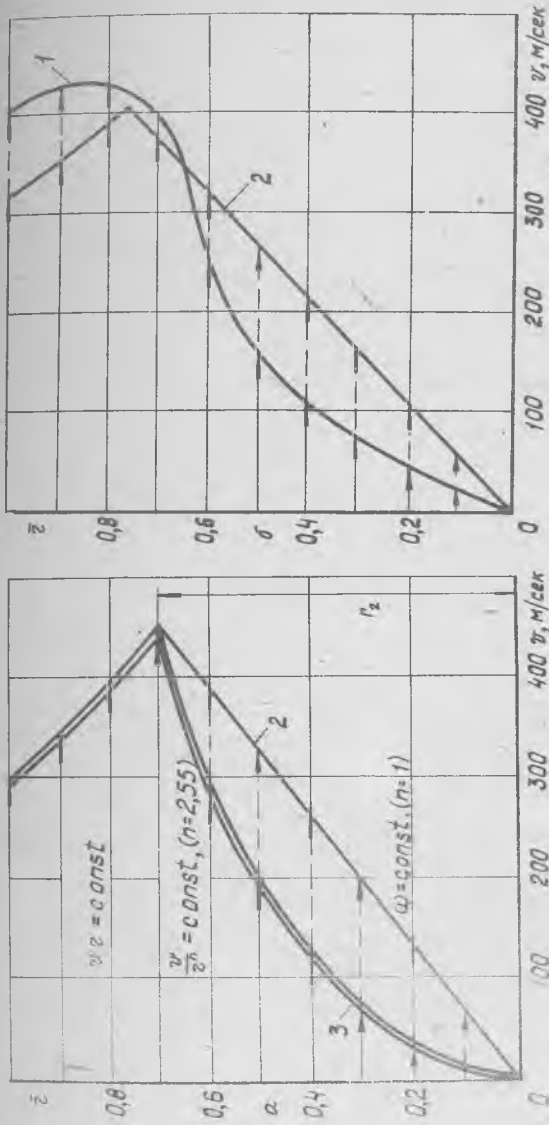
Экспериментальные исследования профиля скорости [3] показывают заметные расхождения профиля вращательной скорости с принятым в теоретических работах.

Обоснование этому расхождению можно дать на основе анализа окружных моментов количества движения.

Как видно из рис.1 расхождение появляется при довольно высоких значениях π , что соответствует сравнительно малым значениям μ . Очевидно, что с падением π и ростом μ расхождение будет возрастать. Такие режимы являются наиболее характерными для вихревых труб с дополнительным потоком.

В работе предложена методика уточнения профиля окружной скорости вынужденного вихря в сопловом сечении.

Сложный газотермодинамический процесс течения в вихревых трубах требует для аналитического описания упрощающих допущений. К общепринятым предположениям можно отнести [1] отсутствие радиальной составляющей скорости $V_r = 0$, вязкости и теплопроводности.



Р и с . 1. Распределение окружных скоростей в соловом сечении вихревых труб:

1 - экспериментальное; 2 - теоретическое; 3 - расчетное по методика автора;

а - $n=4$, $P^*=4$ атм, $\bar{r}_c=0,04$;

б - $n=15$, $P^*=4$ атм

Осевые скорости возникают лишь при наличии осевых градиентов давления, поэтому в момент формирования течения в вихревой трубе может быть описано системой уравнений [1]:

движения

$$\frac{V_{\varphi}^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (2)$$

энергии

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{r}{\rho c_p} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (3)$$

состояния

$$p = \rho R T; \quad (4)$$

адиабаты

$$p = p^{\kappa} \text{const}; \quad (5)$$

вращения периферийного вихря

$$V_{\varphi} r = \text{const}; \quad (6)$$

вращения вынужденного вихря

$$\frac{V_{\varphi}}{r^{\alpha}} = \text{const}. \quad (7)$$

Решение этой системы уравнений дает распределение статического давления в приосевом вихре

$$p = p_1 \left[\left(\frac{p_{0c}}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} + \frac{\kappa-1}{2n} \frac{M_1^2}{\bar{r}_2^{2n+2}} \bar{r}^{2n} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad (8)$$

где \bar{r}_2 - радиус разделения, определяемый из условия равенства статических давлений вынужденного и свободного вихрей.

В результате возникшего осевого градиента давления будет происходить истечение из отверстия диафрагмы с осевой скоростью

$$V_z = \frac{\kappa}{n} R T_1 \frac{M_1^2}{\bar{r}_2^{2n+2}} \bar{r}^{2n} \quad (9)$$

Выражение (9) получено для режимов, при которых отсутствуют рециркуляционные потоки в отверстии диафрагмы.

Окружные моменты количества движения: газа, вводимого в трубу через сопловое устройство

$$J_1 = 3,14 r_1^3 \bar{F}_c \rho_1^* \frac{\kappa M_1^2}{\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}; \quad (10)$$

внутреннего вихря в сопловом сечении

$$J_x = 2 \cdot 3,14 \int_0^{\bar{r}_2} \rho \bar{r}^2 V_{\varphi} V_z d\bar{r}. \quad (11)$$

Уравнение моментов количества движения

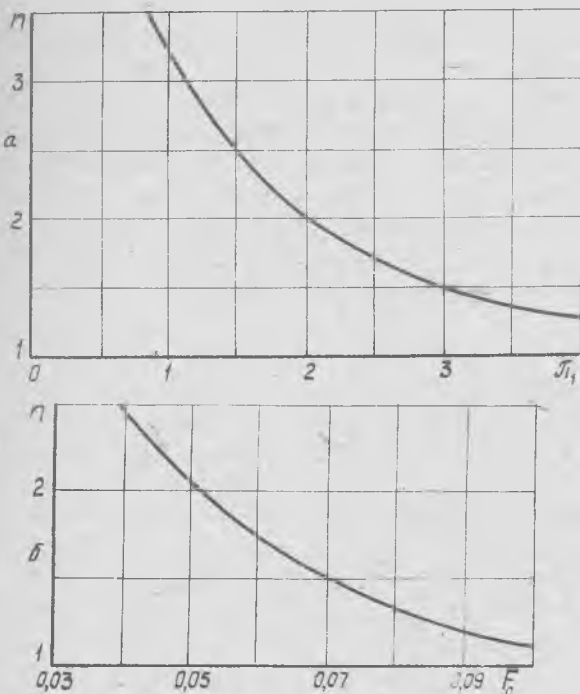
$$J_1 + J_0 = J_2 + J_r \quad (12)$$

Считая $J_r = J_0 = 0$, после подстановки в выражения (10) и (11), уравнение (12) примет вид:

$$\bar{F}_0 \rho_1^* \frac{\kappa M_1^2}{(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_1^2)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} = 2 \int_0^{\bar{r}_2} V_x V_z d\bar{r} \quad (13)$$

Для заданного режима течения ρ_1^* , κ_1 , и геометрии трубы \bar{F}_0 , $\bar{r}_2 = \bar{r}_2$ уравнение (13) может быть решено относительно показателя степени n , определяющего характер вращения вынужденного вихря.

На рис. 1, 2 представлены результаты расчета. Как видно из



Р и с . 2. Зависимость степени закрутки вынужденного вихрем относительной площади сопла и степени расширения газа в вихре:

а - $F_0 = 0,09$; б - $\kappa_1 = 4$

графиков, расчетное распределение окружной скорости вынужденного вихря существенно отличается от скорости вращения твердого тела. С уменьшением \bar{F}_c и π_1 , показатель степени n возрастает.

Как видно из рис.1 наблюдается хорошее качественное совпадение расчетного профиля скорости с экспериментальным.

В ы в о д ы

1. Предложенная методика расчета профиля окружной скорости вынужденного вихря даёт хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными.
2. Снижение величин \bar{F}_c и π_1 , приводит к уменьшению закрутки вынужденного вихря.

Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. О природе вихревого эффекта. Труды КуАИ, вып. 37, 1969.
2. Меркулов А.П., Пираллишвили Ш.А. Теоретическое исследование термодинамических характеристик вихревой трубы с дополнительным потоком, ИЖ, том XXII, 1974.
3. Eckert E.R.G., Hartnett S.P. *Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex Type Flow, Stanford University Heat Transfer Institute Conference, June, 1956.*

Ю.М. Баженов, А.Н. Чернов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Принятые обозначения

x'_i - мольные доли исходного потока e - доля отгона жидкой фазы